

**CARACTERIZAÇÃO DE  
AGROECOSISTEMAS CAFEEIROS DA  
ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS,  
USANDO SENSORIAMENTO REMOTO E  
SISTEMAS DE INFORMAÇÕES  
GEOGRÁFICAS**

**MARLEY LAMOUNIER MACHADO**

**2002**

**MARLEY LAMOUNIER MACHADO**

**CARACTERIZAÇÃO DE AGROECOSISTEMAS CAFEEIROS  
DA ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS, USANDO  
SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES  
GEOGRÁFICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "Mestre"

Orientadora

Helena Maria Ramos Alves

LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2002

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca Central da UFLA**

Machado, Marley Lamounier

Caracterização de agroecossistemas cafeeiros da Zona da Mata de Minas Gerais,  
usando sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas / Marley  
Lamounier Machado. -- Lavras : UFLA, 2002.

137 p. : il.

Orientadora: Helena Maria Ramos Alves.

Dissertação (Mestrado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Sensoriamento remoto. 2. Geoprocessamento. 3. Café. 4.  
Mapeamento. 5. Zona da Mata. 6. Solo. 7. Comportamento espectral. I.  
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-631.478151

-633.73

**MARLEY LAMOUNIER MACHADO**

**CARACTERIZAÇÃO DE AGROECOSISTEMAS CAFEEIROS DA  
ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS, USANDO SENSORIAMENTO  
REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "Mestre"

APROVADA em 21 de Março de 2002

Prof. Dr. Helcio Andrade	UFLA
Prof. Dr. Elpídio Inácio Fernandes Filho	UFV
Prof <sup>a</sup> . Dra. Marilusa Pinto Coelho Lacerda	UNB
Pesquisadora Ms. Tatiana Grossi Chquiloff Vieira	EPAMIG

*Helena Maria Ramos Alves*

Dra. Helena Maria Ramos Alves

EPAMIG

(Orientadora)

LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL - BRASIL

Minha esposa, “meu alicerce”;

Meus filhos, “minha vida”;

**DEDICO**

*"Conhecer não é apenas desnudar o objeto estudado,  
é mergulhar no drama de sua existência"*

*Cristovam Buarque*

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e à Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) pela oportunidade de realização do curso.

À Fundação de Amparo e Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café (CBPD&Café) pela liberação de recursos para o desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

À EMBRAPA/CAFÉ, nas pessoas de Antônio de Pádua Nacif e José Luís dos Santos Rufino, pelo apoio recebido.

À pesquisadora Helena Maria Ramos Alves pela competência e seriedade durante o período de orientação e pelo auxílio e dedicação em minhas atividades de pesquisa.

À minha grande amiga, Tatiana Grossi C. Vieira, pela imensurável ajuda durante o período do curso.

Ao professor Hélcio Andrade pelos ensinamentos e por acreditar no meu potencial.

A professora e amiga, Marilusa Pinto Coelho Lacerda, pelo companheirismo e ensinamentos.

Agradecimento especial aos professores do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, Elpídio Inácio Fernandes Filho e Carlos Ernesto R. Schaeffer, pela colaboração nos trabalhos de planejamento e levantamentos de campo.

Ao Dr. Reginaldo Amaral pelo empenho dedicado quando do meu ingresso no mestrado.

Ao Dr. Adauto Ferreira, Chefe do Centro Tecnológico do Sul de Minas (EPAMIG/CTSM), pelo apoio e colaboração no decorrer do curso.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em nome dos pesquisadores José Simião, Corina, Lênio Galvão e, especialmente, a Flávio Ponzoni, pela atenção e presteza dedicados à minha pessoa e pela grande contribuição técnica ao meu trabalho de pesquisa.

Aos pesquisadores e funcionários da EPAMIG/CTSM, Geraldo Magela, Mário Lúcio e José Cardoso, pelo apoio no decorrer do curso.

Aos técnicos Nilson Bernardo dos Santos e Gilmar José Cereda e aos bolsistas Mathilde Bertoldo e Tiago Bernades pela valiosa colaboração nos trabalhos práticos realizados para a dissertação.

Aos estudantes Márcio e Leonardo, do Departamento de Solos da UFV, pelos nos trabalhos de aerolevantamento e campanha de campo.

Ao Professor Marcelo, do Departamento de Ciências Exatas da UFLA, pelo apoio nas análises estatísticas.

Ao Professor Geraldo César de Oliveira pelo auxílio na descrição de solos.

Aos pesquisadores Gabriel Bartholo e Paulo Gontijo pelo crédito e confiança.

Ao Parede, Awdrey e toda a família Vieira pela colaboração e amizade durante meu período de curso.

Aos pesquisadores da EPAMIG/BH, Tanaka, Paulo de Oliveira e Maria Lélia, pela ajuda e apoio.

Ao chefe da Assessoria de Informática, Mauro Lima Baino, pelo apoio incondicional.

Aos meus amigos da Assessoria de Informática, Assessoria de Planejamento e Coordenação; Assessoria de Marketing e demais departamentos da EPAMIG/BH pela torcida e apoio.

A Marlene Gomide e Rosely pela ajuda nas revisões e pela grande amizade.

Ao Rafael Elias e Renilda (meus pais e amigos).

À minha esposa Cleide e meus filhos, Ingrid e Rafael Lamounier, pelo amor e compreensão.

À Minha irmã Kaylan, Wenri e Stanley, Sra.Dora, Dayse, Luiz Carlos, Wellington, tios e a todos familiares pelo apoio e carinho.

Aos meus grandes amigos, Elka e Rubens Ribeiro. A Cláudio Roberto, Izabel Trannin, Julio Bertoni, Ricardo Resende, Wellington, Agostinho Liberato, Carlos Henrique e Carlos Ribeiro pelo apoio técnico e amizade.

A todos meus amigos da Universidade Federal de Lavras pela boa convivência e momentos de alegria.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT .....	iii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO .....	4
2.1 Caracterização de recursos naturais por meio do sensoriamento remoto .....	4
2.1.1 Sistemas aerofotográficos .....	4
2.1.2 Imagens Orbitais - Sistema Landsat Thematic Mapper .....	6
2.1.3 Resposta espectral dos alvos .....	9
2.1.3.1 Vegetação .....	9
2.1.3.2 Solos .....	10
2.1.4 Classificação e técnicas de transformação de imagens .....	14
2.1.4.1 Índices de Vegetação .....	16
2.1.4.2 Componentes Principais .....	19
2.1.5 Acurácia de mapeamento.....	19
2.2 Sistemas de informações geográficas na caracterização ambiental .....	24
2.3 O uso de sistemas de informações geográficas (sig) e sensoriamento remoto aplicados à cafeicultura .....	26
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	33
3.1 Caracterização da área de estudo .....	33
3.1.1 Referências geográficas e vias de acesso .....	33
3.1.2 Clima.....	33
3.1.3 Vegetação .....	34
3.1.4 Drenagem.....	35
3.1.5 Geomorfologia .....	35
3.1.6 Geologia.....	36
3.1.6.1 Geologia Local.....	36

3.1.6.2 Estruturação da área.....	37
3.1.7 Solos .....	38
3.2 Material.....	39
3.3 Métodos .....	40
3.3.1 Reconhecimento.....	42
3.3.2 Levantamento Aerofotográfico.....	42
3.3.3 Retificação geométrica e registro do mosaico e imagens .....	44
3.3.4 Transformação Radiométrica.....	45
3.3.5 Cartas topográficas, drenagem e altimetria.....	46
3.3.6 Fotointerpretação .....	47
3.3.7 Estatística .....	48
3.3.8 Amostras espectrais para vegetação e solo .....	49
3.3.9 Classificação .....	50
3.3.10 Acurácia da classificação.....	51
3.3.11 Modelo de solos .....	52
3.3.12 Cruzamento de informações espaciais .....	54
3.3.13 Análise de solos .....	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56
4.1 Imagem orbital, fotointerpretação e aerolevantamento.....	56
4.1.1 Imagem Orbital .....	56
4.1.2 Fotointerpretação .....	58
4.1.3 Aerolevantamento.....	62
4.2 Solos .....	63
4.2.1 Geomorfopedologia e Geopedologia .....	63
4.2.2 Caracterização e detalhamento de solos na microbacia .....	73
4.2.2.1 Caracterização Química .....	76
4.2.2.2 Caracterização Física .....	79
4.2.3 Reflectância espectral dos solos.....	84

4.3 Características espetrais da vegetação .....	93
4.3.1 Classificação supervisionada do uso e cobertura do solo .....	99
4.4 Correlação espacial de áreas cafeeiras com atributos do meio físico. ....	110
5 CONCLUSÕES .....	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	119
ANEXOS .....	129

## **RESUMO**

MACHADO, Marley Lamounier. **Caracterização de agroecossistemas cafeeiros da zona da mata de Minas Gerais usando sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas.** LAVRAS: UFLA, 2002. 137p. (Dissertação - Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)\*

A Zona da Mata é um potencial da cafeicultura do estado de Minas Gerais. Contudo, apesar de sua importância, não possui ainda uma caracterização de seus agroecossistemas cafeeiros, representados por áreas de cultivo bastante acidentadas, contíguas a remanescentes de matas nativas. Os Sistemas de Informações Geográficas e o Sensoriamento Remoto, apoiados por verdade de campo, constituem ferramentas poderosas para a caracterização de ambientes, principalmente no que se refere a solos e uso da terra, oferecendo riqueza de informações, agilidade e baixo custo de aquisição. No entanto, sua aplicação no mapeamento de áreas cafeira é limitada pela carência de metodologias que proporcionem uma melhor exatidão de resultados. Este trabalho teve como objetivo o mapeamento e a caracterização do meio físico de agroecossistemas cafeeiros da Zona da Mata mineira, usando fotografias aéreas e imagens de satélite e o geoprocessamento para processamento destes dados. Para tanto, selecionou-se uma área piloto representativa da cafeicultura da região. A partir de então, procedeu-se ao levantamento aerofotogramétrico não-convencional do local (escala 1:10.000) e à aquisição da imagem orbital do sistema ETM+/Landsat. Esta imagem foi registrada e transformada para dados de reflectância de superfície. Limites das classes de uso da terra foram interpretados sobre o mosaico digital e sobrepostos à imagem, possibilitando a amostragem de cada cultura para fins estatísticos e verificação do comportamento espectral da vegetação e do solo. A análise estatística mostrou que as bandas 3, 4, 5 e 7 foram as mais representativas para a discriminação das coberturas vegetais. Apesar de a análise estatística apresentar diferença significativa entre as bandas para os diferentes tipos de uso, as classificações apresentaram confusão devido à similaridade espectral das coberturas, principalmente entre café e mata, e ao efeito do sombreamento. A exatidão de mapeamento entre a imagem classificada e a fotointerpretação foi considerada

---

\* Comitê Orientador: Helena Maria Ramos Alves - EPAMIG (Orientador), Helcio Andrade - UFLA, Elpídio Inácio Fernandes Filho - UFV, Marilusa Pinto Coelho Lacerda - UNB, Tatiana Grossi Chquiloff Vieira - EPAMIG.

de regular a fraca, sendo os melhores resultados obtidos por combinação de bandas. Paralelamente, as curvas de nível e rede de drenagem foram digitalizadas a partir das cartas do IBGE e usadas pelo SIG para modelagem das classes de solo. Para checar a modelagem, escolheu-se uma microbacia que foi detalhada com o levantamento de superfícies de topo, várzea, terraços e de formas côncavas e convexas a partir da fotointerpretação, em escala próxima a 1/10.000. Perfis representativos das principais classes de solo foram descritos e amostrados para caracterização química e física e classificados segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Concluiu-se que o mapa de solos obtido por meio da modelagem apresentou informações bem representativas da realidade. As análises físicas, químicas, morfológicas e espectrais comprovaram o intenso grau de intemperismo, pobreza química e homogeneidade dos solos. O uso de imagens orbitais para mapeamento das áreas cafeeiras mostrou limitações, apesar dos poucos tipos de classe de uso. Tal fato resultou do sombreamento das imagens, em função topografia acidentada, e da fragmentação da maioria das lavouras de café em talhões de pequena extensão.

## **ABSTRACT**

MACHADO, Marley Lamounier. **Remote sensing and geographical information systems for coffee agroecosystems characterization in Zona da Mata, state of Minas Gerais, Brazil.** LAVRAS: UFLA, 2002. 137p. (Dissertation - Soils and Nutrition of Plants)\*

The region of Zona da Mata is an important coffee production area of the state of Minas Gerais in Brazil. However, despite its importance, it still lacks a characterisation of its coffee agroecosystems, represented by steep small fields, contiguous to remnants of native forest. Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing, supported by sound ground truth, constitute powerful tools for environmental characterisation, especially concerning soils and land use, offering detailed information with speed and at relative low costs. Nevertheless its use in the mapping of coffee plantations is limited by the lack of methodologies that provide accurate results. The objective of the present work was the mapping and characterisation of the physical environment of coffee agroecosystems of Zona da Mata, using aerial photographs and satellite images and a geographic information system (SPRING) for data management. In order to achieve this, a pilot area, representative of the coffee lands of the region, was chosen. A non conventional aerial photographic survey of the study area was carried out (scale 1:10.000) and the satellite image of the ETM+/Landsat system was acquired. This image was registered and transformed into data of surface reflectance. A digital mosaic was used for the photo interpretation of the limits of land use classes. These limits were overlayed onto the image, affording reflectance sampling of each land use type for statistical analysis and assessment of soil and vegetation spectral response. The statistical analysis showed that bands 3, 4, 5 and 7 were the most representative in the discrimination of vegetation canopies. Although the statistical analysis showed significant difference between the bands for the different land use types, the classifications presented considerable overlap, especially between coffee and forest, due to the spectral response similarity of the different vegetation canopies and to the effect of shading. The accuracy of mapping between the classified image and the photo interpretation was considered regular to weak, and the best results were obtained through combination of bands. Contour lines and drainage network were

---

\* Guidance Committee: Helena Maria Ramos Alves (Major Professor), Helcio Andrade - UFLA, Elpídio Inácio Fernandes Filho - UFV, Marilusa Pinto Coelho Lacerda - UNB, Tatiana Grossi Chquilloff Vieira - EPAMIG.

digitised from topographic maps from IBGE (1:50.000) and were used in the GIS to model soil geography. To check the model, a detailed soil survey (scale 1:10.000) was carried out in a watershed selected within the study area, which was segmented by photo interpretation into crests, flood planes, terraces, convex and concave slopes landforms. Representative soil profiles of the main soil classes were described and sampled for chemical and physical characterisation and classified according to the Brazilian System of Soil Classification. It was concluded that the soil map obtained through modelling presented information very close to the real landscape distribution. The physical, chemical, morphologic and spectral analysis confirmed the fertility poverty and homogeneity of the soils, already reported by other authors. The use of Landsat images in the mapping of coffee areas showed limitations, despite the few types of land use. This fact is due to the shading of the images, owing to the steep topography, and the fragmentation of most coffee crops into small fields.

## **1 INTRODUÇÃO**

A caracterização fisiográfica de uma região é a base para qualquer estudo ambiental. O planejamento para o uso sustentado dos recursos naturais requer, inicialmente, o levantamento e a organização/disponibilização de informações atualizadas sobre o ambiente. Conhecer o meio físico de uma região possibilita o entendimento das variações encontradas e sua extração para outros locais.

O conhecimento de um sistema complexo como um agroecossistema requer sua subdivisão em partes ou estratos mais homogêneos que, depois de caracterizados, são novamente integrados ao todo (Resende, 1983). Quinteiro (1997) sugere como essenciais para a caracterização de ambientes agrícolas o mapeamento do uso atual das terras, o mapeamento dos solos, com a caracterização das unidades de mapeamento e estudos de parâmetros morfológicos de bacias hidrográficas. O detalhamento da superfície do solo é uma atividade extensa e difícil de ser desenvolvida devido ao custo financeiro elevado, às necessidades de recursos humanos e infra-estrutura especializados e ao longo tempo normalmente requerido para sua realização. No Brasil, a maior parte dos mapas de solos, vegetação e uso da terra baseiam-se no projeto RADAM, realizado na década de 70, na escala de 1/1.000.000, muito pequena para o planejamento no nível da propriedade rural (Mausel et al., 1994).

Uma opção para o aumento da eficiência na coleta de dados primários sobre a superfície terrestre seria o uso de metodologias avançadas de sensoriamento remoto e análise de imagens orbitais, associadas a técnicas de modelagem. A distribuição das unidades de solos na paisagem apresenta padrões que se repetem e que estão relacionados, entre outros fatores, ao relevo e ao material de origem. Existe, portanto, a possibilidade do uso da automação

computacional para modelar estes padrões de forma a fornecer, a custos mais baixos, com rapidez e acurácia, mapas da distribuição geográfica dos solos na paisagem em nível de detalhe bem superior aos documentos existentes atualmente. Segundo Crosta (1999), o ser humano possui uma notável capacidade de reconhecer padrões, mas tem dificuldade em processar o enorme volume de informação contido em uma imagem digital. Esta dificuldade pode ser superada com o emprego de computadores e programas especializados.

Os sistemas computacionais de informações espaciais, tais como Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e Sistemas de Sensoriamento Remoto têm modificado as atividades de detalhamento do uso da terra do ponto de vista metodológico, tornando-as mais ágeis e precisas, ao combinar os avanços da cartografia automatizada e dos sistemas de manipulação de banco de dados com o desenvolvimento da análise geográfica. Os SIG's produzem um conjunto distinto de procedimentos analíticos que auxiliam no gerenciamento e na atualização constante das informações disponíveis, bem como na proposição de soluções para o uso sustentado da terra (Burrough, 1986). Por outro lado, o sensoriamento remoto possibilita a visualização do uso atual da terra e com base em informações disponibilizadas pelos SIG's, oriundas da estratificação e/ou cruzamentos de temas de informação, pode também auxiliar os planejadores (Franco, 2000).

As imagens orbitais trazem informações que caracterizam o extrato vegetativo com base em seus níveis de reflectância. Uma das vantagens para o uso de imagens orbitais para caracterização e mapeamento de agroecossistemas é a sua grande abrangência em termos de cobertura e seu relativo baixo custo. Uma das limitações seria a baixa resolução das imagens, havendo, assim, a necessidade do emprego de técnicas de classificação para melhorar esta caracterização. Uma alternativa para a classificação do uso da terra sobre imagens de satélite seria o uso associado da fotografia aérea, empregada como

verdade de campo, devido à sua maior escala e riqueza de detalhes. O uso combinado de imagem de satélite e de fotografia aérea não-convencional, devidamente suportadas por verdade de campo, pode facilitar os trabalhos de levantamento e aumentar a precisão e exatidão do mapeamento da superfície do solo (Basher, 1997).

As lavouras cafeeiras da região da zona da mata mineira são um expoente na cafeicultura do Estado. Contudo, como são geralmente cultivadas em áreas bastante acidentadas, contíguas a remanescentes de matas nativas, o uso do mapeamento digital por imagens de satélites para sua caracterização é dificultado, devido à semelhança da resposta espectral destas duas coberturas vegetais. O objetivo deste trabalho é estabelecer uma metodologia para individualizar e quantificar áreas cafeeiras da Zona da Mata por meio do sensoriamento remoto, usando imagens de satélite em associação com fotografias aéreas digitais não-convencionais. Pretende-se, também, caracterizar o meio físico ocupado pela cafeicultura na região, estabelecendo-se relações entre as áreas cafeeiras e condicionantes do meio físico, tais como solo e relevo.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 CARACTERIZAÇÃO DE RECURSOS NATURAIS POR MEIO DO SENSORIAMENTO REMOTO**

Sensoriamento Remoto é a utilização de sensores para a aquisição de informações sobre objetos ou fenômenos sem que haja contato direto entre eles. Os sensores seriam os equipamentos capazes de coletar energia proveniente do objeto, convertê-la em sinal passível de ser registrado e apresentá-lo em forma adequada à extração de informações (Novo, 1995).

#### **2.1.1 Sistemas aerofotográficos**

A partir da necessidade de maior detalhamento para descrever o uso da terra, houve, paralelamente, a preocupação relacionada à precisão e a fidelidade na produção de mapas. O desenvolvimento de instrumentos de precisão para mapeamento, de novas técnicas de cartografia e a possibilidade de estudar a terra remotamente foram responsáveis por grandes avanços na análise e representação da heterogeneidade da paisagem. Com o início da utilização de equipamentos fotográficos aerotransportados, surgiu uma nova fase nos processos de mapeamento da cobertura terrestre, com a aquisição periódica de dados (Coutinho, 1997).

Atualmente, existem sistemas de levantamento aerotransportado que trabalham com muita estabilidade, de forma a propiciar o mínimo de influência de oscilação do avião, fornecendo um mapeamento rápido e preciso. Contudo, este tipo de levantamento tem um custo elevado, o que pode, por muitas vezes, inviabilizar o processo. Neste caso, o emprego de sistemas aerotransportados que empregam equipamentos fotogramétricos mais modestos pode fornecer um levantamento a baixo custo e com mesma riqueza de detalhes dos sistemas

tradicionais. Estes sistemas são denominados levantamentos aéreos não-convencionais.

Uma alternativa proposta por Bartholomé (1991) é o uso de fotografias de pequeno formato, usando ultraleve equipado com câmara de 70 mm. A precisão de mapeamento com fotomosaicos, construídos a partir de fotos áreas de 70 mm, não alcança os padrões fotogramétricos de um sistema aerofotogramétrico tradicional, mas é suficiente para superfícies agrícolas.

Disperati (1993) descreveu um levantamento aerofotogramétrico não-convencional por meio de ultraleve no município de Tijucas do Sul-PR. Dentro da linha de vôo, as fotografias foram tiradas em intervalos de tempo pré-determinados, com a câmara colocada fora do ultraleve e em posição abaixo do assento. A fotointerpretação foi feita de forma visual e direta, apoiada em um intenso trabalho de campo, com o intuito de eliminar as dúvidas de interpretação. O sistema permitiu uma ampliação de escala de 1:8000 para 1:2000, o que resultou em informações bastante detalhadas sobre os alvos. O autor observou, ainda, que é perfeitamente possível obter fotos aéreas estereoscópicas com adequados valores de recobrimento lateral, desde que o fotógrafo e piloto estejam treinados para a tarefa. Para o autor, os resultados foram excelentes, visto que a câmara era mantida manualmente. Este trabalho mostrou que é possível a substituição do sistema convencional por um sistema que opera com um custo menor, sem comprometer as exigências mínimas para se ter um aerolevantamento com estereoscopia.

Através de fotografias não convencionais na escala 1:5000, Fernandes (1996) avaliou o uso atual das terras e a qualidade das águas de superfície. As aerofotos foram obtidas com o auxílio de uma aeronave (CESSNA 182-Skylane) dotada de câmaras fotográficas de qualidade profissional. O planejamento do vôo levou em consideração os critérios adotados para um aerolevantamento convencional, tais como: recobrimento longitudinal de 60%, recobrimento

lateral de 30%, altura efetiva de vôo, escala desejada e possíveis correções de linhas de vôo. Segundo o autor, as fotos apresentaram excelente nitidez e efeito estereoscópico e foram de grande valia na identificação dos padrões de uso atual e mapeamento semidetalhado destas unidades.

### **2.1.2 Imagens Orbitais - Sistema Landsat Thematic Mapper**

A criação das câmaras multiespectrais, acopladas a plataformas orbitais, possibilitou a aquisição de dados sincrônicos, diacrônicos e sistemáticos da superfície terrestre. Problemas como elevados custos na aquisição de fotografias, ausência de séries temporais de grandes extensões da superfície terrestre, distorções causadas pelas objetivas utilizadas e problemas na estruturação dos mosaicos foram minimizados após o surgimento dos satélites (Coutinho, 1997).

O sistema Landsat Thematic Mapper (TM) é um sistema orbital para sensoriamento remoto que foi desenvolvido a partir das primeiras fotografias orbitais. Estas fotografias demonstraram a viabilidade do uso de plataformas espaciais como base para a coleta de dados sobre recursos da superfície terrestre (Novo, 1995). O objetivo principal deste sistema é registrar a radiação refletida e/ou emitida pelos alvos da superfície terrestre e produzir imagens instantâneas do terreno de forma a permitir a visualização de feições terrestres, constantemente atualizadas, em grandes áreas e a baixo custo. É composto por sete faixas espectrais, chamadas de bandas. Cada banda compreende um intervalo de comprimento de onda do espectro eletromagnético correspondente às faixas do azul, verde, vermelho, infravermelho próximo, médio e termal. A resolução do *pixel* na imagem é igual a 30x 30m no terreno, exceto na banda 6 (60m). Existe ainda, no último Landsat lançado, o de versão 7, uma banda pancromática com resolução de 15m. Segundo SERE et al. (1998), as bandas TM são aplicadas a:

Banda 1 (450-520nm; Azul): Esta banda apresenta grande penetração em corpos d'água, sendo particularmente interessante para estudos batimétricos. Permite detalhar a turbidez da água e o traçado de correntes em corpos de águas costeiras. Apresenta sensibilidade a plumas de fumaça oriundas de queimaduras ou atividade industrial.

Banda 2 (520-600nm; Verde): Esta banda apresenta grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão na água, sendo utilizada para estudos de qualidade da água. Tem boa penetração em corpos d'água. Boa para mapeamento de vegetação e áreas onde ocorrem atividades antrópicas.

Banda 3 (630-690nm; Vermelho): Sensibilidade para vegetação verde, densa e uniforme. Apresenta grande absorção, ficando escura, permitindo bom contraste entre as áreas ocupadas com vegetação e aquelas sem vegetação (solo exposto, estradas e áreas urbanas). Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (campo, cerrado e floresta). Permite o mapeamento da drenagem, através da visualização da mata galeria e entalhe dos cursos dos rios em regiões com pouca cobertura vegetal.

Banda 4 (760-900nm; Infravermelho Próximo): Sensível à radiação eletromagnética refletida pela vegetação verde. Apresenta bom contraste entre solo e corpos d'água, permitindo o mapeamento de rios de grande porte, lagos , lagoas, reservatórios e áreas úmidas, morfologia do terreno, vegetação que foi queimada, geologia e geomorfologia e macrófitas aquáticas (por exemplo, aguapé). Banda muito sensível à absorção da radiação eletromagnética pelos óxidos de ferro e titânio, muito comuns nos solos tropicais, muito intemperizados.

Banda 5 (1550-1750nm; Infravermelho Médio): Esta banda permite observar o teor de umidade nas plantas e detectar possíveis estresses na vegetação causados por falta de água. Utilizada também para obter informações

sobre a umidade do solo, podendo, no entanto, sofrer perturbações se ocorrerem chuvas um pouco antes da cena ser imageada pelo satélite.

Banda 6 (10400-12500nm; Infravermelho Termal): Esta banda pode ser utilizada para mapeamento de estresse térmico em plantas, estudos de propriedade termal dos solos, mapeamento da temperatura de superfície de águas oceânicas superficiais, informações importantes para pesca e clima.

Banda 7 (2080-2350nm; Infravermelho Médio): Esta banda apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, servindo para estudos nas áreas de geologia, solos e geomorfologia. Utilizada também para identificação de minerais e detecção de umidade no solo e na vegetação.

A imagem orbital é composta por estas bandas de forma independente, sendo que os sistemas computacionais que as operam permitem trabalhar com três delas, simultaneamente. Cada uma destas três bandas pode ser associada a uma cor primária (vermelho, verde ou azul), de forma a propiciar uma composição colorida, que permite mapear e/ou monitorar determinada área com uma riqueza maior de detalhes, explorando-se as bandas mais representativas para o alvo desejado.

Convencionalmente, os mapas digitais de limites naturais são normalmente obtidos por digitalização manual de documentos analógicos já existentes. Contudo, o processo de digitalização é extremamente moroso e, normalmente, os mapas ou fotos originais estão desatualizados. Além disso, limites naturais estão sujeitos a alterações, obrigando a mudança dos mapas já digitalizados. Através de imagens de sensoriamento remoto, pode-se obter, rapidamente, informações de superfícies da terra que podem ser usadas na produção de mapas digitais, ainda que a localização de limites naturais a partir de imagens de satélite seja um serviço laboratorial especializado (Ji, 1996).

### **2.1.3 Resposta espectral dos alvos**

#### **2.1.3.1 Vegetação**

A vegetação fotossinteticamente ativa mostra um padrão de reflectância espectral distinto na região do visível e no infravermelho próximo, quando comparados com outros materiais da superfície da Terra, como o solo, água, etc. Sabe-se que a reflectância da vegetação é baixa no visível e alta no infravermelho próximo. Este padrão espectral da vegetação verde resulta da forte absorção da luz visível pela clorofila e outros pigmentos da planta e do espalhamento determinado pelas propriedades estruturais das folhas, que resulta na absorção mínima, alta transmitância e alta reflectância da luz no infravermelho próximo (Shimabukuro et. al., 1991).

Analisando a interação espectral dos alvos por meio de imagens do Landsat TM, Mausel et al. (1993) observaram que a vegetação de verde denso com alto conteúdo de clorofila e umidade na planta é diferenciada a partir de combinações de bandas por meio da diferença entre o verde e o vermelho e pela relação verde sobre vermelho.

Os parâmetros ópticos mais convenientes para interpretação são brilho e força de reflexão. No meio de grande diversidade de espécies, formas, tamanhos e estruturas da comunidade de plantas, o espectro de reflexão reúne informações em comum, que são os fitopigmentos idênticos contidos nele. A forte absorção de luz pela clorofila (total) dá-se no azul (380-500 nm) e no vermelho (620-710 nm). Foi notado que 95% dos desvios nos valores de coeficientes espetrais de brilho (SCB) da cobertura de vegetação, na faixa do visível, são devidos a mudanças no conteúdo de clorofila (Shevyrrnogov & Sidko, 1995).

Tsilibirides (1998) usou imagens de satélite TM Landsat na identificação de cultivos sazonais na região de Hellas, Grécia. Para a região em questão, as datas mais proveitosa para identificação de plantios de cereais foram entre maio e junho, enquanto, para plantios de verão, irrigados ou não, o melhor período foi

entre julho e agosto, quando houve o pico da atividade de clorofila e a resposta espectral foi alta no infravermelho próximo. As datas de melhor discriminação entre plantio de verão e inverno ocorreram no começo de julho. Somente as bandas 2 (520-600nm), 4 (760-900nm) e 5 (1550-1750nm) foram necessárias naquele período. A banda 2 teve boa resposta de reflectância pela presença de clorofila e corresponde ao verde refletido da vegetação, já que o vermelho e o azul são mais intensamente absorvidos. A banda 4 teve muito boa resposta na biomassa existente e ajudou na identificação de cultivos. A banda 5 foi sensitiva à quantidade de água contida nas plantas ou na cultura.

### **2.1.3.2 Solos**

A reflectância espectral dos solos pode ser usada como um critério importante na sua identificação devido a sua sensibilidade às diferentes texturas, quantidade de matéria orgânica e composição mineralógica.

A curva espectral dos solos quase sempre exibe as mesmas feições (Figura 1). Ela aumenta a partir de 400, até 2000 nm, e então decresce no infravermelho médio com a mesma profundidade, por volta de 1450 e 1900nm. Esta absorção é devida, particularmente, aos íons metálicos, matéria orgânica ou pigmentos escurecidos. O espalhamento da reflectância no solo é determinado pelo tamanho do grão relativo ao comprimento de onda e também pela rugosidade macroscópia, que controla os efeitos de luz e sombra (Baret, 1991).

### Reflectância

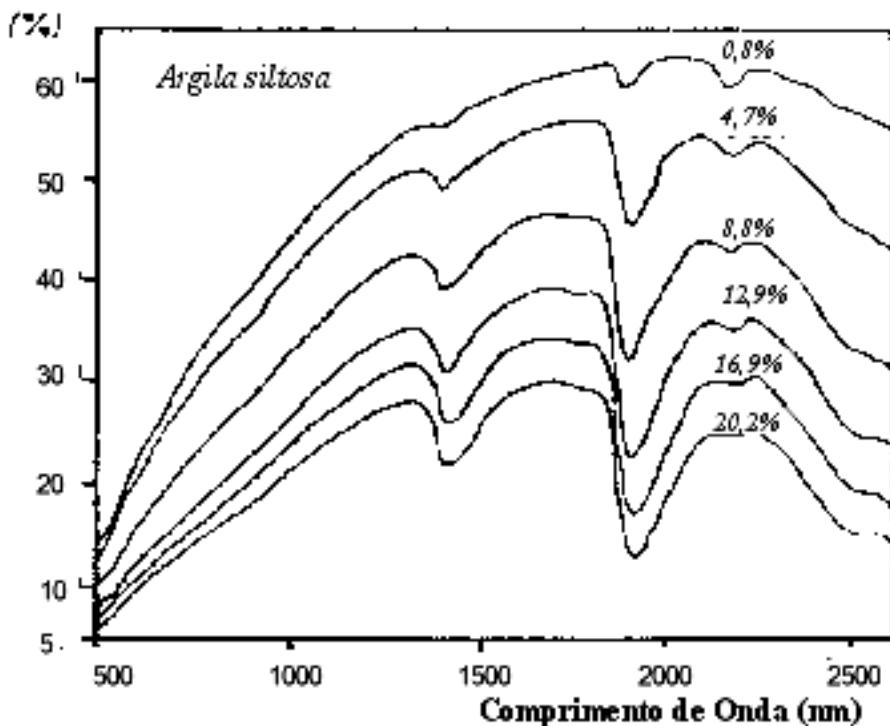


FIGURA 1 - Espectro de um solo tropical em função da umidade. FONTE: Bowers and Hanks, 1965; citados por Baret, 1991.

Ephifanio et al. (1992), estudando o comportamento espectral dos solos, fizeram as seguintes observações: há indícios de um relacionamento inverso entre reflectância e teor de argila; porém, tal relação nem sempre se aplica, visto que foram encontrados solos com teores de argila em torno de 80% e o comportamento da curva espectral não foi o esperado. Isso denota que a reflectância do solo não representa a expressão de nenhuma característica do solo isoladamente. A reflectância, assim como outras propriedades importantes do solo, é influenciada não somente pela composição química dos constituintes do solo, como também pelo tamanho e arranjo das partículas em relação ao ar e água do solo, ou seja, a textura e a estrutura do solo. O Latossolo Roxo, bem

como outros que têm dominância de ferro e minerais opacos, apresenta reflectâncias baixas, com quase ausência de feições de absorção. Alguns solos, como o Podzólico Vermelho-Amarelo, apresentam comportamento variável. A matéria orgânica mostrou-se um constituinte do solo que tende a mascarar feições espectrais, principalmente no visível e infravermelho-próximo. A umidade mostrou ser um importante fator da reflectância dos solos, particularmente sobre os de menor albedo. Os autores observaram que quando aumenta o teor de óxidos de ferro, há uma depressão ou concavidade na curva de reflectância na região próxima a 450 nm. É que, em 435 nm e em 480 nm, a goetita exerce forte absorção; e em 445nm e em 530 nm a hematita também exerce forte absorção. Em 650 nm, há absorção de ambos os materiais. Em 917 nm e 885 nm encontram-se também pontos de absorção de goetita e hematita, respectivamente.

O tamanho das partículas influí na reflectância (Bowers & Hanks, 1965; citados por Baret, 1991). Teoricamente, quanto mais argiloso for o solo, maior será a quantidade de água retida e, consequentemente, menor a curva de reflectância. Entretanto, é necessário ponderar, já que solos argilosos oxídicos retêm menos umidade do que solos também argilosos de mineralogia 2:1.

A maioria dos solos parece mais escura quando está úmida do que quando esta seca. Isso resulta de um decréscimo na reflectância da radiação incidente na região do visível do espectro eletromagnético. A forma das curvas de reflectância é afetada pela presença de bandas com forte absorção para água em 1450 e 1950 nm e, ocasionalmente, com bandas com fraca absorção em 970; 1200 e 1770 nm. No entanto, o aumento no teor de umidade não causa alterações significativas na forma das curvas, principalmente na região do visível e do infravermelho (Epiphanio et al., 1992). Demattê (1999), estudando espectralmente a mineralogia da fração argila dos solos Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho-Escuro, Podzólico Vermelho-Escuro, Podzólico Vermelho-

Amarelo e Areia Quatzosa, verificou que a caulinita apresentou feições de absorção em 1400 nm, muito fraca em 1900 nm e uma forte feição em 2200 nm, caracterizada pela forte influência dos íons OH<sup>-</sup> da estrutura deste mineral. Como na caulinita, as feições espectrais presentes nos espectros ópticos da gibbsita são devidas às vibrações dos OH<sup>-</sup> da estrutura deste mineral com feições de absorção na faixa de 1550 e 2300 nm. De acordo com as curvas espectrais obtidas dos minerais 2:1, o autor encontrou feições fracas ou muito fracas em 1400 e 1900 nm. Por outro lado, a fraca absorção em 1400 e 1900 e as mais evidentes em 2200 nm indicam a presença de caulinita. Pode-se notar a influência do teor de ferro e da matéria orgânica na intensidade de absorção em 2200 nm. À medida que se muda dos solos argilosos (com maior teor de matéria orgânica e óxido de ferro) para os mais arenosos, a intensidade de absorção em 2200 nm passa de fraca para moderada, culminando com intensa na AQ. Em 1400 nm, a maioria das intensidades continua sendo fraca, indicando, mais uma vez, a pouca quantidade de minerais 2:1. Solos contendo um alto percentual de matéria orgânica têm baixos teores de reflectância e aparecem com cores escuras, normalmente brunas escuras ou negras. Solos com pouca ou nenhuma matéria orgânica tendem a refletir mais luz e são freqüentemente bruno claros ou cinza (Belward, 1991). Demattê (1999), estudando a reflectância dos solos, observou que a remoção da matéria orgânica permitiu que outras propriedades se manifestassem e, com a presença de quartzo, a reflectância foi aumentada. A matéria orgânica mascarou os efeitos do ferro na reflectância. Com a presença de ferro total e a remoção de matéria orgânica, houve um decréscimo acentuado na reflectância dos solos mais argilosos para os mais arenosos.

Procurando uma distinção entre áreas de plantio com citros e solos expostos, Caseles et al. (1985) observaram respostas espectrais similares nas faixas do azul, verde e vermelho. No infravermelho próximo, as áreas de citros apresentaram valores de reflectância superiores ao solo descoberto. Na faixa do

infravermelho médio, houve diferença significativa entre os temas, com valores de reflectância dos citros menores que os do solo. Usando as bandas TM 3, 4 e 5, Rocha (1992) conseguiu separar duas classes de solo exposto com boa precisão. Uma delas foi caracterizada por solo exposto com resíduos de corte de cana de açúcar ou cultivado com cana nos primeiros estágios de crescimento. A segunda classe de solo exposto tratava-se de solo preparado para plantio de culturas de verão. Gausman et al. (1975) não observaram diferença entre resíduos de culturas e solos em nenhuma faixa espectral, porém concluíram que a melhor faixa de separação ocorreu na região do verde (520-600 nm). Notaram que resíduos de cana-de-açúcar deixados sobre o solo tinham maior reflectância que solos expostos, enquanto, para os resíduos de cana deixados em pé, a reflectância foi menor.

Mausel et al (1994) discutiram a dificuldade de analisar solos por sensoriamento remoto quando estes apresentam-se encobertos por vegetação. Em regiões como a Amazônia, por exemplo, é extremamente pequeno o tempo de observação sobre áreas de solo exposto, dada a velocidade de reocupação da vegetação. A mesma dificuldade é também sentida em campos queimados. Em seu trabalho, os autores usaram imagem TM para o ano de 1985, visto que este foi o de menor precipitação até então, favorecendo a exposição de solo em torno de 20%.

#### **2.1.4 Classificação e técnicas de transformação de imagens**

Um dos principais objetivos do sensoriamento remoto é o de distinguir e identificar as composições de diferentes materiais superficiais, sejam eles tipos de vegetação, padrões de uso do solo, rochas e outros. Essa distinção e identificação torna-se possível devido ao fato de os materiais superficiais terem comportamentos específicos ao longo do espectro eletromagnético, que podem, portanto, ser usados para identificá-los (Crosta, 1999).

Classificações no formato digital podem ser supervisionadas e não supervisionadas. A análise dos *pixels* pode ser feita com base no *pixel* apenas ou no *pixel* e seus vizinhos. Geralmente a classificação *pixel a pixel* é denominada supervisionada e baseia-se numa amostragem que é utilizada no treinamento do classificador. Este treinamento é subjetivo porque é feito segundo um critério estabelecido pelo analista e pode não conter todas as variações possíveis dos atributos espectrais de uma determinada classe de ocupação do solo. Nestas condições, Moreira & Marcelhas e Souza (2001) adotaram preliminarmente o processo de segmentação de imagem para tentar solucionar o problema de subjetividade na aquisição da amostra de treinamento. Neste processo, a imagem é dividida em regiões espectralmente homogêneas, que podem ser usadas para treinamento do classificador.

Ji (1996) usou uma transformação de imagem chamada “dyadic wavelet”. Trata-se de um mecanismo bastante útil na detecção de limites e pode ser facilmente implementado. O autor usou esta transformação para extrair limites de campo diretamente de imagens TM. Um limite de campo é um grupo de *pixels* conectados localmente, caracterizados por sua abrupta variação de intensidade espectral na imagem. Preliminarmente, a extração foi feita na banda do infravermelho próximo (760 – 900 nm). Ele concluiu que a maioria dos limites foi bem caracterizada para campos inteiramente vegetados, enquanto em campos com cultivo agrícola foram obtidos melhores resultados a partir do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

Os estudos de Lelong et al. (1998) mostraram a capacidade de modelagem de mistura espectral linear, combinada com análises de componentes principais, para acessar importantes informações agronômicas na cena natural em imagens hiperspectrais MIVIS (Espectrômetro de Imageamento no Visível e Infravermelho Multiespectral), na faixa do visível e infravermelho próximo. Esta análise conduz à decomposição do espectro detectado em diferentes

constituintes e nos permite o descarte de solo e sombra a partir do espectro de vegetação.

Mausel et al. (1993), em estudos direcionados à Amazônia brasileira, observaram feições em coberturas da terra em uma área de 3000 Km<sup>2</sup> ao longo da rodovia Transamazônica, usando imagens TM LandSat em três datas diferentes para os anos de 1985, 1988 e 1991. Estas datas foram completadas por observações de campo e entrevistas com usuários da terra. Resultados da pesquisa indicaram que dados TM multitemporais podem ser usados com sucesso para identificar classes de cobertura da terra e suas taxas de alteração. Classificações de precisão das feições de interesse variaram entre 81 e 98%.

#### **2.1.4.1 Índices de Vegetação**

Índices de vegetação foram desenvolvidos para detectar a vegetação verde. Shevyrrnogov e Sidko (1995) demonstraram que as identificações de certos tipos de culturas com base em classificação por índices de vegetação tiveram 84% de precisão. Os Índices de vegetação são, geralmente, baseados no contraste entre a reflectância das bandas do vermelho e infravermelho-próximo, o qual é característico da absorção de clorofila. O desaparecimento da clorofila em resíduos de plantio e vegetação envelhecida reduz a diferença de reflectância entre o vermelho e o infravermelho-próximo (Biard e Baret, 1997).

Quatro índices de vegetação foram usados por Cyr et al.(1995): NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), PVI (Índice de Vegetação Perpendicular), TSAVI (Índice de Vegetação Ajustado Transformado para Solo) e SAVI (Índice de Vegetação Ajustado para Solo). Os índices de vegetação foram usados para cada plantio, em cada local visitado, em intervalos de 10 dias. Os cálculos foram repetidos usando estatísticas de reflectância a partir de classificação supervisionada de imagens SPOT. Segundo os autores, quando a cobertura de vegetação excede 50%, os índices TSAVI e NDVI são mais

indicados. O NDVI é levemente menos sensitivo à aparição de senescência do que TSAVI.

O NDVI expressa a diferença entre reflectâncias nas bandas do vermelho e infravermelho-próximo.

$$\text{NDVI} = \frac{R_{nir} - R_r}{R_{nir} + R_r}, \quad (2.1)$$

onde  $R_{nir}$  é a reflectância na banda do infravermelho e  $R_r$  é a reflectância na banda do vermelho.

O PVI, segundo Richardson & Wiegand (1977), indica a reflectância da cobertura de vegetação em relação à reflectância do solo. É definido por :

$$\text{PVI} = \left[ (RS_r - R_r)^2 + (RS_{nir} - R_{nir})^2 \right]^{0.5}, \quad (2.2)$$

onde RS é a reflectância do solo em segundo plano (vermelho ou infravermelho-próximo) e R é a reflectância da vegetação nas bandas vermelho ou infravermelho-próximo.  $\text{PVI} < 0$  indica água,  $\text{PVI} = 0$  indica solo exposto e  $\text{PVI} > 0$  indica vegetação.

O SAVI é um ajuste entre NDVI e PVI, sendo definido como:

$$\text{SAVI} = \left[ \frac{(R_{nir} - R_r)}{(R_{nir} + R_r + L)} \right] \cdot (1 + L), \quad (2.3)$$

onde, a constante L é introduzida para minimizar a influência do brilho do solo. Se  $L=0$ , SAVI pode ser igual ao NDVI; se L tende ao infinito, SAVI se aproxima de PVI.

O TSAVI foi definido como uma medida de ângulo entre a linha de solo (correlação de reflectâncias de solo exposto entre as bandas do vermelho e

infravermelho) e a linha que junta o ponto de vegetação e a ordenada de origem da linha de solo exposto. É definido como:

$$\text{TSAVI} = a \frac{(R_{nir} - aR_r - b)}{(R_r + aR_{nir} - ab)}, \quad (2.4)$$

onde a e b são coeficientes definidos pela linha de solo exposto. Assim,  $\text{TSAVI} = 0$  caracteriza solos expostos, e  $\text{TSAVI}$  próximo a 1, coberturas de alta densidade.

Moreira & Nitzche (1991), analisando índices de vegetação para as culturas de soja e milho, observaram que a soja apresentou maiores valores em relação ao milho devido à maior cobertura do solo que esta cultura proporciona. Tal fato acarretou uma maior reflectância da energia no comprimento de onda do infravermelho próximo como consequência das múltiplas reflexões das camadas de folha e uma menor reflexão no comprimento de onda do visível (vermelho no caso), inerente à maior presença de clorofila, responsável pela absorção desta energia.

Usando classificação supervisionada multitemporal em imagem transformada por NDVI para três datas diferentes, Ippoliti-Ramilo (1999) encontrou confusões em termos de discriminação de categorias de uso/cobertura. As informações contidas nas faixas do vermelho e infravermelho próximo do espectro eletromagnético apresentaram alta sensibilidade à quantidade de biomassa verde, mas não entre os diferentes tipos de coberturas, o que provocou uma confusão espectral para alguns segmentos da imagem. Usou-se, então, a classificação supervisionada unitemporal em uma data específica para estas áreas de confusão, gerando um mapa com as culturas de interesse discriminadas. Através do recurso de álgebra espacial disponibilizado pelo software, esta classificação paralela feita sobre a imagem unitemporal foi unida ao mapa

gerado pela classificação supervisionada NDVI, completando, assim, a classificação supervisionada sobre toda a área, de forma mais exata.

Sader et al. (1989) usaram imagens TM e aplicaram o índice de vegetação de diferenças normalizadas (NDVI) para visualizar a diferença total na biomassa e classes de idade na floresta de Luquillo, Porto Rico. A área é caracterizada por terreno montanhoso, onde a imagem foi adquirida sob baixa elevação solar, ocorrendo sombras em declives abruptos ao norte e rampas na face oeste, com consequente redução espectral dos valores de reflectância. Os autores concluíram que NDVI para imagens TM pode ser apropriado para florestas tropicais de relevo menos acidentado, mas deve ser usado com cuidado em regiões montanhosas.

#### **2.1.4.2 Componentes Principais**

A transformação por componentes principais pode ser resumida da seguinte forma: dadas N imagens brutas (sem qualquer outro tipo de processamento), são analisadas as correlações entre elas e produzido um novo conjunto de N novas imagens, com nenhuma correlação entre si. De modo geral, esse novo conjunto de imagens terá as seguintes características: a primeira delas, chamada de 1<sup>a</sup> principal componente, ou PC1, irá conter a informação que é comum a todas as N bandas originais; a 2<sup>a</sup> PC irá conter a feição espectral mais significativa do conjunto e assim, sucessivamente, as PCs de ordem mais alta irão conter feições espetrais cada vez menos significantes, até a última PC, que concentrará, então, a informação que sobrar (Crosta, 1999).

#### **2.1.5 Acurácia de mapeamento**

Precisão não pode ser confundida com acurácia. Acurácia é um conceito estatístico que expressa estados de semelhança ou probabilidade que um grupo particular de medidas têm com uma certa faixa de valores verdadeiros. Medidas

típicas de precisão incluem a raiz do erro quadrático médio (desvio padrão) e erro padrão das médias estimadas para a amostragem. Acurácia de classificação (do uso da terra por exemplo) pode ser expressa como a probabilidade de uma certa classe estar correta (Weir, 1991). Acurácia ou exatidão é uma medida de quanto próximo os valores estimados estão dos verdadeiros.

As classificações automatizadas, processadas através da contagem de *pixels*, constituem uma metodologia para a estimativa de áreas, na qual se calcula a superfície de cada uma das categorias discriminadas pelo classificador. Este método pode apresentar restrições devido à similaridade das respostas espectrais entre as diferentes classes. Nestes casos, matrizes de erro (também denominadas de confusão ou de contingência) são calculadas a partir da comparação dos dados de campo com os dados resultantes da classificação. Uma matriz de erro é um conjunto de números colocados na forma de matriz, em que as linhas normalmente correspondem aos dados de referência (verdade terrestre), e as colunas, aos resultados da identificação ou classificação. A diagonal principal indica os pontos concordantes entre verdade terrestre e os resultados da classificação (Story & Congalton, 1986).

O procedimento que vem sendo mais usado para medir a exatidão das classificações a partir da matriz de erro é o índice Kappa (Gong & Howart, 1990; Congalton & Mead, 1983). Ele vem sendo recomendado como uma medida apropriada de exatidão por representar inteiramente a matriz de confusão. O índice usa todos os elementos da matriz de confusão em vez de apenas aqueles que se situam na diagonal da mesma, como é o caso do cálculo da exatidão global (Gong & Howart, 1990).

Campbell (1987) propõe o índice Kappa da seguinte forma:

$$\hat{K} = \frac{(observado - esperado)}{(1 - esperado)} , \quad (2.5)$$

onde o valor observado é a exatidão geral (Índice Global) da classificação, dado por:

$$observado = \frac{\sum_{i=1}^M n_{ii}}{N}, \quad (2.6)$$

N é o numero total de *pixels* classificados, M o número de classes e n<sub>ii</sub> os *pixels* classificados corretamente para cada classe, ou seja, a soma dos valores da diagonal dividida pela soma total dos *pixels* classificados.

O valor esperado é calculado com base nos totais de cada linha e coluna na matriz, designados marginais. É dado pela lei de probabilidades, isto é, a chance de um conjunto de *pixels* estar em uma mesma categoria em ambos os conjuntos de dados é o produto das probabilidades isoladas de estarem, nesta categoria, em cada um dos conjuntos de dados:

$$p(A + B) = (p(A)).(p(B)). \quad (2.7)$$

É mostrada, em seguida, um exemplo prático para o uso de Kappa:

TABELA 1 - Matriz de erros hipotética para exemplificar o uso do índice Kappa

		Interpretações			
		Mata	Café	Reflorest.	Total
Realidade	Mata	230	102	50	<b>382</b>
	Café	90	300	40	<b>430</b>
	Reflorest.	50	40	100	<b>190</b>
	<b>Total</b>	<b>370</b>	<b>442</b>	<b>190</b>	<b>1002</b>

Na Tabela 1, os valores na linha representam a verdade de campo (realidade), e as colunas, a interpretação feita pelo interpretador. A diagonal destacada corresponde aos *pixels* corretamente interpretados. Assim, o número total de *pixels* é de 1002. A quantidade de *pixels* interpretada corretamente (diagonal) é de  $230+300+100=630$ . Aplicando a equação 2.6, tem-se o índice Global ou “observados corretos”.

$$observados = \frac{630}{1002} = 0,6287$$

De acordo com a equação 2.7, tem-se o cálculo dos valores esperados:

TABELA 2 - Cálculo dos "valores esperados corretos" usados no índice Kappa.

$382 \times 370 = 141340$	$382 \times 442 = 168844$	$382 \times 190 = 72580$
$430 \times 370 = 159100$	$430 \times 442 = 190060$	$430 \times 190 = 81700$
$190 \times 370 = 70300$	$190 \times 442 = 83980$	$190 \times 190 = 36100$

Assim como para o cálculo do Índice Global (equação 2.6), tomam-se os valores da diagonal, que são divididos pela soma total:

$$corretos = \frac{367500}{1004004} = 0,3660,$$

portanto,

$$\hat{K} = \frac{(0,6287 - 0,3660)}{(1 - 0,3660)} = 0,4143.$$

Foody (1992) diz que o índice Kappa pode ser superestimado pelo fato de incluir, além da concordância por chance, a concordância real. Portanto, o índice Kappa não estaria refletindo a concordância presente na classificação, descontada a concordância somente na casualidade. Ma e Redmond (1995), concordando com Foody (1992), sugerem o índice Tau ( $T_e$ , equação 2.8).

$$T_e = \frac{\frac{P_o - 1}{M}}{1 - \frac{1}{M}}, \quad (2.8)$$

onde M é número de classes e  $P_o$  o valor observado (equação 2.6).

Ao comparar os índices Kappa e Tau, os autores dizem que a concordância por chance ( $P_o$ ), usada para calcular Tau é uma medida direta do assinalamento casual e por isso fornece uma clara indicação de como a classificação se comporta quando comparada com a atribuição casual dos *pixels* às categorias ou classes. Brites (1996) testou o comportamento dos índices estatísticos Tau, Global e Kappa no sentido de verificar qual deles seria mais adequado para a utilização em classificações de regiões densamente vegetadas. Concluiu que o comportamento do índice Global, sempre acima dos índices Tau e Kappa, comprova o efeito de o mesmo não tomar em consideração os erros de omissão e comissão, superestimando a avaliação da exatidão. A tendência de Kappa de subestimar a concordância casual é comprovada por seus valores sempre abaixo dos índices Global e Tau. O índice Tau, ao se situar entre o Global e o Kappa, parece ser o ideal, mostrando tornar possível a correta consideração das concordâncias real e casual para a situação na qual é assumida a equiprobabilidade de ocorrência das categorias informacionais.

## **2.2 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS NA CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL**

Um SIG é constituído por um conjunto de “ferramentas” especializadas em adquirir, armazenar, recuperar e transformar informações espaciais. Dados geográficos descrevem objetos do mundo real em termos de posicionamento com relação a um sistema de coordenadas, seus atributos não aparentes (como cor, pH, custo, incidência de pragas, etc) e relações topológicas existentes. Portanto, um SIG pode ser utilizado em estudos relativos ao meio ambiente e recursos naturais, na pesquisa da previsão de determinados fenômenos ou no apoio a decisões de planejamento, considerando a concepção de que os dados armazenados representam um modelo do mundo real (Burrough, 1986).

Um SIG pode, ainda, ser definido como um sistema de informações provido de quatro grupos de aptidão para manusear dados georreferenciados: entrada, gerenciamento, manipulação e análise e saída. Os dados são georreferenciados quando estes possuem basicamente duas características: dimensão física e localização espacial (Aronoff, 1989).

Na área de mapeamento e classificação de solos, a tecnologia computacional para armazenamento de dados pontuais e espaciais está rapidamente substituindo o papel dos mapas analógicos. O SIG oferece grande flexibilidade para múltiplas interpretações de uma mesma base de dados de solo e para a integração de outros dados (ambientais e não ambientais), coletados em diferentes escalas e níveis de detalhe. Para o potencial da tecnologia SIG ser realizado, particularmente em aplicações de modelagem, os sistemas de informação também necessitam conter dados sobre variabilidade espacial, para permitir afirmar sobre a realidade ou incertezas das interpretações que contenham dados de solo. Através da adoção da tecnologia SIG, pode-se fazer reclassificação, interpretação e redesenho de mapas de solos de forma barata e rápida (Basher, 1997).

A capacidade de análise e modelagem espacial, que inclui a sobreposição de mapas, procedimentos de reclassificação, análise de proximidade, entre outras técnicas de modelagem, constitui uma das mais importantes características do SIG. Estas facilidades podem ser usadas em conjunto com outras simulações ou modelagens estatísticas (Valenzuela, 1991).

Muitos processos espaciais e fenômenos do ambiente físico dependem do relevo do terreno direta ou indiretamente. Em um ambiente digital de informações espaciais, a superfície da terra é normalmente moldada por meio de modelos numéricos de terreno e em conjunto com as funções bidimensionais do SIG, este método fornece uma poderosa e flexível base para a modelagem, análise e visualização de fenômenos relacionados com a topografia ou superfícies similares. O principal objetivo do MNT é encontrar modelos que possam representar o mundo real em um nível conceitual. Um procedimento analítico de uma MNT resulta em uma grande faixa de parâmetros relacionados ao terreno, tais como rampa e curvatura (Brändli, 1996).

A facilidade requerida por analistas para extrair informações temáticas a partir de imagens de satélites não é usualmente encontrada nos SIG's comerciais. Processamentos de imagens são tipicamente feitos em módulos ou softwares separados, com informações rasterizadas e/ou vetorizadas. O processamento de cada formato é feito dentro de sua própria interface e a comunicação é por conversão de formatos e exportação de arquivos ou formando acessos complexos entre tabelas de banco de dados relacionais. No Reino Unido, algumas entidades reconheceram, através de entrevista a usuários de SIG, que a opção destes sistemas em trabalhar somente com um formato de arquivo, raster ou vetor, sendo que o formato não suportado deve ser convertido e importado, está inibindo o aumento de usuários destes sistemas para observações da terra. Uma possível solução seria uma integração do

processamento de imagens com análises SIG em um ambiente simples (Poulter, 1996).

Devido à complexidade dos problemas ambientais do país, pesquisadores brasileiros sentiram a necessidade de um sistema de informação espacial com forte capacidade de integração de dados entre imagens de satélite, mapas temáticos, cadastrais e modelos numéricos e flexibilidade de operação entre informações rasterizadas e vetoriais. Com isso, projetou-se o sistema SPRING (Sistema para Processamento de Informações Georreferenciadas), capaz de integrar as tecnologias de sensoriamento remoto e Sistemas de Informação Geográfica. O SPRING utiliza um modelo de dados orientado-a-objetos, que melhor reflete a metodologia de trabalho de estudos ambientais e cadastrais. Também fornece ao usuário um ambiente interativo para visualizar, manipular e editar imagens e dados geográficos (INPE, 2000).

### **2.3 O USO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG) E SENSORIAMENTO REMOTO APLICADOS À CAFEEICULTURA**

O uso de imagens de satélite do sistema ETM+ Landsat é uma valiosa ferramenta para fins de mapeamento devido à sua grande abrangência em termos de área, periodicidade de imageamento em intervalos curtos, possibilidade de análise visual e espectral e, o que é mais importante, o baixo custo de aquisição. Neste sentido, o maior desafio da aplicação desta tecnologia para fins de mapeamento é encontrar formas de fazer a classificação do uso da terra com a maior acurácia possível, usando métodos automatizados ou interpretação visual.

Há, também, a necessidade de conhecer a relação das classes de uso da terra com atributos do meio físico. O solo é o principal recurso natural para o uso agrícola e a sua caracterização física, química, espectral e geomorfológica formam a base para seu melhor planejamento e manejo por parte do

administrador e/ou produtor. O solo tem um padrão de distribuição na paisagem, sendo possível reproduzir esta distribuição usando recursos do Sistema de Informações Geográficas. Este processo de modelagem, que deve ser validado com campanhas de campo e análises laboratoriais de solos, pode proporcionar o mapeamento das classes de solos de forma rápida e exata. A correlação de informações de áreas cafeeiras com atributos do meio físico, tais como orientação de vertentes, faixas de altitude e classes de solos, contribui para a caracterização desta cultura no ambiente e disponibiliza informações que podem contribuir para o gerenciamento agrícola do café. Estas correlações podem ser feitas com álgebra espacial, disponibilizada também pelo Sistema de Informações Geográficas.

Batista et al. (1990) avaliaram os dados do SPOT/HVR e do Landsat TM na discriminação das culturas de café (*Coffea arabica* L.), cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.) e pastagem (espécies variadas). Informações obtidas durante o período da tomada das imagens foram: variedade, data de plantio, estágio fenológico, altura de plantas, espaçamento e orientação de plantio, porcentagem de cobertura do solo, entre outros. Os resultados demonstraram não haver diferença significativa na identificação visual das culturas ao nível de 5%. Entretanto, verificou-se uma significativa diferença entre os produtos, considerando cada produto separadamente. Os resultados da análise digital não mostraram diferença significativa ao nível de 5% quando eram analisados dados multiespectrais do SPOT ou bandas equivalentes do TM. A inclusão de uma banda do TM na região do infravermelho médio, em substituição à segunda banda no visível, melhorou sensivelmente o desempenho obtido na análise digital. Neste mesmo sentido, Dallemand (1987) usou imagens SPOT e Landsat TM com o intuito de identificar culturas por interpretação visual. Quatro intérpretes experientes, sem conhecimento da verdade terrestre, foram selecionados para identificar 100

talhões de trigo, café, cana-de-açúcar e pastagem. A partir de 16 matrizes iniciais de erros foi realizada uma matriz por produto, depois da verificação da homogeneidade do grupo de intérpretes. A porcentagem de erro de inclusão e a estatística Kappa foram calculadas para cada produto e cada categoria. Os resultados mostraram, no nível de significância de 5%, que não houve diferença significativa considerando as culturas juntas. Quando as culturas foram analisadas individualmente, houve diferença significativa entre os talhões e entre as identificações feitas pelos intérpretes. Conclui-se que a metodologia empregada, usando a interação de imagens do satélite SPOT com Landsat por meio de interpretação visual para separação de culturas, está sujeita à confusão espectral durante o processo de interpretação.

Pellerin (1993), usando sensoriamento remoto a partir de imagens LandSat TM e MSS, observou, em seus trabalhos, que os piores resultados de interpretação foram os de café, cujas parcelas foram confundidas com diversas classes, desde florestas a culturas anuais. Esta confusão ocorreu em função da altura das árvores, da transparência da cultura vegetal e das práticas culturais sazonais efetuadas entre linhas (solos nus, culturas intercalares de milho, feijão, arroz de sequeiro, capim etc). Somente plantações com grandes parcelas, de tamanho médio entre 1,5 a 2,0 metros, foram bem identificadas. Dependendo da época do ano, as pastagens podem ser confundidas com culturas, visto que, em estações úmidas, elas possuem a mesma resposta espectral.

Leonardi (1990) utilizou as bandas 1 a 5 e 7 do sensor Landsat 5/TM e dados coletados em campo para avaliação da influência dos parâmetros culturais do café sobre sua resposta espectral. Os parâmetros culturais foram coletados quase simultaneamente à passagem do satélite e são resultantes da média de medições de campo, dados de arquivos e entrevistas. Os dados digitais correspondentes aos pontos amostrados em campo foram convertidos para valores de reflectância. A análise dos dados foi feita em quatro etapas:

correlação entre parâmetros culturais, correlação dos valores de reflectância entre as bandas espectrais, correlação entre parâmetros culturais e resposta espectral do café e regressão múltipla entre parâmetros culturais e resposta espectral. Os resultados revelaram que os parâmetros relativos às características da planta (altura, ano e poda, porcentagem de cobertura do terreno, idade, vigor vegetativo e tipo de poda) são mais bem correlacionados com a reflectância do cafezal do que parâmetros relativos às características do substrato (percentagem de cobertura nas entrelinhas, matéria orgânica, ervas daninhas verdes, solo exposto) ou da geometria (orientação das fileiras de plantio, declividade e orientação de declive). A análise de regressão múltipla evidenciou a influência predominante dos parâmetros, altura da planta e porcentagem de cobertura do terreno na resposta espectral do dossel do cafeiro.

Neste mesmo sentido, Vieira et al. (2000) procuraram estabelecer uma correlação das variáveis da cultura cafeeira com suas respostas espectrais em imagens Landsat/TM, bandas 3, 4 e 5, a fim de se obterem padrões de identificação desta cultura por meio de sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento. A análise da resposta espectral dos cafezais mostrou, no caso da banda 3, valores baixos de reflectância (3%) para talhões que apresentaram porcentagem de cobertura do substrato por café maior que 70%. Na banda 4, os resultados mostraram valores de reflectância mais altos (35-45%) para cafezais formados e em bom estado produtivo. Nos cafezais em formação, os valores de reflectância foram mais baixos (20-25%). A banda 5 demonstrou refletir mais características físicas do solo. Os valores de reflectância foram mais altos nos cafezais em formação, com grande exposição do substrato (até 90%), atingindo valores de 28%. Nas áreas em que o solo tem grande capacidade de retenção de água, tais como latossolos, os valores de reflectância são mais baixos, em função da absorção da água nesta banda. Os resultados parciais mostraram que em função da grande complexidade da cultura cafeeira e da limitação da resolução

espacial da imagem TM/Landsat, a definição do padrão orbital exato é dificultada. Sugeriram-se avaliações temporais e associação de produtos de sensores remotos de maior precisão espacial. Por outro lado, estando o cafezal formado e em bom estado produtivo, o levantamento e monitoramento visual da cultura cafeeira por meio de imagens TM/Landsat pode ser utilizado.

Visando a separação das culturas de citros, cana-de-açúcar e café, Tardin et al. (1990) utilizaram análise digital de quatro bandas do sensor TM: uma no visível (banda 3), uma no infravermelho-próximo (banda 4) e duas no infravermelho médio (bandas 5 e 7). A discriminação espectral e a classificação das culturas foram obtidas utilizando um algoritmo de máxima verossimilhança, implementado em um sistema interativo de análise de imagens. Foram apresentados dados de matrizes de classificação, desempenho médio e valores de reflectância para todas as culturas e canais analisados. Os resultados alcançados na área de estudo mostraram altos índices de discriminação entre as culturas.

Lacerda et al. (2000) usaram técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto para determinar, monitorar e estimar áreas cafeeiras nas regiões produtoras do Alto Paranaíba (Patrocínio) e do Sul de Minas (Machado). Fez-se, em campo, o levantamento de atributos da área cafeeira e do meio físico ligado à resposta espectral dos cafezais (plantio, idade, porte, diâmetro médio da copa). Com o uso de GPS, georreferenciaram-se as lavouras de café e de outras coberturas vegetais para a obtenção de padrões de comparação nas imagens de satélites e nas fotografias aéreas. Utilizou-se a classificação supervisionada pelo classificador Maxver (máxima verossimilhança) na banda 4. Na região do Alto Paranaíba, a comparação visual entre o mapa gerado pelo classificador e os padrões espectrais definidos para as diversas classes, aliados, ainda, à checagem de campo, demonstrou que o mapa gerado para mapeamento de áreas cafeeiras foi confiável. Tal fato reflete, provavelmente, as condições geomorfológicas da região em que ocorre, predominantemente, relevo mais suave e grandes

extensões de áreas cafeeiras. Já para o Sul de Minas, o mapa de uso da terra gerado pela classificação apresentou maior conflito entre mata e café. Este conflito é acentuado em algumas áreas da região em que o relevo é mais acidentado e também em função das dimensões dos talhões, que é muito variável.

Alves et al. (2000) fizeram caracterização de áreas cafeeiras em regiões produtoras por meio de técnicas de geoprocessamento com o objetivo de levantar informações sobre o meio físico e produzir mapas temáticos dos vários componentes destes agrossistemas. O software SPRING e as imagens do satélite TM/Landsat 5 foram usados para organização de um banco de dados digital para as regiões. Técnicas de geoprocessamento foram utilizadas para a geração de mapas de declividade e de solos, sendo este último por meio de modelagem geomorfológica. Os mapas temáticos elaborados, associados às informações da cultura cafeeira, permitiram a avaliação da correlação das características da cafeicultura com o meio físico. As técnicas de geoprocessamento usadas mostraram-se eficientes na caracterização de agroecossistemas cafeeiros, podendo ser utilizadas no levantamento e monitoramento, além de fornecerem dados para subsidiar o planejamento e gerenciamento racional do setor.

Resende et al. (2000) usaram imagens TM, bandas 3, 4 e 5, em conjunto com a interpretação visual das imagens e dados coletados em campo, para a identificação dos principais padrões de uso do solo para microbacias nos municípios de Lavras e São Sebastião do Paraíso. As classes de uso atual foram identificadas por Mata, Café, Pastagem, Cultivo (áreas preparadas para cultivo de verão e solos desnudos), Silvicultura e Corpos d'água. Fez-se uma tabulação cruzada destas classes de cobertura com as classes de solo usando um módulo do software SPRING, possibilitando visualizar a distribuição, em termo de área, de cada classe de cobertura em cada unidade de solo.

O mapeamento por interpretação de imagens na microregião da Zona da Mata apresenta um ponto favorável, que é a pouca variedade de classes de uso da terra, predominando, basicamente, mata, café e pastagem. Por outro lado, a presença de nuvens na maior parte do ano, as coberturas fragmentadas e intercaladas, a topografia accidentada e, consequentemente, o sombreamento, são os fatores negativos que dificultam o processo de discriminação das coberturas. O café, um dos principais objetivos deste trabalho no sentido de mapeamento, tende a confundir-se com a mata e até com a pastagem, dependendo do vigor vegetativo desta última. O uso, então, de fotografias aéreas numa área piloto pode ser primordial na comparação com a classificação da imagem orbital para verificar a exatidão de mapeamento e validação de metodologia para distinção de coberturas.

A Zona da Mata mineira tem grande potencial da cafeicultura no Estado e ainda não possui uma caracterização efetiva das lavouras no ambiente. Assim, este trabalho se propõe a disponibilizar informações sobre o café na região em termos de mapeamento e de sua relação como o meio físico, com ênfase à caracterização de solos usando tecnologias como SIG e sensoriamento remoto.

## **3 MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

#### **3.1.1 Referências geográficas e vias de acesso**

A região de estudo situa-se na Região Sudeste, estado de Minas Gerais, na Mesoregião da Zona da Mata e Microrregião de Manhuaçu. A microregião posiciona-se geograficamente nas latitudes de 19°49'48"S a 20°36'08"S e longitudes de 41°25'47"W a 42°34'02"W, com altitude média em torno de 635 metros. A área total é de 4.443 Km<sup>2</sup>, com altitude máxima de 2.897 m (Pico da Bandeira - Caparaó) e mínima de 350 m (FUNDER, 2000). O principal acesso, a partir de Belo Horizonte, é feito pela rodovia BR-262 (Belo Horizonte – Vitória) até a cidade de Martins Soares, passando por Manhuaçu.

A área de estudo posiciona-se geograficamente nas latitude de 20°11'53"S a 20°16'34"S e longitude de 41°50'20"W a 41°57'49"W (Figura 2), com área de 108,36 Km<sup>2</sup>, a uma distância média de 9 Km do município de Reduto, no sentido Manhuaçu – Vitória.

#### **3.1.2 Clima**

O clima é o Cwb, segundo a classificação de Köppen. Apresenta verões brandos, com estações chuvosas no verão. A temperatura média máxima anual é de 27,50 °C (Caputira) e a média mínima é de 14,40 °C (Caparaó) (FUNDER, 2000). O índice pluviométrico para a maior parte da área caracteriza-se pela grande concentração de precipitação em poucos meses do ano. Por outro lado, a encosta da serra do Caparaó, em geral, não possui sequer um mês seco. Há uma oscilação entre 1000mm a 1500mm neste índice. A umidade do ar apresenta

uma média anual de 80% e cresce, ligeiramente, do interior para o litoral (DNPM/CPRM, 1993).

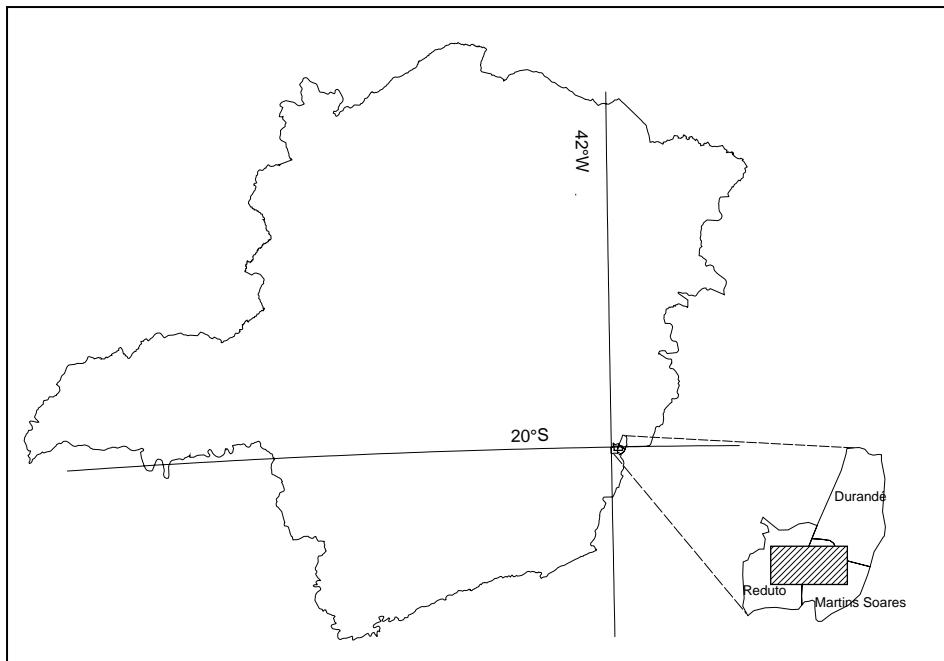


FIGURA 2 - Localização geográfica da área de trabalho

### 3.1.3 Vegetação

A vegetação é caracterizada por um tipo de vegetação subarbórea, arbustiva ou herbácea, sendo que os representantes mais típicos são os campos da serra do Caparaó, que ocupam o planalto em altitudes superiores a 1800m. Nesta região, a vegetação é um misto de campos e bosques baixos e abertos, originados pelas sucessivas queimadas. Mais recentemente, está havendo uma modificação no panorama da vegetação por dois motivos: primeiro, pela preservação da reserva florestal do Parque do Caparaó – implantada pelo IBAMA – e segundo, pelo incremento do plantio de café, no qual se observa um

devastamento dos relictos de matas existentes fora da área de preservação. (DNPM/CPRM, 1993).

### **3.1.4 Drenagem**

A área vem sendo trabalhada por uma profunda rede de drenagens, esculpindo o seu modelado em formas diversas, em função das características e diversidades dos seus tipos litológicos. O principal curso d'água da microregião é o rio Manhuaçu. Ele possui uma forma meandrante, bem encaixado e com a formação em seu leito de corredeiras e cachoeiras, como a cachoeira da Neblina. Toda a área possui a sua litologia orientada a nordeste, fruto de intensos esforços dinâmicos que a submeteram. Assim, a paisagem ostenta feições superficiais alongadas, em que as drenagens principais se orientam a nordeste. O sistema é formado por uma densa rede de drenagens dentrítico-retangulares, que vai elaborando cristas e modulando todo o relevo do domínio. Quando se desloca para leste, a dissecação aumenta e o relevo vai assumindo formas mais suaves; os cursos d'água vão tomando aspectos meandriformes como os do rio Manhuaçu (CPRM/COMIG, 2000).

### **3.1.5 Geomorfologia**

A topografia da mesoregião da Zona da Mata caracteriza-se por um relevo que varia de ondulado a montanhoso, geralmente mostrando elevações terminando em vales planos de largura variável. As superfícies de erosão deram origem a platôs de altitudes diversas. Nas partes mais baixas, o relevo é fortemente ondulado. No segundo nível, é ondulado e fortemente ondulado, e nas partes mais altas, é fortemente ondulado e montanhoso (Rezende, 1980).

Na região próxima a Manhuaçu, o relevo é marcado por encostas íngremes, restringindo-se a colinas e vertentes convexas e côncavo-convexas, exibindo, portanto, meias-laranjas, escarpas e pães de açúcar (Moreira, 1997).

### **3.1.6 Geologia**

#### **3.1.6.1 Geologia Local**

Moreira (1997) sugeriu para a área pertencente à Microregião de Manhuaçu, três unidades litológicas, informalmente denominadas de Unidade Sossego, Unidade Inferior Simonésia e Unidade Palmeira, sendo que para esta última adotou-se a denominação de Suíte Barra do Jaguaraí. A Unidade Inferior Simonésia é composta pelas sub-unidades Monte Alverne, Sossego e Barra de Simonésia. Esta unidade é a que ocorre com maior freqüência na região, estando distribuída por toda a área central e oeste, constituída predominantemente por gnaisses. A foliação apresentada pelos gnaisses mostra-se normalmente anastomosada e dobrada, gerando formas amendooadas e alongadas, segundo uma direção preferencial NNW-SSE e NNE-SSW. A sub-unidade Monte Alverne é caracterizada tanto pela presença de granulitos maciços e de composição básica quanto por granada-piroxênio e piroxênio gnaisses granulíticos. A sub-unidade Sossego é constituída por granulitos e gnaisses aluminosos com intercalações calciosilicáticas e quartzíticas. A sub-unidade Barra de Simonésia é caracterizada por uma seqüência de: hornblenda gnaisse, biotita-hornblenda gnaisse com intercalações de plagioclásio-biotita-hornblenda gnaisse e plagioclásio-hornblenda gnaisse.

A suíte Barra do Jaguaraí é caracterizada por apresentar rochas de caráter granítóide, de composição tonalítica a granodiorítica ou quartzo-monzdiorítica. Estas rochas intrudem aquelas da Unidade Inferior Simonésia, na forma de corpos de pequenas proporções (de dezenas a centena de metros) com feição amendoada, apresentando foliação mais ou menos bem definida, cuja direção predominante é NNE-SSW, o que indica terem sido as mesmas submetidas à deformação.

Detalhando mais a Suíte Barra do Jaguaraí, Moreira (1997) menciona que no local ocorrem rochas granítóides com composição variando de tonalítica

a granodiorítica, ou mesmo quartzo-monzdiorítica, que afloram como corpos descontínuos envolvidos por gnaisses, exibindo formas de meia laranja, escarpados ou não. Estes corpos apresentam uma granulação mais fina e uma foliação fortemente marcada por palhetas de biotita, que envolve grandes cristais de K-feldspato. Nas partes mais centrais destes corpos, ocorre uma foliação discreta, apresentando-se com direção NNE-SSW. Nas bordas dos corpos granítoides, ocorre biotita gnaisses, de composição semelhante aos mesmos, mostrando foliação bem marcada, que podem refletir o retrabalhamento destas rochas.

As rochas básicas e ultrabásicas também são observadas, ocorrendo como corpos isolados e boudinados e que, em alguns casos, podem atingir algumas centenas de metros. Aparecem intrudidos nos gnaisses tanto da Unidade Inferior como da Unidade Superior. Foram identificados como sendo gabros, leucogabros, noritos, piroxenitos e tipos anortosíticos. Estas rochas mostram-se, às vezes, deformadas e alteradas, prevalecendo os tipos não deformados, que preservam em parte sua mineralogia e estruturação primárias.

### **3.1.6.2 Estruturação da área**

Através de análise de imagens de satélite, na escala 1:100.000 e de fotos aéreas na escala 1:25.000, Moreira (1997) observou grandes lineamentos estruturais, cujas direções variam, preferencialmente, entre NNE-SSW e NNW-SSE. São levemente anastomosados, mostrando-se descontínuos e com extensão variando de 1 a 12 Km. São truncados por outros lineamentos de direção NEE-NWW, contínuos e retilíneos e com extensão de até 8 Km. A disposição entre lineamentos apresenta um padrão amendoado, contribuindo para um padrão geomorfológico semelhante ao dos morros da região. Estes lineamentos são ainda responsáveis por um padrão retilíneo para as principais drenagens da região, em vales bem encaixados. Observa-se, ainda, a expressão da xistosidade

das rochas aflorantes, que apresenta direção preferencial paralela aos lineamentos NNE-SSW a NNW-SSE.

Em escala mesoscópica, foram observados estruturas planares representadas por um bandeamento que é identificado em gnaisses e migmatitos. Nos paragnaisses, é caracterizado por largas faixas paralelas, alternando entre material quartzo-feldspático e material máfico composto por biotita, feldspato, granada, cordierita e sillimanita. Nos ortognaisses, o bandeamento é definido por bandas quartzo-feldspáticas e bandas ricas em biotita, anfibólio e piroxênios, mais estreitas e mais homogêneas.

### **3.1.7 Solos**

Nas chapadas ou nas suas modificações, o material dentrítico pode ser bastante espesso e incluir material pré-intemperizado, originando os solos mais intemperizados da paisagem, os Latossolos. As áreas acidentadas de encostas mais íngremes, por estarem sujeitas à intensa remoção de material, originam solos rasos e rejuvenescidos, como os Cambissolos e os Litossolos (Neossolos Litólicos). As áreas das partes baixas suportam pequena quantidade de material transportado, originando os Podzólicos (Argissolos) (Rezende, 1980).

Os Latossolos de cor avermelhada da Microregião de Manhuaçu são oriundos de granitos e tonalitos. Em certos aluviões e ao longo de alguns ribeirões, desenvolvem-se os solos hidromórficos (Gleissolos) e Aluviais (Neossolos Flúvicos). Os Litossolos (Neossolos Litólicos) são notados nas porções mais elevadas dos maciços graníticos e nas áreas dominadas pelos quartzitos. São ora aluminosos, no caso dos granitos, ora arenosos, quando recobrem os quartzitos (CPRM, 2000).

### **3.2 MATERIAL**

Os dados de altimetria e rede de drenagem foram extraídos de cartas planialtimétricas do IBGE, na escala 1:50.000. A base planialtimétrica foi constituída pelas cartas topográficas do IBGE, folhas SF-24-V-A-I-1 de Santana do Manhuaçu e SF-24-V-A-I-3 de Manhumirim, escala 1:50.000, com curvas de eqüidistância de 20 m, Datum horizontal Córrego Alegre.

Os dados referentes ao uso atual da terra foram extraídos de imagens do satélite LANDSAT-7/ETM<sup>+</sup> (Enhancement Tematic Mapper Plus) para a data de 28 de Junho de 2000. Esta data ocorreu na época em que ocorreu onde a imagem apresentou uma menor quantidade de nuvens e uma maior visibilidade, que foi o período de seca. A imagem correspondeu à órbita/ponto 216/74 para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, adquirida em formato digital e com resolução espacial de 30 x 30 m.

Usaram-se fotografias aéreas verticais não-convencionais coloridas provenientes do levantamento feito pelo Núcleo de Estudos para Uso da Terra (NEPUT) da Universidade Federal de Viçosa, contratado para este fim no mês de Agosto de 2000. A altura média de vôo foi de 2000 m e a escala foi de aproximadamente 1/10.000.

Usou-se o software SPRING (Sistema para Processamento de Informações Georreferenciadas) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, versão 3.3 e 3.5, para o processamento digital das imagens e análise espacial, incluindo digitalização das entidades gráficas e modelagem dos dados.

Para o georreferenciamento dos dados em campo, utilizou-se o GPS (Sistema de Posicionamento Global) do tipo navegação, o que permite uma precisão de 15m. O GPS é um sistema de radionavegação baseado em sinais emitidos por satélites e interpretados por um receptor em posse do usuário, o que vai permitir saber sua localização, velocidade e tempo em qualquer ponto do globo terrestre.

A estatística usada envolveu o uso do modelo fatorial e foi analisada pelo sistema SISVAR do Departamento de Ciências Exatas da UFLA.

Os perfis representativos de cada unidade de mapeamento dos solos foram descritos e amostrados segundo critérios de Lemos e Santos (1996). A classificação dos solos foi feita de acordo com EMBRAPA (1999).

### 3.3 MÉTODOS

A Figura 3 demonstra o fluxograma das atividades desenvolvidas neste trabalho de pesquisa. Os trabalhos tiveram início com uma campanha de campo para identificação e delimitação da área de trabalho. Definidos os limites, planejou-se o aerolevantamento da área e a aquisição de imagens orbitais do satélite Landsat 7/ETM+. Depois de reveladas as fotografias, procedeu-se à montagem do mosaico digital, que foi georreferenciado, posteriormente, em campanha de campo com o auxílio de GPS. Procedeu-se, em seguida à fotointerpretação e digitalização das principais classes de uso da terra. Cartas do IBGE que abrangeram a área foram também digitalizadas.

O modelo de distribuição dos solos na paisagem local foi avaliado em campanha de campo. Este modelo foi aplicado para o mapeamento dos solos a partir de dados de altimetria e declividade usando o Sistema de Informações Geográficas. Para checagem deste modelo, escolheu-se uma microbacia representativa da área de estudo. Esta microbacia foi detalhada por fotointerpretação em escala próxima a 1/10.000, com o levantamento de superfícies de topo, várzea, terraços e de formas côncavas e convexas. O modelo de distribuição de solos na paisagem correlaciona as pedoformas às classes de solos. Perfis representativos das principais classes de solos foram descritos e amostrados para a caracterização química e física e para checagem do modelo.

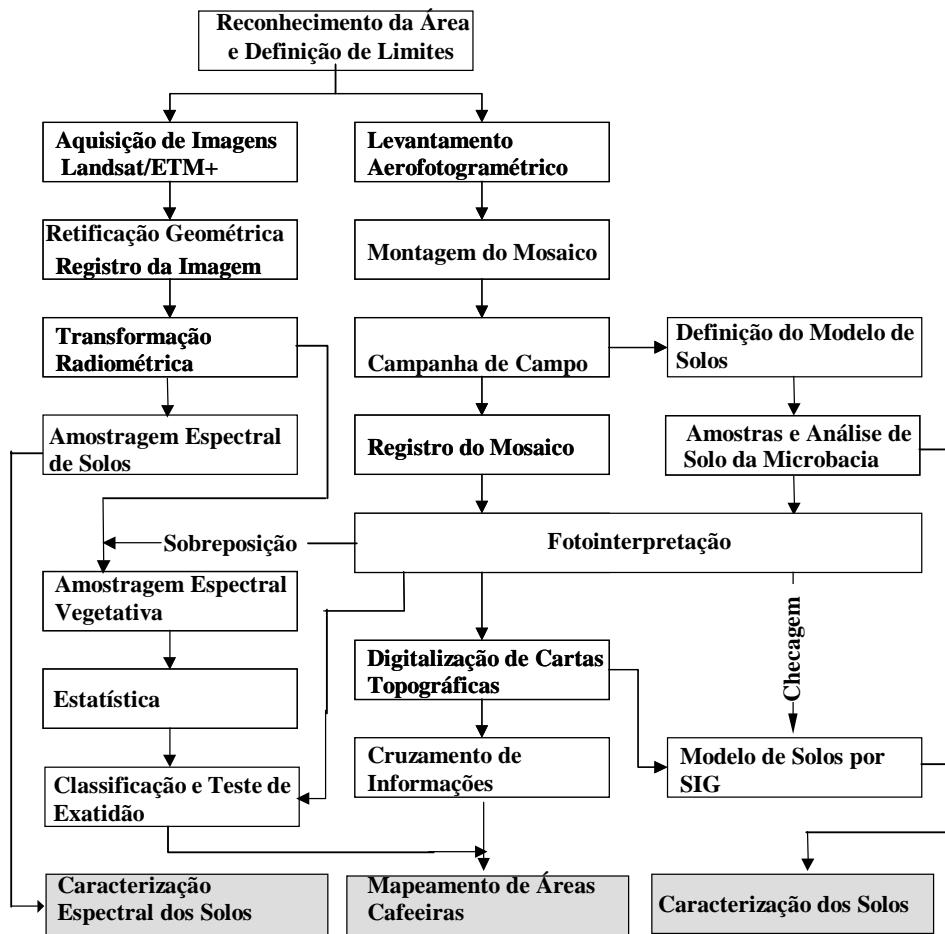


FIGURA 3 – Fluxograma de atividades desenvolvidas no projeto de pesquisa

A imagem orbital foi registrada e transformada para dados de reflectância de superfície. A área da imagem foi recortada para ser a mesma do mosaico e, assim, permitir a comparação entre classificado e verdade de campo (interpretação do mosaico). Limites das classes interpretadas sobre o mosaico digital foram sobrepostas à imagem. Assim, foi possível fazer amostragem para cada cultura, dentro da imagem, para todas as bandas do Landsat 7 usadas no

projeto e fazer análise estatística para verificar as diferenças para bandas e cultura. Amostragens para vegetação e também para solo serviram para demonstrar, graficamente, os seus respectivos comportamentos espectrais. Foram, também, testados diferentes tipos de classificadores comparados às classes levantadas na fotointerpretação.

Mapas foram confeccionados a partir das melhores classificações sobre a imagem e do cruzamento de áreas cafeeiras com declive, altimetria e orientação de vertentes. As atividades são discriminadas abaixo e descritas mais detalhadamente nos tópicos seguintes.

### **3.3.1 Reconhecimento**

A primeira etapa do trabalho constituiu-se de levantamento de informações disponíveis na literatura sobre os recursos naturais e a cultura cafeeira da região da Zona da Mata, mais especificamente da microrregião de Manhuaçu. Com base nestes dados, realizaram-se campanhas de campo preliminares para definição de área representativa, tanto dos condicionantes do meio físico quanto da ocupação pela cafeicultura, para delimitação de área-piloto para a realização do trabalho. Selecionou-se, então, uma área com cerca de 108,36 Km<sup>2</sup>, limitado, pelas coordenadas de latitude 20°11'53"S a 20°16'34"S e longitude 41°50'20"W a 41°57'49"W.

### **3.3.2 Levantamento Aerofotográfico**

O levantamento aerofotográfico foi realizado pelo NEPUT - Núcleo de Estudos e Planejamento do Uso da Terra, da Universidade Federal de Viçosa – UFV. O vôo foi feito em várias tentativas, procurando um dia claro ou com um mínimo de nuvens, no sentido de eliminar a influência destas sobre as fotografias. Ainda assim, o céu totalmente “aberto”, sobre toda a área, em um

mesmo dia, não aconteceu, o que levou o levantamento aéreo a ser feito em dias diferentes. A cobertura completa sobre a área piloto foi feita em seis linhas de vôo no sentido Leste/Oeste e Oeste/Leste.

Depois de reveladas, as fotografias aéreas foram escaneadas em resolução de 200 pontos por polegada, visando uma boa nitidez e, em seguida, procedeu-se à montagem do mosaico digital. O mosaico foi feito pelo software Visual Sticker<sup>1</sup> através de identificação visual de pontos de controles em duas fotos subjacentes, ou seja, em áreas em que houve sobreposição. Estes pontos de controle serviram como referência para o software unir todas as fotos em um só produto. Erros provocados pela variação do avião na linha de vôo (o que provocou distorção nas fotografias) foram minimizados através do uso de pacotes gráficos comerciais. Este problema foi detectado através da distância, medida em pixels, entre dois pontos de uma mesma foto, comparada aos mesmos pontos da foto adjacente. A correção foi feita por redimensionamento da resolução de uma das fotos para que as distâncias entre os mesmos pontos nas duas fotos pudessem se equivaler.

Depois de montado o mosaico, este foi georreferenciado em campanha de campo. Identificaram-se, preliminarmente, pontos de controle de fácil localização no campo através das fotos, tais como cruzamento de estradas ou outros marcos de limites bem definidos. Estes pontos foram distribuídos de forma equidistantes e bem distribuídos na área do mosaico, totalizando 80 pontos. Esta operação serviu também para corrigir eventuais falhas de montagem e fazer observações referentes ao relevo, geologia e distribuição dos solos.

Todo o processo da campanha de campo foi feito com o apoio do GPS. Além das leituras de coordenadas nos pontos de controle, o GPS foi usado como navegador, ou seja, indicando a distância e direção do local desejado, facilitando

---

<sup>1</sup> Copyright© 1996-1999 Panavue

o processo de identificação dos pontos procurados. As leituras de coordenadas nos pontos de controle foram feitas por média de observações, deixando o aparelho de forma estática por um tempo de três minutos. Com este método, procurou-se diminuir a margem de erro e, consequentemente, aumentar a precisão das leituras.

Nesta mesma campanha de campo, foi possível esclarecer dúvidas de interpretação em algumas feições mostradas pelo mosaico que ajudaram, posteriormente, na fotointerpretação feita no escritório. Foi possível, ainda, verificar a resolução espacial do mosaico, medindo-se a distância entre dois pontos no papel e os mesmo pontos no campo.

### **3.3.3 Retificação geométrica e registro do mosaico e imagens**

Tanto o mosaico como as imagens foram exportadas para o formato *grib* (Gridded binary), que é um formato de valores de ponto de grade expresso no modo binário, usado para aumentar o desempenho da transmissão e economizar memória no armazenamento. No SPRING, esta operação foi feita no módulo IMPIMA.

As imagens e o mosaico foram lidos e registrados através do módulo principal do sistema, usando a opção “registro”. Os registros foram feitos com a determinação matemática da relação entre as coordenadas do mapa no sistema de referência “Universal Transverso Mercator”-UTM, Datum de Córrego Alegre e as coordenadas da imagem (linha, coluna). No caso da imagem, usaram-se como base para registro as cartas topográficas do IBGE. O mosaico foi registrado com coordenadas colhidas com o GPS em campo. A Figura 4 exemplifica a operação de registro.

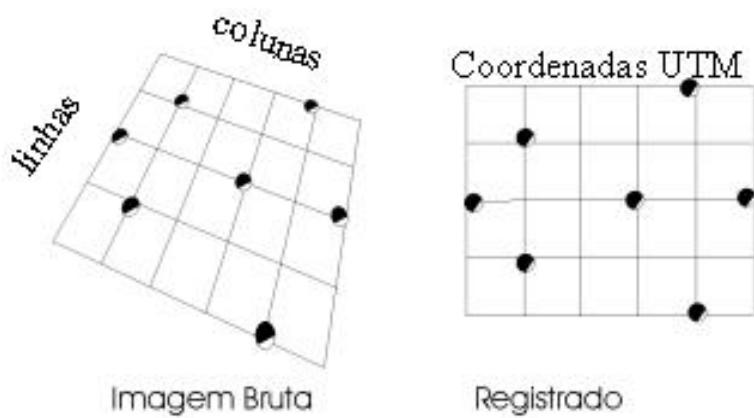


FIGURA 4 - Representação do registro de imagem

Utilizou-se um número de pontos de controle superior a 10, conforme recomendação de Mather (1993), visando uma melhor precisão. O processo de registro implica na produção de nova imagem. Assim, para a interpolação dos novos valores de pixel, usou-se o método do vizinho mais próximo, por ser este o que melhor preserva os valores originais do número digital (Crosta, 1999). O registro das imagens teve valores de erro, em pixel, próximos a um, o que se adequou ao proposto por Milne (1988) e Townshend et al. (1992). O polinômio usado para a transformação no SPRING foi o de primeiro grau. Já o mosaico apresentou erros em pixel bastante elevados. Para minimizar estes erros, usou-se um polinômio de segundo grau para enquadrar melhor os pontos de controle.

### 3.3.4 Transformação Radiométrica

Depois de registradas, as imagens (bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7) foram importadas para o projeto e seus valores digitais foram convertidos, radiometricamente, para valores de reflectância representando melhor as

qualidades físicas do alvo. Segundo Epiphanio & Formaggio (1988), para o estudo espectral de alvos, a melhor opção são os valores de reflectância.

Para a transformação de números digitais (ND) para valores de reflectância, seguiram-se os seguintes passos: transformação para valores de radiância, para valores de reflectância aparente e, por último, para reflectância real (ou de superfície). Converteu-se a reflectância aparente para real porque na aparente existe ainda a influência da atmosfera.

As transformações de números digitais para valores de reflectância aparente e real foram feitas segundo recomendações de Markham & Barker (1986).

### **3.3.5 Cartas topográficas, drenagem e altimetria**

As cartas topográficas, bem como os mapas temáticos disponíveis, foram escaneados e digitalizados por intermédio de mesa digitalizadora ou sobre o monitor de vídeo, usando módulos do SIG. No caso da mesa, as cartas também necessitam ser georreferenciadas em processo similar ao registro de imagens. Neste caso, existem coordenadas da mesa (linha e coluna) fornecidas ao sistema ao invés das coordenadas da imagem bruta. A digitalização transforma as informações analógicas em digitais, gerando diversos planos de informações temáticos (PIs). Neste processo, o software de digitalização vincula algumas coordenadas da carta (informadas manualmente ao sistema) às coordenadas físicas da mesa, de modo que as informações extraídas da carta são registradas de forma georreferenciada. Foram extraídos, das cartas, a rede de drenagem e as curvas de nível com diferença hipsométrica de 20 m, pontos cotados e também o limite de uma microbacia modelo.

As curvas de nível também foram usadas para gerar o modelo digital de terreno (MNT), ou seja, modelar e mostrar o terreno numa forma tridimensional e permitir extrair outros planos de informação, tais como classes de declive,

direção das vertentes, classes altimétricas e seções de corte (perfis) sobre o terreno. O MNT foi gerado a partir do formato TIN (Triangulated Irregular Network), por meio da triangulação de Delaunay. Resende (2000), trabalhando em condições semelhantes à da área de estudo, observou que o modelo triangular apresentou a melhor modelagem de terreno em comparação ao retangular.

### **3.3.6 Fotointerpretação**

A fotointerpretação foi feita diretamente sobre o mosaico digital georreferenciado e com o apoio das fotos analógicas, usando lupa e estereoscópio. As classes de uso da terra extraídas foram: café produção, café formação, mata, pastagem, pastagem especial, reflorestamento, solo exposto, solo exposto/café formação, solo exposto/pastagem, rocha exposta e meio urbano. Estas classes são compostas da seguinte forma:

Solo Exposto/Café Formação: lavouras de até seis meses de idade, em que a cobertura do solo pelas plantas ainda é muito pequena.

Café em Formação: lavouras com idade de 6 meses a 1,5 ano.

Café Produção: lavouras com idade superior a 1,5 ano.

Mata: áreas de matas nativas, secundária e ciliar.

Pastagem: pastagem nativa, formada e campo sujo.

Pastagem Especial: representa um tipo de pastagem plantada, com acentuado vigor vegetativo e que apresentou um comportamento espectral destacado em relação às pastagem natural e formada, acarretando a necessidade de mapeá-la de forma distinta.

Classe Reflorestamento: constituída por áreas reflorestadas com eucalipto e pinus.

Solo Exposto: áreas aradas e sob processo de erosão.

Solo Exposto/Pastagem: áreas de solo exposto por aração e que tiveram a pastagem recém plantada ou áreas de pastagem degradadas com acentuado grau de erosão.

Rocha Exposta: paredões rochosos, pães-de-açúcar e outras áreas com rocha aflorando à superfície.

Meio Urbano: cidades e distritos.

As classes analisadas e digitalizadas foram armazenadas em um plano de informação do sistema SPRING.

A classificação sobre o mosaico foi sobreposta à imagem. As diferenças provenientes da montagem do mosaico e da própria natureza das fotos aéreas não-convencionais foram corrigidas, fazendo-se um novo registro do arquivo vetorial (mosaico classificado) a partir da imagem como referência, ou seja, escolheram-se pontos de controle entre o arquivo vetorial e a imagem, de forma que o arquivo vetorial foi ajustado dentro da imagem.

### 3.3.7 Estatística

A análise estatística foi feita usando as fontes de variação: banda espectral, cobertura e exposição em relação ao sol, utilizando o modelo estatístico fatorial (Banda[6] vs Cobertura[5] vs Exposição[2]). A exposição resulta do fato de uma mesma cobertura estar iluminada ou sombreada, por causa da elevação do sol e topografia acidentada. O principal objetivo desta etapa foi verificar se há diferença significativa de reflectância entre os tipos de coberturas vegetais para uma determinada banda e, consequentemente, informar quais as melhores bandas para cada cobertura. Esta análise serviu para embasar a classificação automatizada feita pelo software SPRING.

Usou-se como espaço amostral o limite das classes de cobertura digitalizadas sobre o mosaico digital, assumido neste trabalho como verdade de campo, devido à facilidade de visualização e riqueza de detalhes. Sobrepondo-se,

então, a classificação do mosaico digital sobre a imagem, para garantir que os valores de reflectância coletados pertencessem realmente à classe de interesse.

A amostragem foi feita somente para as coberturas de interesse, ou seja, as com percentual vegetativo representativo (café formação, café produção, mata, reflorestamento, pastagem especial e pastagem). As bandas usadas foram as de 1 a 7 menos a 6 (termal). O limite das áreas sombreadas e não sombreadas foi feito por análise das curvas de nível (posição da vertente) ou por interpretação visual direta sobre a imagem, verificando o sombreamento provocado pelo relevo.

Colheram-se amostras de forma aleatória, num total de 30 para cada cobertura, conforme Triola(1999). O software usado foi o SISVAR e o teste de média aplicado foi o de Tukey, com grau de confiança de 95%. Para a análise de variância, usaram-se as seguintes fontes de variação: banda, cobertura, exposição, banda vs cobertura, banda vs exposição, cobertura vs exposição e banda vs cobertura vs exposição. Foi analisado o desdobramento dos tipos de cobertura dentro das interações banda vs exposição, para analisar quais as bandas diferem ou confundem as coberturas. Analisou-se, também, o desdobramento da exposição dentro da interação banda vs cobertura, com o objetivo de discriminar a semelhança ou confusão das coberturas, por banda, dentro de regiões iluminadas ou sombreadas.

### **3.3.8 Amostras espectrais para vegetação e solo**

Ainda com os limites das classes interpretados do mosaico sobrepostas à imagem, procedeu-se à amostragem de valores de reflectância em todas as bandas para cada uma das coberturas, para analisar seu comportamento espectral.

Para os solos, coletaram-se amostras para as bandas 3 e 4, em regiões de solo exposto, sobre todas as formas de vertentes (encostas, superfícies de topo,

planícies de inundação e terraços), com o objetivo de avaliar a correlação da reflectância do solo entre estas bandas. A partir destes dados amostrais as reflectâncias foram plotadas em um gráfico da banda 3 vs a banda 4 para determinar a linha de reflectância dos solos.

Amostras de solos também foram coletadas para as bandas 1, 2, 5 e 7 para as diferentes pedoformas e plotadas em gráfico de reflectância vs comprimento de onda (Bandas) para analisar a curvas de reflectância de solos para as diferentes classes. Usaram-se, no gráfico, valores médios de reflectância de solo para cada pedoforma, dentro de cada banda.

### **3.3.9 Classificação**

As classificações foram feitas de forma supervisionada, usando o algoritmo MAXVER (máxima verossimilhança), visto que o processo de classificação por segmentação é mais indicado para áreas homogêneas, como a região amazônica (Moreira & Marcellhas e Souza; 2001), ou seja, áreas extensas com predominância de uma mesma cobertura. O treinamento do classificador também foi feito sobre os limites definidos pela interpretação do mosaico digital sobreposto à imagem. Assim como no item anterior, a amostragem para classificação foi feita apenas para as classes caracterizadas como cobertura vegetal (mata, pastagem especial, café produção e em formação e pastagem), para áreas sombreadas e iluminadas. A classe reflorestamento foi desconsiderada na classificação por se tratar de áreas bastante pequenas. As classes restantes (solo exposto, rocha, solo exposto/cafê formação, solo exposto/pastagem e meio urbano) foram agrupadas em uma só classe, chamada de “Background”. As classificações foram feitas usando como base as bandas que melhor diferenciaram as coberturas, segundo os resultados obtidos pela análise estatística. Além destas, usou-se, ainda, a combinação entre elas e mais as transformações de imagem por NDVI, SAVI, Componentes Principais e a

transformação do tipo “Brightness”, proveniente do método proposto por Hall et al. (1991).

A classificação usando as imagens citadas acima e com todas as coberturas vegetais representativas foi chamada de “classificação completa”. Além desta, tentaram-se outras formas de classificação no sentido de melhorar a precisão. A primeira foi a retirada da classificação da cobertura pastagem, presumindo ser esta uma fonte de erro devido à sua falta de homogeneidade. A segunda foi a união das melhores classificações para cada cobertura em um único PI; ou seja, o Plano de Informação criado contém as melhores classificações de todas as coberturas analisadas. Esta operação foi feita com o uso de linguagem de análise espacial disponibilizado pelo SIG. O terceiro procedimento foi o de excluir, das bandas indicadas pela análise estatística, as coberturas que causaram mais confusão entre as demais. Como último procedimento, fez-se uma condensação de classes através da unificação das classes de café produção e formação em “café” e das classes pastagem e pastagem especial em “pastagem”. A cobertura mata continuou como “mata”, e as demais coberturas, em “outras coberturas”. A unificação das coberturas de café deveu-se à dificuldade de interpretação, em algumas circunstâncias, entre café formação e café produção. Esta dificuldade foi devida à má iluminação, consequência da topografia acidentada.

### **3.3.10 Acurácia da classificação**

A exatidão da classificação foi medida pelo Índice Global e pelo índice Tau. Optou-se pelo índice Tau ao invés do Kappa porque, segundo Brites (1996) e Foody et al. (1992), este último tende a superestimar os índices de acertos.

As matrizes de confusão foram feitas por tabulação cruzada entre o mapa de verdade de campo (mosaico digitalizado) e as diferentes classificações supervisionadas.

O software usado neste trabalho não permitiu uma separação de áreas sombreadas e iluminadas, o que não possibilitou uma comparação das classes fotointerpretadas (verdade de campo) e a classificada para estas condições de iluminação. Além da limitação do software, há também o problema de iluminação existente entre o imageamento feito pelo satélite e o levantamento aerofotogramétrico. Neste último, as fotografias foram tiradas em dias, horários e alturas diferentes dos do satélite, o que provoca áreas de sombreamento totalmente diferentes entre estes sistemas. Assim, as áreas iluminadas e sombreadas foram trabalhadas de forma distintas dentro da imagem, mas, no momento de compara-las à fotointerpretação do mosaico, estas foram combinadas dentro da feição correspondente. Por exemplo: café produção sombreado e iluminado foram classificados de forma distinta, mas foram atribuídos a café produção somente.

### **3.3.11 Modelo de solos**

O modelo de distribuição de solo na paisagem foi estabelecido e averiguado em campo com a colaboração do Prof. Carlos Ernesto R. Schaeffer, pedólogo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa. Para compreender melhor este modelo, uma microbacia da área de estudo foi detalhada para caracterização das pedoformas e dos solos. Esta microbacia foi a do Córrego Água Quente, considerada uma unidade ambiental representativa da área-piloto. Percorreu-se a área, fazendo observações quanto ao relevo, material de origem, classes de solo, drenagem e vegetação. Estabeleceu-se, então, um modelo geomorfológico para a microbacia e as unidades de mapeamento dos solos. Perfis representativos de cada uma das principais classes de solo das unidades de mapeamento foram descritos e amostrados segundo critérios de Lemos & Santos (1996), para a perfeita classificação dos solos de acordo com EMBRAPA (1999).

As pedoformas foram consideradas na separação das classes de solos, uma vez que o modelo usado estabelece que formas convexas, côncavas, superfícies de topo e de inundação implicam em classes de solos diferentes na região. Assim, para a coleta de amostras de solos, levaram-se em consideração estas pedoformas.

O mapeamento das diferentes pedoformas foi feito por fotointerpretação, sobre as fotos aéreas, dentro do limite da microbacia. Este mapa foi escaneado, georreferenciado e digitalizado dentro do software SPRING.

Usando os recursos disponíveis no SPRING, tentou-se reproduzir o modelo geomorfopedológico observado em campo, em representação digital e aplica-lo a toda área de trabalho. Como ponto de partida para criação do mapa de solos, foi gerada, a partir do MNT, uma grade com valores de declividade. Esta declividade foi fatiada em diferentes faixas, correlacionadas às diferentes classes de solo observadas no campo. A declividade de referência para cada classe de solo foi estabelecida com base em medidas feitas por clinômetro durante as campanhas de campo e através do teste de diferentes classes de declive, até encontrar a que melhor se adequasse ao modelo real. As faixas de mesma declividade em posições diferentes da paisagem podem representar classes de solos distintas. Assim, a discriminação entre áreas planas de topo e de várzea foi feita por interpretação visual e por recursos disponibilizados pelo SIG. O SIG possibilitou técnicas como separação de faixas altimétricas a partir de uma altitude média que delimitou áreas consideradas altas e áreas consideradas baixas. Outra maneira foi o fatiamento em faixas altimétricas de 100 em 100m, também utilizado para distinção das áreas baixas das altas. Em regiões onde áreas dentro da faixa considerada como baixa apresentaram altitudes maiores que outras consideradas altas, devido à grande dissecação da região, a separação entre as faixas altimétricas foi feita por interpretação visual sobre curvas de nível e por rede de drenagem. Para a discriminação de pedoformas, considerou-se

também a rede de drenagem, já que estas podem indicar a presença de áreas côncavas e de inundação e, consequentemente, a presença de certas classes de solos.

O detalhamento de solos e de pedoformas feito dentro da microbacia foi comparado à modelagem feita pelo software para que esta pudesse ser checada.

### **3.3.12 Cruzamento de informações espaciais**

Através de linguagem de análise espacial disponibilizada pelo software, cruzaram-se as informações de cultura de café com faixas de altitude, classes de solo e orientação das vertentes.

As áreas de cultura de café usadas nestes cruzamentos foram oriundas da interpretação feita sobre o mosaico e da união de todas as classes que envolvem cultura de café (café formação, café produção e solo exposto / café formação).

O cruzamento do mapa de café com altitude envolveu o fatiamento do limite máximo e mínimo para os grupos menor que 600m, maior que 1300m e entre 600 e 1300 em intervalos de 100 em 100 m. Assim, as classes unificadas de café foram cruzadas espacialmente às classes de altitude.

O mapa de classes de solos usado para o cruzamento com áreas cafeeiras foi o originado da modelagem de solos descrita acima. Consequentemente, correlacionaram-se as áreas unificadas de café às classes de solo RU+GX para planícies de inundação, LV+LVA para superfícies remanescentes de topo, LVA+LV+CX para encostas côncavas-convexas, PVA+PV para terraços e Afloramento rochoso+RL para as áreas escarpadas.

A orientação de vertentes foi extraída a partir do MNT e agrupada nas direções 0° a 45° (N-NE), 45° a 90° (NE-E), 90° a 135° (E-SE), 135° a 180° (SE-S), 180° a 225° (S-SW), 225° a 270° (SW-W), 270° a 315° (W-NW), 315° a 360° (NW-N) e áreas planas, ou seja, áreas que não possuem direção. Estas classes de declive foram cruzadas espacialmente às classes unificadas de café.

### **3.3.13 Análise de solos**

As amostras coletadas em campanhas de campo foram secas ao ar, destorreadas e passadas em peneiras de 2mm de malha, processo designado como Terra Fina Seca ao Ar (TFSA).

A textura do solo foi determinada através da metodologia descrita por Day (1965)-*método da pipeta*. A argila total foi obtida através da dispersão química com 10 ml NaOH 1N, em repouso por 15 minutos, e dispersão mecânica por agitação de 20 minutos, a 6000 rpm, em agitador Hamilton Beach.

O complexo sortivo foi determinado segundo metodologias descritas por Vettori (1969) e EMBRAPA (1997). Cálcio, magnésio e alumínio trocáveis foram extraídos com KCl 1 mol.L<sup>-1</sup>. A extração do potássio e fósforo foi realizada em solução com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,025 mol.L<sup>-1</sup> + HCl 0,05 mol.L<sup>-1</sup>. A extração do hidrogênio foi feita com acetato de cálcio 1 mol.L<sup>-1</sup> a pH 7. O pH foi determinado potenciometricamente utilizando-se relação solo/água e solo/KCl de 1:2,5. O carbono orgânico foi determinado pela oxidação da matéria orgânica com bicromato de potássio a 8%. A partir destes dados, calculou-se a soma de bases (S), CTC efetiva (t), CTC a pH 7 (T), saturação de bases (V) e saturação de alumínio (m), sendo:

$$S = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+;$$

$$t = S + Al^{3+};$$

$$T = S + (Al^{3+} + H^+);$$

$$V = (S/T) \times 100;$$

$$e m = (Al^{3+}/T) \times 100.$$

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 IMAGEM ORBITAL, FOTOINTERPRETAÇÃO E AEROLEVANTAMENTO**

#### **4.1.1 Imagem Orbital**

Através do uso de imagem orbital para a área de estudo (Figura 5), foi possível observar características geológicas, geomorfológicas e de uso e cobertura da terra. A análise visual e espectral destes aspectos ambientais permitiu a caracterização e/ou a busca de uma metodologia para a caracterização do meio físico, conforme proposto nos objetivos deste trabalho. A Figura 5 mostra a imagem Landsat/ETM+ em composição colorida, distribuída na banda 3 como azul, banda 4 como vermelho e banda 5 como verde. Nesta composição, a vegetação com massa verde mais densa aparece em cores avermelhadas, e a vegetação menos densa ou com solo exposto, em coloração verde. A vegetação em cores vermelhas deve-se ao fato de o olho humano ser mais sensitivo a esta cor, podendo, assim, destacar, com mais nitidez, as coberturas vegetais sobre a área de estudo. Esta imagem corresponde aos mesmos limites do mosaico digital, já que a classificação automatizada para coberturas vegetais de interesse feita sobre a imagem será comparada ao mosaico digital.

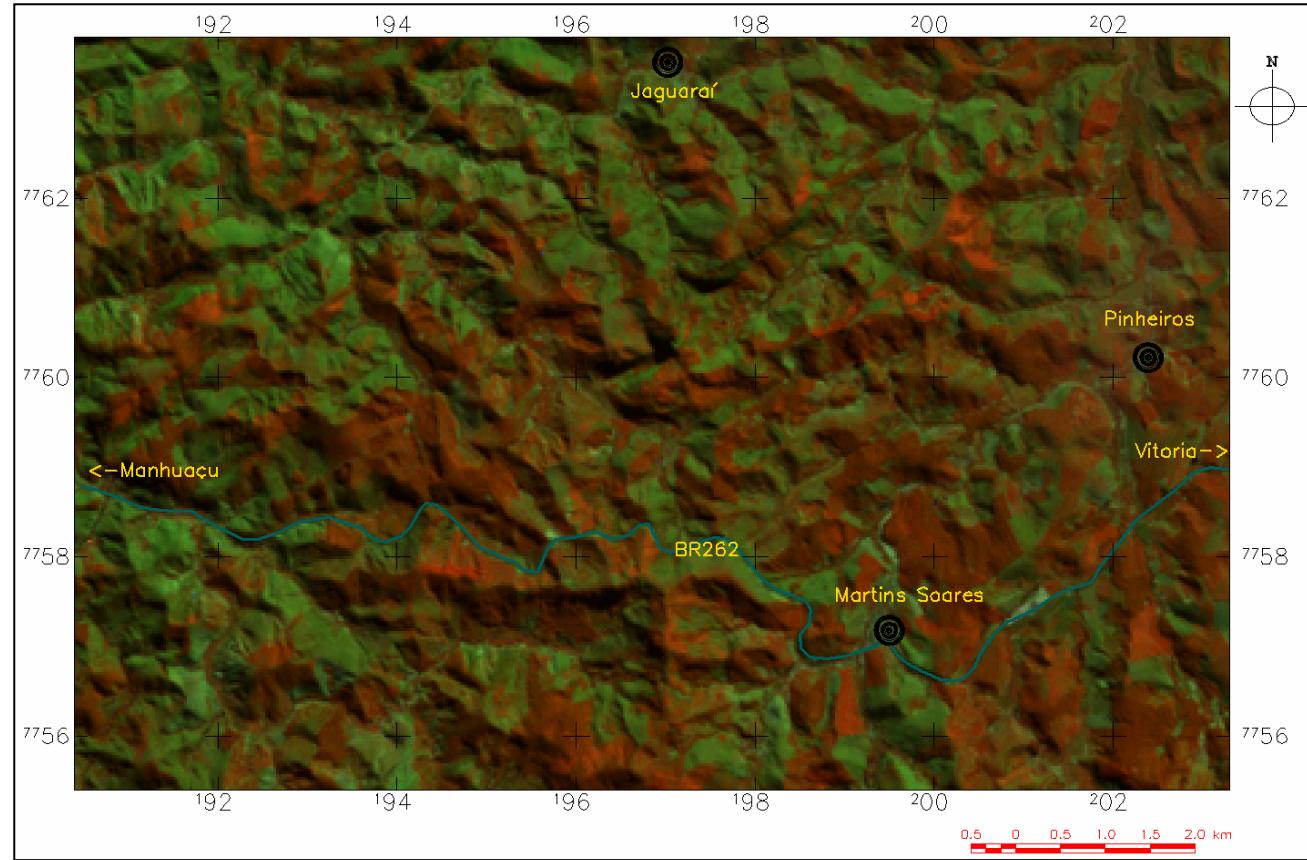


FIGURA 5 – Imagem Landsat ETM+: Composição colorida BRG para as Bandas 3, 4 e 5

#### **4.1.2 Fotointerpretação**

A Figura 6 mostra o resultado da fotointerpretação sobre o mosaico digital, e a Tabela 3, as áreas totais ocupadas por cada uma das classes de uso mapeadas. Observa-se o maior detalhamento das classes de uso e cobertura da terra proporcionado pela escala (1:10.000) do aerolevantamento, que mostra uma maior riqueza de detalhes.

A Figura 7 mostra parte do mosaico digital e limites de algumas classes de uso da terra mapeadas na fotointerpretação. Observa-se, no mosaico, a topografia acidentada da área de estudo e o predomínio de lavouras de café como atividade agrícola. São mostrados, também, remanescentes de áreas de matas intercaladas a lavouras de café, áreas alvo de um dos objetivos deste trabalho, que é a separação destas coberturas. Estes remanescentes de mata são o resultado do desmate para implementação de atividades agropecuárias, principalmente café e pastagem.

TABELA 3– Áreas de uso e cobertura do solo mapeados na fotointerpretação.

<b>Classe</b>	<b>Área</b>	
	<b>(Km<sup>2</sup>)</b>	<b>(%)</b>
Café Produção	19,30	17,8
Café Formação	10,93	10,1
Pastagem	46,53	42,9
Solo Exposto / Pastagem	0,07	0,1
Solo Exposto	0,79	0,7
Mata	20,44	18,9
Rocha Exposta	0,36	0,3
Meio Urbano	0,46	0,4
Solo Exposto / Café Formação	5,30	4,9
Reflorestamento	0,64	0,6
Pastagem especial	3,53	3,3
<b>Total</b>	<b>108,36</b>	<b>100</b>

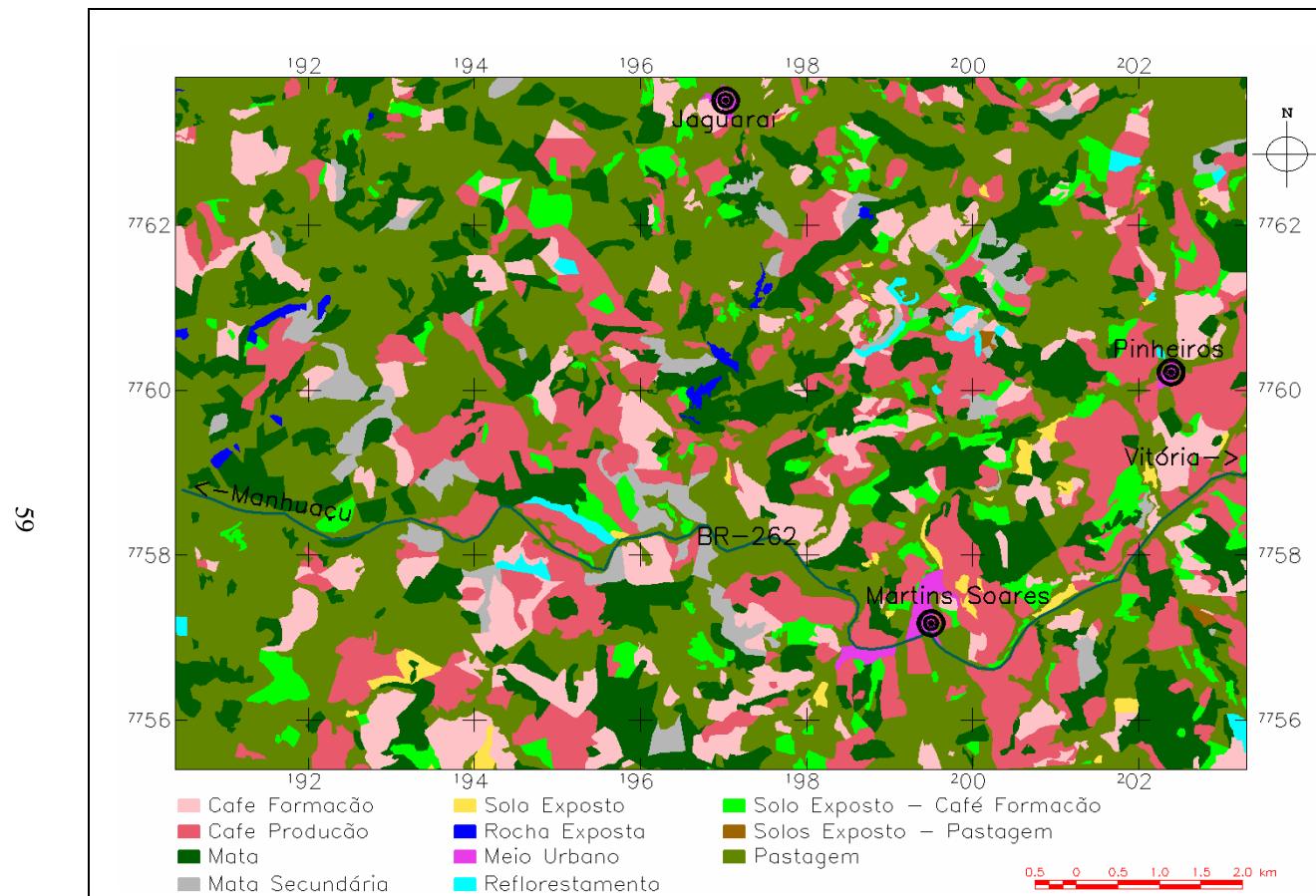


FIGURA 6 – Classes de uso do solo mapeados por fotointerpretação sobre o mosaico digital

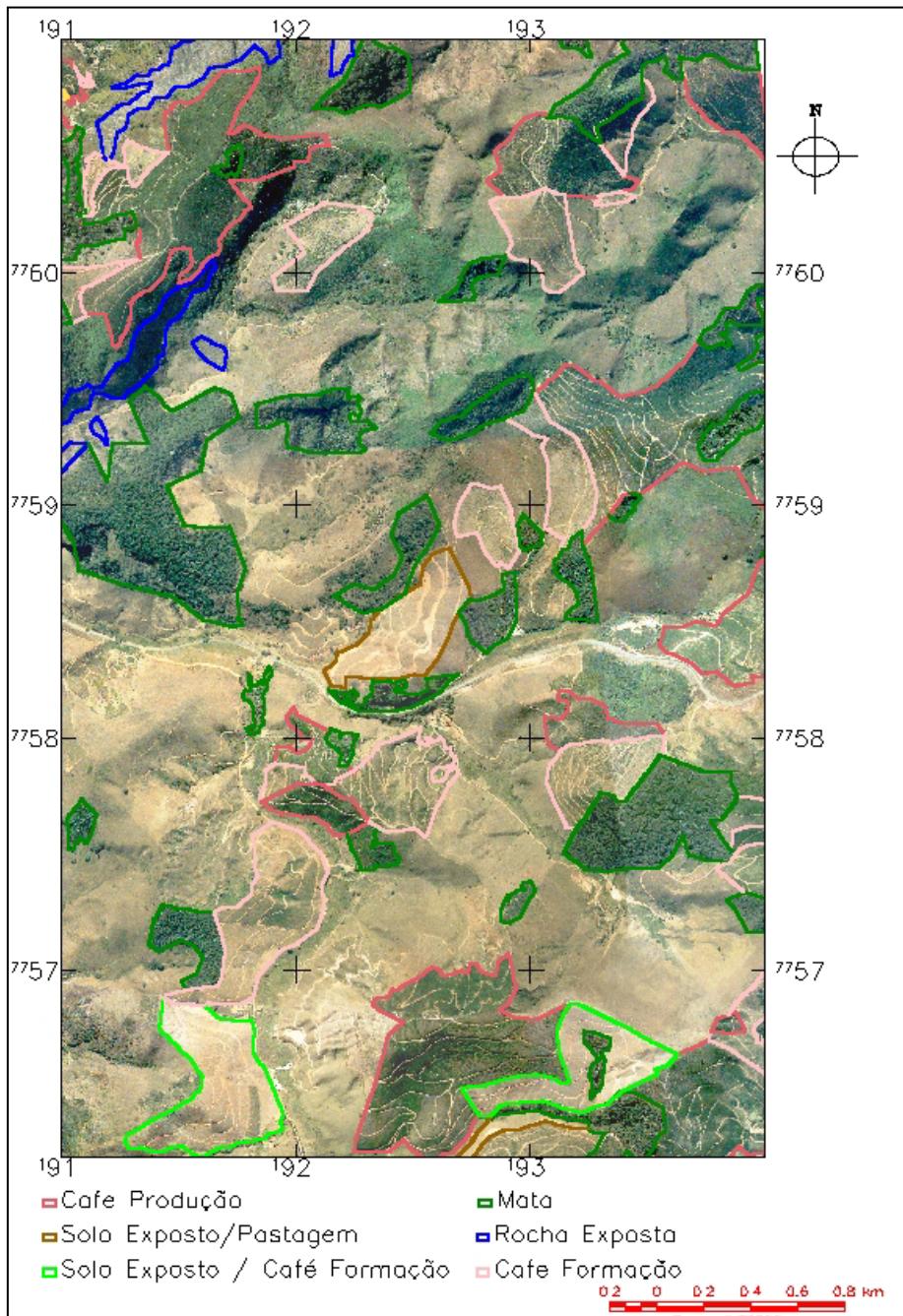


FIGURA 7 – Amostra do mosaico digital e classes de uso da terra

A classe solo exposto / pastagem teve pouca representatividade na fotointerpretação (0,1% de área), sendo, consequentemente, pouco perceptível na Figura 6.

Comparando o mosaico digital das fotografias aéreas à imagem orbital, verifica-se a impossibilidade de extrair desta última todas as classes de uso e cobertura da terra levantadas na fotointerpretação, devido à resolução espacial das imagens. Assim, foram feitas uniões das classes afins como, por exemplo, café formação e produção. Um estudo mais profundo neste sentido foi feito no item 4.3 (Características espectrais da vegetação).

Observa-se ainda, na Figura 6, o predomínio das coberturas Pastagem, Café e Mata, o que também pode ser observado na Tabela 3. As áreas de café mostram-se bastante fragmentadas, entremeadas, principalmente à mata, pastagem e áreas de solo exposto. Este fato deve-se principalmente à topografia acidentada, áreas de rocha exposta e remanescentes de mata. As áreas de café existentes na região demonstram ser uma cultura mais recente, visto que as regiões desmatadas são ocupadas em sua maior parte por pastagem. Assim, antigas áreas desmatadas foram ocupadas por diferentes culturas que não mais existem hoje ou apenas para formação de pastagem. Comparando-se as áreas de café produção (17,8%) com as de café formação mais solo exposto / café formação (15%), observa-se que o uso da terra para a cultura de café quase dobrou nos últimos 1,5 anos, já que este tempo é o diferencial entre café produção e formação.

Quanto às atividades agrícolas, nota-se que café, reflorestamento e pastagem especial correspondem a 36.7% da área em estudo. Áreas aptas a plantio (Pastagem e Solo Exposto), sem considerar qualquer impedimento à atividade agrícola, correspondem a 43.7% da região em estudo. O reflorestamento com pinus e eucalipto é outra atividade agrícola da região em

estudo, apesar do pouco percentual de áreas plantadas, conforme demonstrado na Tabela 3.

A separação de café em formação para café produção foi dificultada em alguns pontos devido ao sombreamento resultante do relevo acidentado. A maior presença de sombra em café formação dificultou a distinção entre esta classe e café em produção. Neste mesmo sentido, o vôo feito em dias diferentes promoveu iluminações também diferenciadas para diversas faixas de fotos. Estes fatos dificultam também a separação entre café produção e café formação e a fotointerpretação de maneira geral devido à diferenciação entre dois pares quaisquer de fotos tirados em dias diferentes. Neste caso, nem o processo de estereoscopia proporcionou melhores condições para a distinção de classes.

As distorções ocorridas nas fotografias aéreas não-convencionais estiveram condicionadas às variações do avião em torno do seu eixo no decorrer da linha de vôo. Como o sistema de fotografia aérea não-convencional não apresenta um mecanismo para compensar oscilações do avião, as fotografias apresentaram distorções consideráveis, o que dificultou a montagem do mosaico e, consequentemente, promoveu erros na digitalização dos limites das classes de uso da terra.

#### **4.1.3 Aerolevantamento**

Durante o processo de georeferenciamento, os aparelhos de GPS apresentaram erros em torno de 4,5 m, em média. Esta diferença foi considerada aceitável, já que o erro esperado para aparelhos do tipo “navegação” é de 15 m. Além do mais, a escala aproximada do aerolevantamento foi de 1:10.000, o que equivale a dizer que o erro do GPS foi menor que 0,5 mm plotado sobre a fotografia.

O *pixel* da imagem do mosaico georeferenciado foi, em média, de 1 m, determinada através da relação da distância entre dois pontos na fotografia e os

mesmos pontos medidos em campo. O aerolevantamento apresentou erros caracterizados pela oscilação vertical e horizontal do avião. Desta forma, o uso de fotografias aéreas não-convencionais, para efeito de mapeamento, foi dificultado devido às distorções provocadas pelas variações de posicionamento do avião na linha de vôo.

## 4.2 SOLOS

### 4.2.1 Geomorfopedologia e Geopedologia

A avaliação dos dados relacionados a solos, geologia e compartimentação geomorfológica da região, associada às informações levantadas em campanhas de campo, permitiram estabelecer um modelo geomorfopedológico. A distribuição das classes de solos está correlacionada com a estruturação geomórfica da região e a variação das mesmas está relacionada à composição química - mineralógica do material de origem. Apesar da área apresentar relevo predominantemente montanhoso, podem-se correlacionar classes de solos desenvolvidos em distintas classes de declividade (relevo) em função da posição na paisagem. O mapa de declividade que originou a modelagem de classes de solo é apresentado na Figura 8. A base da correlação geomorfopedológica estabelecida para toda área de estudo é apresentada na Tabela 4 e o mapa oriundo desta modelagem é apresentado na Figura 9.

A Figura 9 mostra, ainda, o limite da microbacia do Córrego Água Quente, usada para caracterização e validação do modelo de distribuição de solos na paisagem

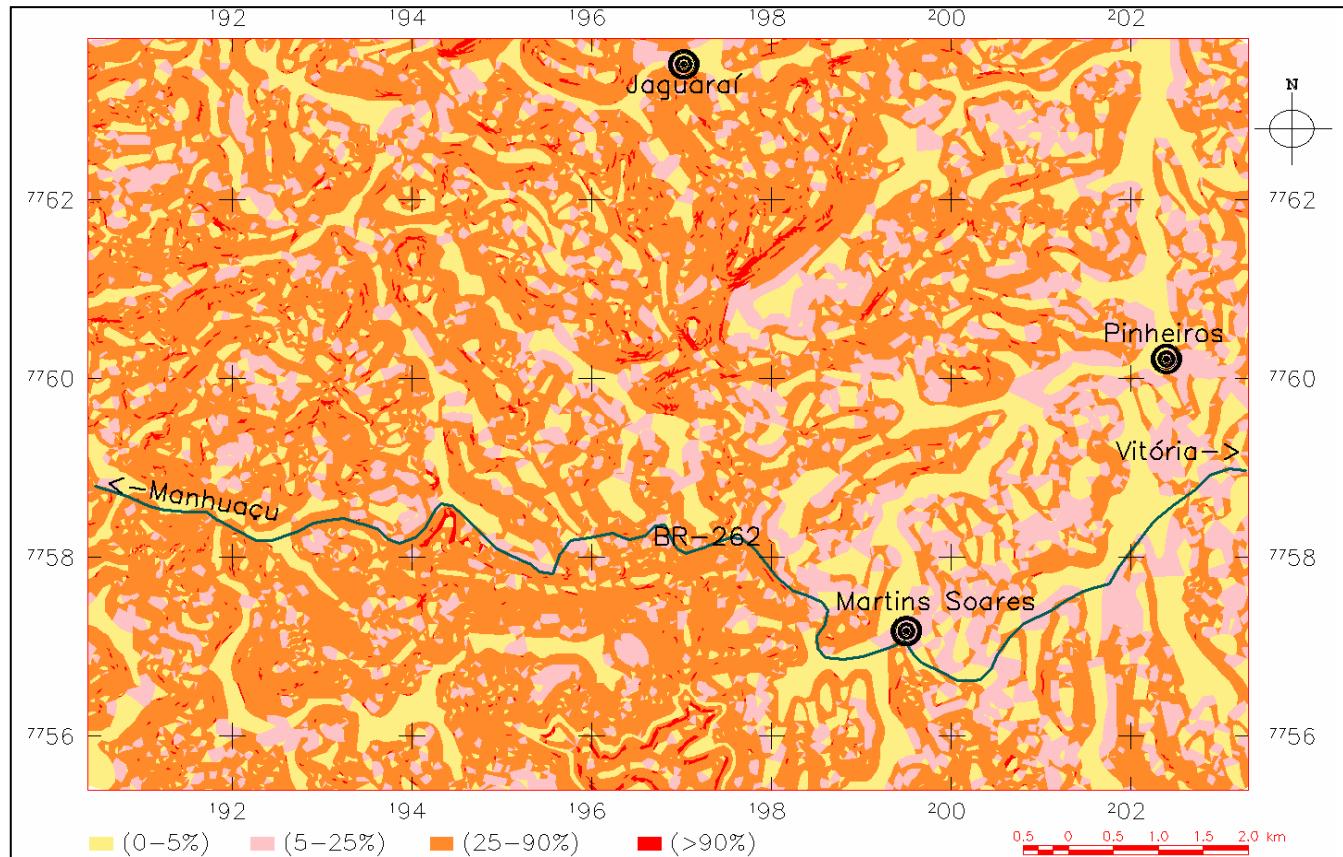


FIGURA 8 – Mapa de declividade

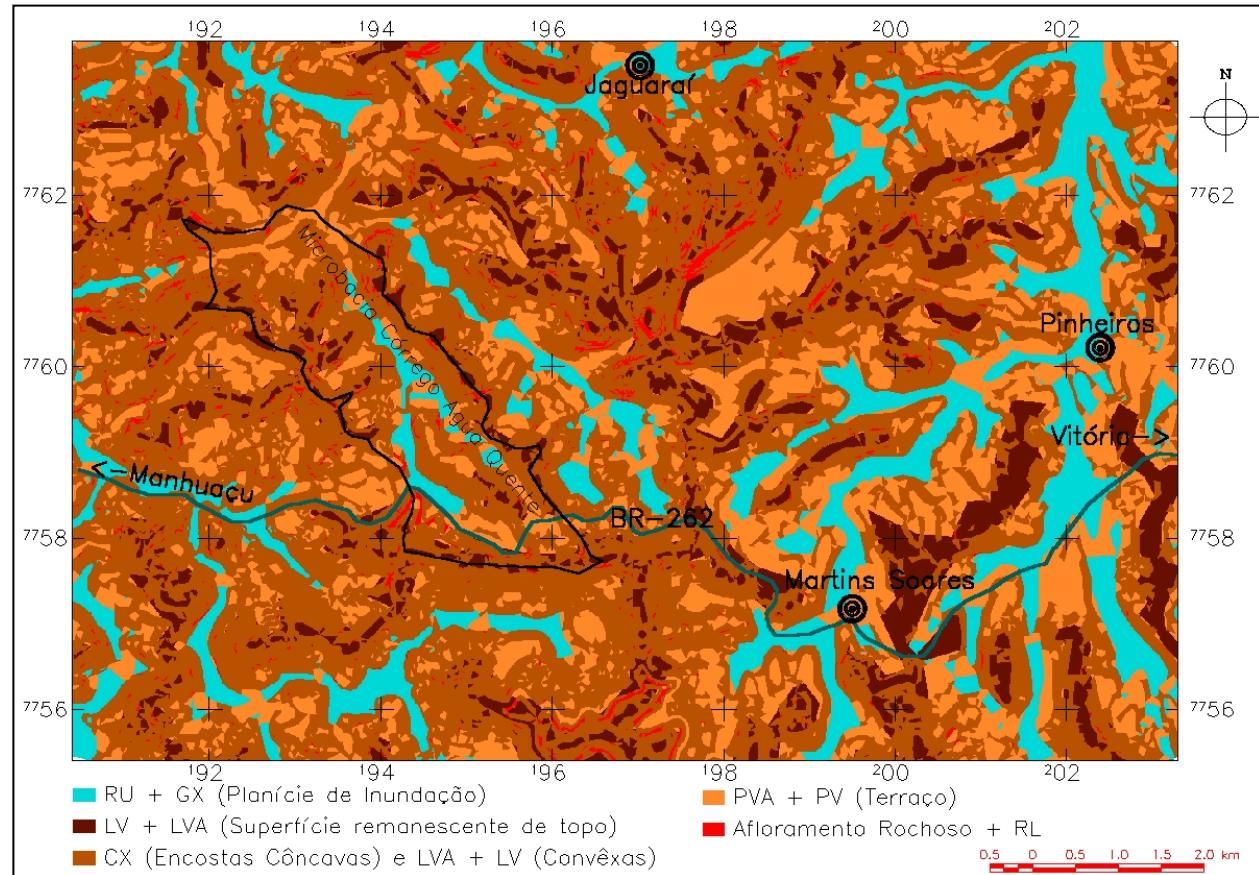


FIGURA 9 - Mapa de solos baseado no modelo geomorfopedológico

TABELA 4 – Correlação geomorfopedológica da área de estudo

<b>Classes de declividade</b>	<b>Unidade geomorfológica</b>	<b>Classes de solos</b>			<b>Área (%)</b>	
0 - 5 %	Planícies de Inundação	NEOSSOLOS GLEISSOLOS HÁPLICOS (GX)	FLÚVICOS (RU)	e	7.0	
5 - 25 %	Terraços	ARGISSOLOS (PVA) e ARGISSOLOS VERMELHOS (PV)	VERMELHO-AMARELOS		27.1	
25 – 90 %	Encostas convexas e côncavas	LATOSSOLOS (LVA), LATOSSOLOS VERMELHOS (LV)	VERMELHO-AMARELOS CAMBISSOLOS HÁPLICOS (CX)	e	54.5	
>90 %	Escarpas	AFLORAMENTOS NEOSSOLOS LITÓLICOS (RL)	ROCHOSOS	E	0.6	
0 - 25 %	Superfície remanescente de topo	LATOSSOLOS (LVA) E LATOSSOLOS VERMELHOS (LV)	VERMELHO-AMARELOS		10.8	

A Figura 8 mostra um predomínio de áreas de encostas (25 a 90%) sobre as demais, caracterizando, assim, o relevo acidentado da área de estudo. Porém, as grandes áreas formadas sobre declive de 0 a 5% e de 5 a 25% demonstram que a região em estudo foi bastante dissecada. As áreas de declividade de 0 a 5% determinam, em sua maioria, o leito maior dos rios, ou seja, regiões ainda sujeitas à inundação. Porém, esta declividade representa também regiões planas remanescentes nos topos. Áreas de declive entre 5 e 25% representam terraços formados nas imediações das superfícies planas sujeitas à inundação. As áreas de declividades acima de 90% são paredões rochosos e/ou escarpas. As declividades usadas para determinar estas áreas foram baseadas na inclinação dos solos presentes na região, de forma a propiciar a modelagem das classes de solos.

No mapa de modelagem para classes de solos (Figura 9), observam-se as áreas mais planas sujeitas à inundação, acompanhando as linhas de drenagem e correspondendo à unidade geomorfológica de Planícies de Inundação. Esta faixa

representa uma associação de NEOSOLOS FLÚVICOS(RU) e GLEISSOLOS HÁPLICOS(GX). Estes solos aparecem no leito maior dos rios, algumas vezes associados entre si (Correia, 1984) e em declividades bem semelhantes, o que dificulta o mapeamento no sentido de estratificá-los como unidades pedológicas diferentes através da metodologia de modelagem usada neste trabalho. Nunes (2001), estudando a relação solo-paisagem na Região da Zona da Mata mineira, constatou a presença de NEOSOLO FLÚVICO (RU) e GLEISSOLO HÁPLICO (GX) nas margens de Rio.

O leito maior dos rios da região não obedece a uma extensão constante, ou seja, a drenagem assume ou não formas encaixadas no decorrer de sua trajetória. Com relação à drenagem não encaixada, Penteado (1980) relata que em situação de clima úmido, o rio pára de escavar verticalmente quando atinge o equilíbrio, proporcionando o recuo das vertentes e o alargamento dos vales, como observado com mais freqüência na parte leste da área estudada, visto nas Figuras 9 e 10. Por outro lado, o mesmo autor diz que as infinitas variedades de declives e tipos de perfis de encostas são devidas à interação de processos de intemperismo, de escorregamento e erosão, fatores litológicos e tectônicos. Estes fatos são bastante evidenciados na área em estudo, o que pode proporcionar uma mudança nas formas de encaixe da drenagem.

Na Figura 9, a unidade geomorfológica Terraços está em uma posição próxima à rede de drenagem ou às superfícies de inundação, mas em condição não mais inundável. O material erodido é depositado nas altitudes menores, contribuindo para o desenvolvimento dos solos nos terraços. Nunes (2001) relatou a presença de ARGISOLOS VERMELHO AMARELOS localizados em amplos terraços às margens do Rio Doce. Na descrição do perfil 2 (PVA), Foto 2, Anexo A, foi observado, abaixo da profundidade de 80 cm, processo de gleização do horizonte o que poderia indicar a formação dos ARGISOLOS em deposição flúvio-lacustre, ou seja, uma sedimentação com água, mas que tinha

um certo escoamento ou um lençol freático mais elevado no passado do que nos dias de hoje.

A área correspondente à unidade geomorfológica de Encostas Côncavas e Convexas mostra a ocorrência de CAMBISSOLOS e LATOSSOLOS em encosta com declividade entre 25 e 90%. As escarpas foram caracterizadas por declividades maior que 90%, com a ocorrência de Afloramento Rochosos e NEOSSOLOS LITÓLICOS.

A ocorrência dos LATOSSOLOS nas encostas convexas, com declividades entre 25 e 90%, provavelmente está relacionada ao rejuvenescimento geomorfológico da região, relativo à tectônica Terciária-Quaternária, que afetou esta área e possivelmente manteve nas encostas, remanescentes de LATOSSOLOS desenvolvidos em uma paleounidade geomórfica aplainada. Os LATOSSOLOS, além de profundos, são fisicamente bem estruturados, o que favorece a sua permanência nas formas convexas das encostas, desenvolvidas durante o dissecamento do relevo. O desenvolvimento de LATOSSOLOS VERMELHO AMARELOS e LATOSSOLOS VERMELHOS apresenta-se condicionado às variações de composição do material origem, sendo o primeiro evoluído a partir de rochas gnáissicas de composição mais ácida da Suíte Barra do Jaguaraí (Moreira, 1997), e o segundo, de rochas gnáissicas miloníticas, enriquecidas em biotita, desta mesma unidade geológica, que ocorrem ao longo das zonas de cisalhamento, relativas à estruturação tectônica da região.

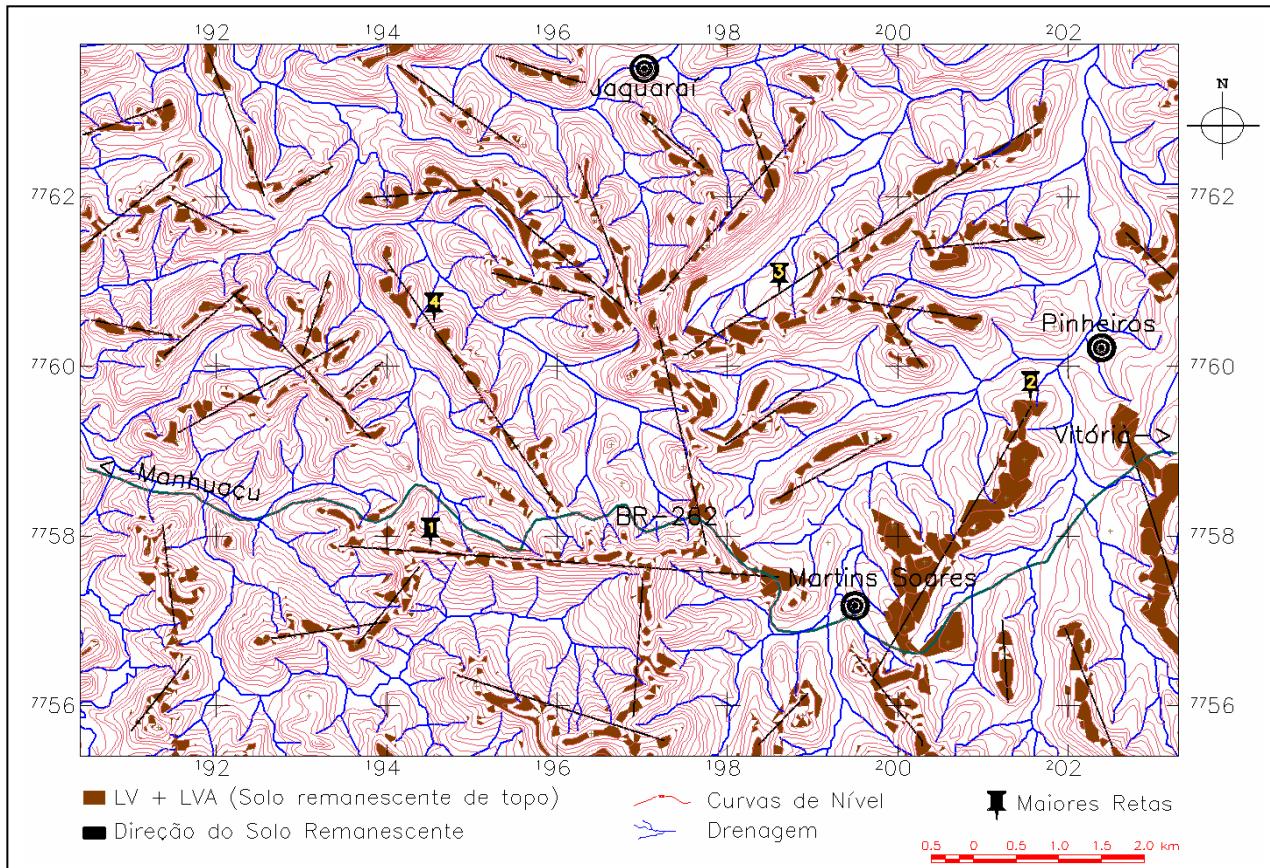


FIGURA 10 - Mapa altimétrico com rede de drenagem e solos remanescentes

Já nas encostas côncavas, verifica-se a ocorrência de CAMBISSOLOS, devido à maior exposição aos agentes erosivos, favorecendo o maior carreamento de material, dando origem a solos bastante rasos com horizontes sub-superficiais delgados. Em climas mais úmidos, porções de superfícies que apresentam algum ponto de fraqueza (mais susceptíveis a erosão) facilitam o escoamento da água, dando início aos drenos. Assim, os materiais mais soltos e intemperizados são carreados pelo sistema de drenagem. Portanto, o aprofundamento da drenagem promove uma maior exposição do material do substrato, gerando solos mais rasos e vertentes de forma mais côncavas. Observa-se, na Figura 10, que as concavidades demonstradas pelas curvas de nível estão marcadas pela presença de drenos, evidenciando estas regiões como as mais propensas à formação de CAMBISSOLOS.

Outro fato relevante na constituição de vertentes e gênese dos solos seria a orientação do material de origem. Chagas et al. (1997), estudando a gênese de LATOSOLOS sobre idênticas condições de relevo, vegetação, clima, material de origem e posição na paisagem, observaram a formação de solos mais rasos ou mais espessos, o que foi justificado pela orientação das camadas do material de origem. As camadas horizontalizadas favorecem a formação de solos menos espessos devido à restrição de drenagem, o que proporciona uma menor intemperização. As camadas inclinadas caracterizam um ambiente relativamente aberto, proporcionando um maior intemperismo e profundidade do solo. Assim, o impedimento à drenagem, contribuindo para formação de solos rasos e um possível soerguimento de blocos ocorridos na região (tectônica), pode ter proporcionado a existência de CAMBISSOLOS aliados a pedoformas côncavas. Apesar de nenhum estudo mais detalhado ter sido feito neste sentido e para este trabalho de pesquisa, Moreira (1997) constatou, na região, xistosidades com mergulhos de 40 a 70°.

Nas Figuras 9 e 10, verifica-se o mapeamento dos solos remanescentes de topo formados em declividade de 0 a 25%. Supõe-se, também, que assim como nos LATOSSOLOS de encosta, a tectônica Terciária-Quaternária manteve, neste posicionamento geomorfológico, remanescentes dos LATOSSOLOS desenvolvidos em uma paleounidade geomórfica aplainada. Ao longo da evolução geomorfológica da região houve um aplainamento, no qual topos ou áreas de maior altitude, por estarem mais expostas às intempéries, foram intemperizadas mais rapidamente que as áreas de menor altitude até que se nivelassem, formando, então, um manto de solo profundo. Paralelamente ao soerguimento dos blocos durante o Terciário e Quaternário houve um processo de intensa dissecação, caracterizado, como já mencionado, pela presença de LATOSSOLOS em encostas com forte declividade, em topos e em sopés de afloramentos rochosos. Outro fato relevante à questão dos solos remanescentes de topo é a possibilidade das áreas menores, identificadas por uma seqüência de picos alinhados, serem CAMBISSOLOS devido ao rejuvenescimento do LATOSSOLO, onde os remanescentes de LATOSSOLO da superfície de topo estariam presentes somente nas áreas maiores. Tais hipóteses, apesar de plausíveis, não foram comprovadas em campo, muitas vezes por dificuldade de acesso aos locais de ocorrência.

A Figura 11 mostra o perfil longitudinal sobre os maiores alinhamentos de topo (demonstrados também pelas retas na Figura 10), ou seja, um corte transversal nestas posições sobre o terreno, representado numa forma tridimensional (MNT). Nas abscissas do gráfico mostrado na figura, tem-se a extensão, em metros, do alinhamento e nas ordenadas a altitude (cota). Observa-se que não houve um nivelamento único de topos. A maioria dos topos que apresentaram nivelamento tendem a estar próximo à cota 872 e entre 815 e 758m. Pode-se explicar este fato por soerguimento diferenciado de blocos e, consequentemente, processos erosivos desiguais.

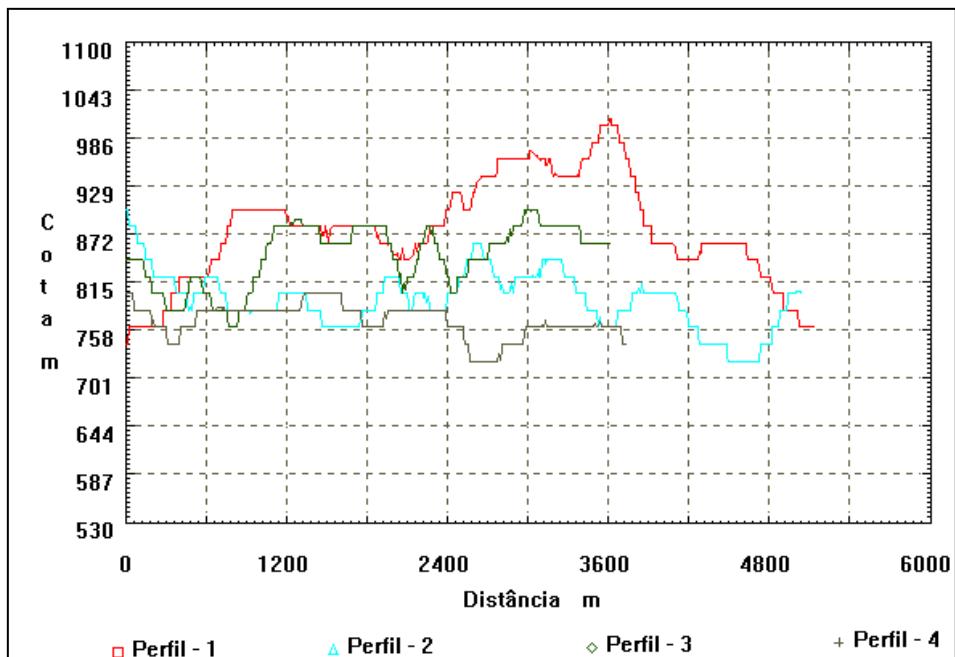


FIGURA 11 – Perfis longitudinais de alinhamento de topos

As linhas mostradas na Figura 10 demonstram a orientação dos topos, podendo indicar a orientação da tectônica Terciária/Quaternária que provocou a movimentação dos blocos e soerguimento tectônico e a subsequente dissecação que originou o relevo atual. Estas linhas estão paralelas às maiores ramificações de drenagem, indicando a instalação da mesma ao longo de zonas estruturais de maior fraqueza (falhas geológicas). Na imagem orbital da área de estudo, Figura 5, percebem-se linhações estruturais correspondendo ao posicionamento da drenagem. Pela classificação genética de Horton (1945), os rios da área devem ser classificados como “subseqüentes”, ou seja, controlados pela estrutura rochosa e acompanhando linhas de fraqueza. As direções concordam com as fraturas geológicas descritas por Moreira (1997), na orientação de ENE-WSW. As orientações mostradas neste projeto apresentaram, em sua maioria, sentido

NNW-SSE, NNE-SSW e, em menores quantidades, sentido WNW-ESE e ENE-WSW. Por outro lado, os alinhamentos apresentados concordam com o alinhamento da xistosidade das rochas aflorantes demonstrado por Moreira (1997). Os alinhamentos mapeados neste trabalho foram marcados por diferentes extensões: os menores com 1 Km, em média, e os maiores, com 5 Km.

Ocorrem, também, afloramentos rochosos nos segmentos geomorfológicos mais soerguidos tectonicamente, originando, nestes locais, morfologia tipo pão-de-açúcar, identificados no mapa de modelo de solos (Figura 9).

#### **4.2.2 Caracterização e detalhamento de solos na microbacia**

Para a definição do modelo de distribuição de solos na paisagem, foi selecionada a microbacia do Córrego Água Quente, considerada uma unidade ambiental representativa da área-piloto, visto que esta envolveu todas as classes de solos e pedoformas existentes na área de estudo. Os perfis representativos de cada unidade foram descritos e amostrados dentro dos limites da microbacia e mostraram que as classes de solos correspondentes a estes perfis tiveram relação direta com a pedoforma. Os perfis 1 e 3, amostrados sobre pedoforma convexa, foram classificados como LATOSSOLOS; o perfil 2, amostrado sobre Terraço, como ARGISSOLO; e o perfil 4, amostrado em pedoforma côncava, como CAMBISSOLO (Anexo A).

A Figura 12 mostra o mapeamento das classes de solos baseados em pedoformas feitos por fotointerpretação dentro da microbacia. A quantificação das áreas de cada pedoforma encontra-se na Tabela 5. Observa-se que as áreas de maior declive (côncava e convexa) correspondem à maior parte das pedoformas dentro da microbacia, com 83%. As áreas de menor declividade representam os outros 17%. Estes números caracterizam a região bastante dissecada, onde há o predomínio das áreas de encostas sobre as planas.

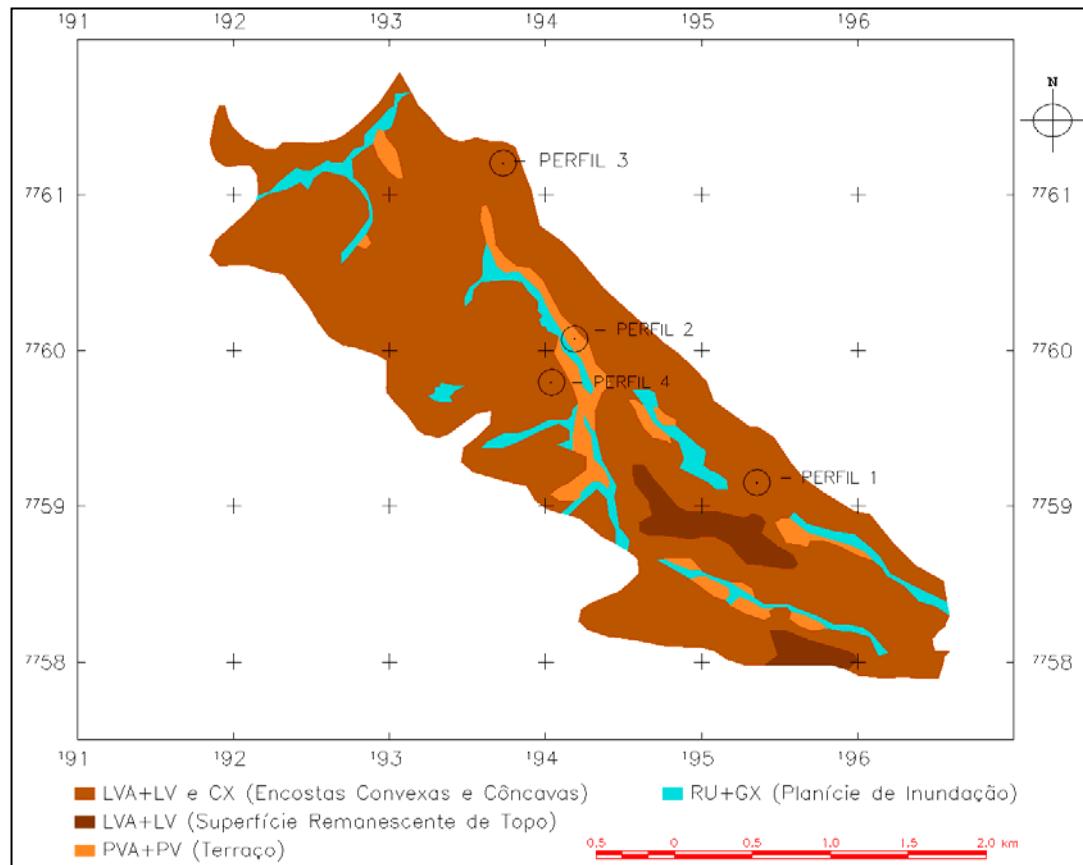


FIGURA 12 - Pedoformas determinadas por fotointerpretação na microbacia do Córrego Água Quente

TABELA 5 – Áreas de pedoformas na microbacia

Classe	Área	
	(Km <sup>2</sup> )	(%)
Côncava	1,71	24,8
Convexa	4,01	58,2
Superfície Remanescente de Topo	0,31	4,5
Planície de Inundação	0,47	6,8
Terraço	0,39	5,7
<b>Total</b>	<b>6,88</b>	<b>100</b>

A intercalação de fotos adjacentes para a fotointerpretação por estereoscopia mostrou dificuldades de encaixe devido a distorções provocadas pelas variações do avião. Tal fato promoveu a variação de escala de uma foto para outra, o que acarretou um maior esforço físico e metodológico para se fazer a fotointerpretação das pedoformas dentro dos limites da microbacia. Parte do erro inserido no processo de fotointerpretação só pode ser retificada após o georreferenciamento que foi baseado em pontos de controle de coordenadas reais levantados dentro do limite da microbacia.

O percentual de área apresentado na Tabela 4 para encostas convexas e côncavas foi inferior ao apresentado na Tabela 5, mas confirma o predomínio de áreas para estes tipos de pedoforma, caracterizando a área em estudo como de relevo acidentado e com predomínio de LATOSSOLOS e CAMBISSOLOS.

Comparando-se o levantamento da microbacia detalhada por fotointerpretação (Figura 12) à mesma microbacia limitada dentro do mapa de solos por modelagem, mostrada na Figura 9, verifica-se que as diferenças apresentadas entre estas áreas devem-se ao fato de que a fotointerpretação feita na microbacia foi em escala cinco vezes superior à usada na modelagem. O modelo geomorfopedológico, validado pelo detalhamento da microbacia, campanha de campo e pelas análises laboratoriais dos solos amostrados, indica uma proximidade do que foi mostrado na Figura 9 ao encontrado no mundo real.

#### **4.2.2.1 Caracterização Química**

A caracterização dos solos para regiões cafeeiras discutidas neste trabalho englobou também a análise química de maneira a informar sobre a fertilidade dos solos da região, bem como conhecer os solos quanto a seu processo de evolução, já que este fato implica na concentração de nutrientes disponibilizados às plantas.

Para comparar os resultados das análises químicas dos solos cultivados ou não com lavouras de café, apresentados na Tabela 6, usaram-se os padrões de fertilidade do solo propostos pela Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (1999)- 5<sup>a</sup> aproximação.

Quanto ao pH, os horizontes superficiais apresentaram acidez média para os solos CX(6,0) e LVA(5,2) e acidez fraca para os solos PVA (6,6) e LV(6,6). O CX, apesar de classificado como de acidez média, esteve no limite para a acidez fraca. O índice de saturação por bases foi classificado como muito bom para as classes LV(87,1) e PVA(86,2), bom para CX(63,7) e muito baixo para LVA (17,8). Isto se deve, provavelmente, aos efeitos de adubação e calagem, visto que o LVA é a única classe de solo em que o perfil foi amostrado em uma área não cultivada com café (Anexo A). Nos horizontes sub-superficiais, o pH (à exceção do horizonte BC do solo CX) apresentou acidez média e elevada. O índice de saturação por bases nos horizontes sub-superficiais estão classificadas com valores de muito baixo a médio. Esses valores de pH e de índice de saturação por base demonstraram o baixo índice de fertilidade em relação às exigências da cultura café devido ao intenso grau de intemperismo destes solos.

Os teores mais elevados de matéria orgânica nos horizontes Ap das classes LV e PVA e horizontes 2Ab das classes PVA e CX proporcionaram um aumento na CTC (T) nestes horizontes.

TABELA 6 – Propriedades químicas dos perfís de solo

Hor.	Prof.	pH H <sub>2</sub> O	P mg.dm <sup>-3</sup>	K	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	SB	(t)	(T)	V %	m	MO dag.kg <sup>-1</sup>
	cm					cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>								
<b>LATOSSOLO VERMELHO – LV</b>														
Ap	0-10	6,6	2,8	36	7,8	2,2	0,0	1,5	10,1	10,1	11,6	87,1	0	5,3
AB	10-35	5,4	0,9	13	1,0	0,4	0,4	4,5	1,4	1,8	5,9	24,1	22	3,0
BA	35-50	5,1	0,9	9	0,4	0,1	0,4	4,5	0,5	0,9	5,0	10,4	43	3,1
Bw1	50-150	4,8	0,4	5	0,4	0,2	0,1	2,6	0,6	0,7	3,2	19,0	14	1,4
Bw2	150-200 <sup>+</sup>	4,7	0,1	3	0,4	0,1	0,8	2,3	0,5	1,3	2,8	18,1	61	1,1
<b>ARGISSOLO VERMELHO AMARELO – PVA</b>														
Ap	0-20	6,6	3,7	55	5,9	2,1	0,0	1,3	8,1	8,1	9,4	86,2	0	2,5
B	20-50	5,3	1,2	11	1,2	1,2	0,5	4,5	2,4	2,9	6,9	35,1	17	1,6
2Ab	50-80	5,0	0,4	9	0,6	0,2	1,4	8,8	0,8	2,2	9,6	8,5	63	2,2
Bg	80-100 <sup>+</sup>	4,9	0,6	9	0,7	0,2	0,9	5,0	0,9	1,8	5,9	15,5	49	1,1

...continua...

TABELA 6, Cont.

Hor.	Prof.	pH	P	K	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	SB	(t)	(T)	V	m	MO	
	Cm	H <sub>2</sub> O	mg.dm <sup>-3</sup>				cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>					%	dag.kg <sup>-1</sup>		
<b>LATOSSOLO VERMELHO AMARELO – LVA</b>															
Ap	0-10	5,2	0,6	72	0,7	0,2	0,8	5,0	1,1	1,9	6,1	17,8	43	2,0	
A2	10-60	5,1	0,6	52	0,5	0,2	0,9	5,0	0,8	1,7	5,8	14,2	52	1,5	
A3	60-100	5,2	0,4	6	0,4	0,2	0,7	4,5	0,6	1,3	5,1	12,1	53	1,2	
Bw	100-160 <sup>+</sup>	5,1	0,1	8	0,4	0,1	0,3	2,6	0,5	0,8	3,1	16,7	37	0,6	
<b>CAMBISSOLO HÁPLICO – CX</b>															
82	Ap	0-5	6,0	1,4	172	2,0	0,9	0,1	1,9	3,3	3,4	5,2	63,7	3	2,0
	Bi	5-40	5,4	0,9	81	0,7	0,2	0,4	2,3	1,1	1,5	3,4	32,6	26	1,0
	BC	40-80	6,3	0,9	214	0,4	0,2	0,2	1,7	1,1	1,3	2,9	40,4	15	0,6
	2Ab	80-90	5,2	0,6	42	0,4	0,1	1,4	8,8	0,6	2,0	9,4	6,5	70	3,4
	B	90-115	5,2	0,4	44	0,3	0,1	0,7	2,3	0,5	1,2	2,8	18,1	58	0,5
	BCg	115-150 <sup>+</sup>	4,9	0,4	70	0,4	0,1	0,6	1,7	0,7	1,3	2,4	28,6	47	0,2

Segundo Resende & Rezende (1983) e Correa (1984), os solos dos terraços não mais inundáveis ao longo dos rios da Zona da Mata constituem um exemplo de conservação de nutrientes quando apresentam relevo plano. O solo de terraço (PVA) aqui analisado demonstrou classificação baixa a muito baixa no índice de saturação por bases(V) em todos os seus horizontes, à exceção do horizonte Ap. Tal fato pode ser explicado pela pobreza do material de origem, ou seja, os terraços foram formados a partir de material de solo já bem intemperizado. O declive dos terraços no local também pode ter favorecido uma menor concentração de nutrientes visto que, em alguns casos, a inclinação foi até de 15%. Por outro lado, se analisarmos o horizonte B de todas as classes de solos, nota-se que o PVA apresentou a melhor saturação por bases (V), o que pode indicar uma maior conservação de nutrientes desta classe de solos em relação às demais. Nunes (2001) encontrou fertilidade mais elevada em solos PVA da Zona da Mata em relação aos outros, justificada pela ocorrência destes solos em ambientes tipicamente concentradores de nutrientes, o que também não foi visto nos resultados das análises apresentadas neste trabalho.

No CAMBISSOLO, a quantificação de nutrientes demonstra o que foi citado por Resende et al. (1988), segundo os quais os CAMBISSOLOS Distróficos de relevo acidentado, além de possuírem um “solum” muito raso e um horizonte C muito profundo, são pouco conservadores de nutrientes.

#### **4.2.2.2 Caracterização Física**

Os resultados das análises dos quatro perfis representativos descritos encontram-se na Tabela 7.

TABELA 7 – Características físicas dos perfis de solos

Hor.	Prof.	Areia	Silte	Argila	Silte / Argila	Classe Textural
	Cm	dag.kg <sup>-1</sup>				
<b>LATOSSOLO VERMELHO - LV</b>						
A	0-10	37	20	43	0,47	Argilosa
AB	10-35	27	14	59	0,24	Argilosa
BA	35-50	27	10	63	0,16	Muito Argilosa
Bw1	50-150	26	3	71	0,04	Muito Argilosa
Bw2	150-200 <sup>+</sup>	24	3	73	0,04	Muito Argilosa
<b>ARGISSOLO VERMELHO AMARELO - PVA</b>						
Ap	0-20	48	13	31	0,42	Argilosa
Bt	20-50	29	10	61	0,16	Muito Argilosa
2Ab	50-80	25	8	67	0,12	Muito Argilosa
Bg	80-100 <sup>+</sup>	31	9	60	0,15	Argilosa
<b>LATOSSOLO VERMELHO AMARELO – LVA</b>						
Ap	0-10	41	14	45	0,31	Argilosa
A2	10-60	48	13	39	0,33	Argilosa
A3	60-100	40	10	50	0,20	Argilosa
Bw	100-160 <sup>+</sup>	43	8	49	0,16	Argilosa

... continua ...

TABELA 7 – Cont.

Hor.	Prof.	Areia	Silte	Argila	Silte / Argila	Classe Textural
	cm	dag.kg <sup>-1</sup>				
<b>CAMBISSOLO HÁPLICO - CX</b>						
Ap	0-5	45	24	31	0,77	Textura Média
Bi	5-40	34	29	37	0,78	Argilosa
BC	40-80	50	27	23	1,17	Textura Média
2Ab	80-90	33	36	31	1,16	Textura Média
B	90-115	31	43	26	1,65	Textura Média
BC	115-150 <sup>+</sup>	28	53	19	2,79	Textura Média

No PVA houve um aumento gradativo de argila até os 80 cm (Horizonte 2Ab). A partir daí, o percentual diminuiu, coincidindo com a presença de gleização. Observa-se o translocamento de argila do horizonte Ap para o Bt pela diferença textural entre estes horizontes, o que os caracterizou como Argissolos. Já os percentuais de argila encontrados nos horizontes Ab e Bg já podiam estar presentes na textura destes horizontes antes do processo de coluviação. No CX, somente os horizontes enterrados mantêm uma continuidade das frações granulométrica à medida que a profundidade aumenta no perfil: percentuais de argila decrescem e de silte aumentam, demonstrando um menor grau de evolução destes solos. Contrariamente, o LV apresenta crescimento contínuo de argila e decréscimo de silte em profundidade, indicando um maior grau de intemperismo deste solo. Já a descontinuidade granulométrica dos horizontes (não soterrados) no CX pode estar ligada também à menor evolução destes solos, já que esses são formados da ação coluvional em Eras geológicas mais recentes. Observa-se, ainda, que o horizonte Bi apresentou uma maior

quantidade de argila em relação ao Ap e BC, o que poderia estar indicando um estágio de evolução deste solo para um ARGISSOLO. No LVA, à exceção do horizonte Ap, que teve influência antrópica, os percentuais de argila tiveram um aumento e depois uma tendência de se manterem constantes, conforme descrição de EMBRAPA (1999).

O percentual de argila nos horizontes dos perfis pode ser relacionado ao grau de intemperismo do solo em estudo. Segundo Lacerda (1999), a classificação textural pode ser reflexo do material de origem e do estágio de evolução do solo. Neste sentido, Silva et al. (1991) e Nunes et al. (2001) relatam que a existência de solos muito argilosos confirma a potencialidade do material de origem, gnaisses finos e anfibolitos no caso em questão, em fornecer quantidades substanciais de argila como produto do intemperismo. Neste sentido, observa-se que os percentuais de argila do LVA foram bem menores que os do LV, e os de areia, maiores, o que se justifica pelo fato de que, na região estudada, os solos LV e LVA foram originados de gnaisses mesocráticos e leucocráticos, respectivamente. Os gnaisses leucocráticos possuem predomínio de minerais mais resistentes ao intemperismo químico, como o quartzo e o feldspato potássico. Assim, a maior proporção de areia e menor de argila do LVA em relação ao LV pode estar relacionada à maior quantidade de minerais mais resistentes ao intemperismo presentes nos gnaisses leucocráticos (Marques Junior et al., 1992). No CX, observa-se uma maior tendência da fração areia nos horizontes não soterrados, indicando que o colúvio pode ter sido originado de solos que apresentavam minerais mais resistentes ao intemperismo.

A estrutura forte em blocos e de consistência dura a extremamente dura nos horizontes A e B do solo PVA deve-se ao fato de estes possuírem uma textura argilosa a muito argilosa e, provavelmente, estarem submetidos a ciclos de umedecimento e secagem quando em meio conservador de umidade (Moniz, 1980). Esta umidade é devida à posição geográfica dos terraços, que estão

próximo aos solos NEOSSOLOS FLÚVICOS e GLEISSOLOS HÁPLICOS, o que proporcionou gleização a uma profundidade de 80 cm no perfil descrito (descrição de perfil 3 e foto 2 – Anexo A).

Das classes de solo analisadas, somente o CAMBISSOLO apresentou o valor da relação silte/argila superior a 0,7 para todas as profundidades, o que o caracteriza como o solo menos intemperizado. Os demais apresentaram valores da relação silte/argila abaixo de 0,50. Os horizontes Bw1 e Bw2 do LATOSSOLO VERMELHO apresentaram valores de 0,04, o que demonstra o alto grau de evolução e intemperismo deste solo. A relação silte/argila, segundo Van Wambeke (1962), funciona como subsídio para distinção de diferentes estágios de intemperismo, uma vez que o avanço do intemperismo caracteriza-se pela transformação das partículas mais grosseiras em mais finas. Há que se ressaltar que, na região, os CAMBISSOLOS são geralmente originados dos LATOSSOLOS por erosão e remoção do horizonte B.

De acordo com a espessura medida nos perfis, o “solum” é bastante profundo para os solos LATOSSOLO VERMELHO(LV) e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO (LVA) e pouco espesso para o ARGISSOLO VERMELHO AMARELO (PVA) e CAMBISSOLO HÁPLICO (CX). Os perfis de solo das classes PVA e CX mostraram camadas enterradas. No caso do CAMBISSOLO HÁPLICO, a camada enterrada apresentou um “solum” de pequena espessura, provavelmente um outro CAMBISSOLO, devido ao horizonte B (enterrado)<50cm. No ARGISSOLO, o “solum” enterrado era de grande espessura, demonstrando a ocorrência de um solo mais antigo e intemperizado. O material por colúvio que deu origem a estes solos pode estar ligado, principalmente, a variações climáticas ao longo das Eras geológicas, incrementadas por processos erosivos atuais em função da topografia, do clima e do desmate de florestas.

#### **4.2.3 Reflectância espectral dos solos**

Neste trabalho não há um maior detalhamento que possibilite quantificar o percentual de Fe, mineralogia da fração argila e umidade do solo. Portanto, não há como inferir com certeza sobre o que caracterizou a reflectância dos solos numa posição específica da paisagem. Houve, assim, uma tentativa de justificar o comportamento da reflectância do solo com base em evidências de suas características intrínsecas ou de compostos agregados a ele.

A relação da banda 3 (vermelho) com a 4 (infravermelho-próximo) demonstrou a tendência de as reflectâncias formarem um alinhamento crescente, chamado de linha de referência de solo, representado pelas retas nas Figuras 13 e 14, conforme demonstrado também nos trabalhos de Biard & Baret (1997) e Belward (1991). Segundo este ultimo autor, existe uma relação para reflectâncias do solo entre qualquer par de comprimento de onda. Assim, se o solo tem relativamente alta reflectância no visível, no infravermelho-próximo será também alta, e vice versa. Mausel et al. (1994) relataram que muitos minerais no solo são relativamente refletidos na faixa do visível e infravermelho.

Os valores que originaram o gráfico de reflectância espectral dos solos (Figuras 13 e 14) foram levantados a partir da amostragem de reflectâncias nas bandas 3 e 4 para solo exposto, em pedoformas de encosta convexa e côncava, superfície remanescente de topo, planícies de inundação e terraço, que foram relacionadas às classes de solo conforme descrito na Tabela 4. A Figura 13 demonstrou similaridade ao apresentado por Galvão et al. (2001), mas não com nitidez a ponto de apresentar uma distinção entre os albedos, o que pode ser justificado pela pequena quantidade de pontos amostradas neste trabalho e por limitação de recursos disponibilizados de software. A Figura 14 mostra as linhas de referência de solo para as classes mostradas nas Figura 13 de forma separada.

58

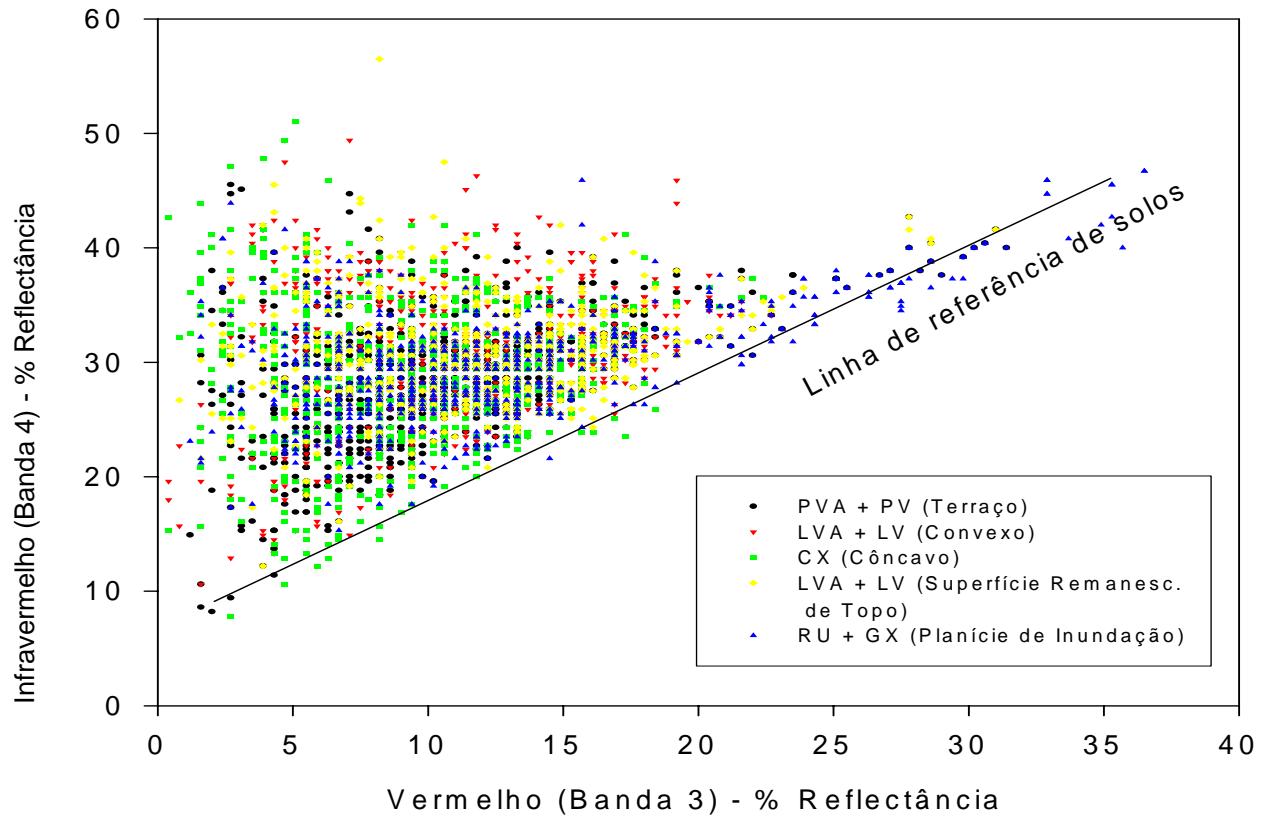


FIGURA 13 - Reflectância espectral dos solos

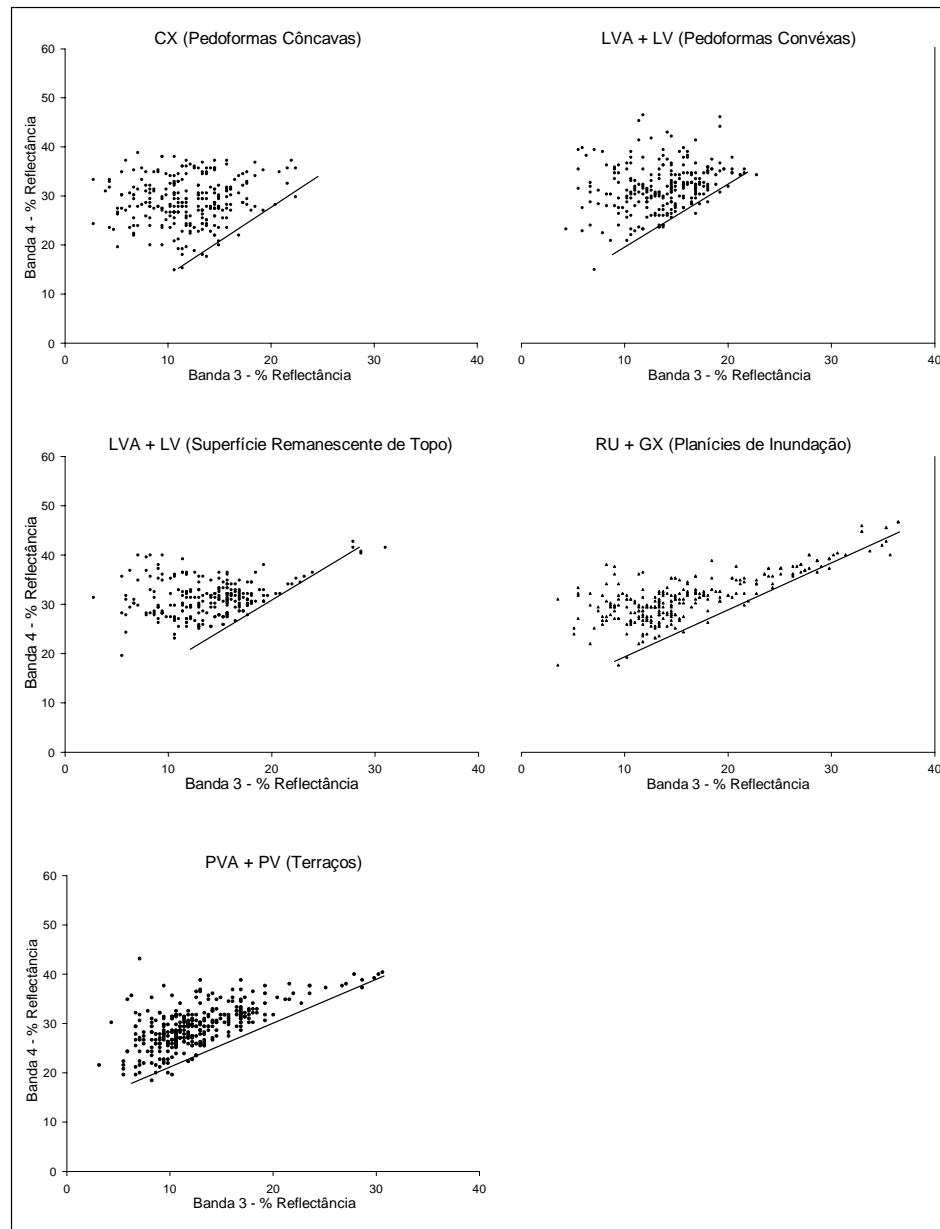


FIGURA 14 – Reflectância espectral dos solos separada por classes

A concentração de pontos formada acima da linha de referência de solo, na metade esquerda das Figuras 13 e 14, pode representar pixels com grande interferência de vegetação. A amostragem para estes solos foi feita em áreas com predomínio de solo exposto, mas com algum percentual de cobertura vegetal. Galvão et al. (2001) demonstraram, em seu trabalho, que a parte superior desta nuvem de pontos representa a vegetação verde e a vegetação não-fotossinteticamente ativa.

Ao longo da linha de referência de solo, a tendência é demonstrar, na parte inferior, solos de baixa reflectância, e na parte superior, os de maior reflectância. Os valores de reflectância plotados na Figura 13 e 14 não demonstraram predomínio de pontos que representem uma unidade geomorfológica em uma posição específica ao longo da linha de referência dos solos, o que pode ser explicado pela ação homogeneizadora nas características físicas, químicas, morfológicas e, principalmente, mineralógicas provocadas pelo intemperismo e retrabalhamento de material na região, conforme demonstrado por Nunes (2001), Fernandes (1996) e Corrêa (1984). A reflectância do solo vai depender principalmente do percentual de umidade, matéria orgânica, textura e constituição mineralógica.

As reflectâncias dos solos RU e GX, em áreas de planície de inundação e de PV e PVA em terraço, distribuem-se por quase toda a reta representativa do alinhamento de reflectância de solos, excetuando-se o extremo superior, com predomínio de RU e GX, e do extremo inferior, com predomínio de PV e PVA. As representações para reflectâncias de solos LV e LVA para encostas convexas e de CX para encostas côncavas estão ligeiramente concentradas na metade inferior do alinhamento, e as reflectâncias dos solos LV e LVA para a superfície remanescente de topo, na parte central do alinhamento.

A concentração de pontos de reflectância dos solos RU e GX que estão concentrados na parte superior do alinhamento de referencia de solos (Figura

13), pode ser explicada por uma possível concentração de minerais claros mais resistentes ao intemperismo, tais como quartzo e feldspato potássico, principalmente em praias fluviais, às margens dos rios, onde a drenagem é menos encaixada. Justifica-se também pela redução de ferro ocorrida nestes ambientes devido à presença de água. A maior presença de quartzo e feldspato potássico no solo tende a aumentar a reflectância. Por outro lado, solos com a presença de óxidos de ferro tendem a refletir menos luz (Galvão et al., 2001; Demattê, 1999; e Fomaggio et al., 1996).

Segundo Demattê(1999), solos mais argilosos podem apresentar baixa reflectância em função da maior retenção de água. Solos muito úmidos tendem a ter baixa reflectância, conforme demonstrado por Belward (1991). Tais fatos podem explicar a presença de baixos valores de reflectância para PV e PVA (Terraço) no extremo inferior do alinhamento de referência dos solos, já que estes apresentam textura argilosa a muito argilosa e gleização das camadas subsuperficiais a partir dos 80cm de profundidade (Anexo A, Perfil 2).

Os valores de reflectância dos solos LV e LVA para superfície remanescente de topo estão localizados na linha de solos, numa posição pouco acima dos solos CX e de LV e LVA de pedoformas de encostas convexas. Solos da superfície remanescente de topo têm incidência de raios solares a maior parte do dia, o que não acontece com os de pedoformas de encostas côncavas e convexas por estarem sujeitas a sombras devido à topografia altamente acidentada. Assim, valores de reflectância para os solos de superfície remanescente de topo podem ser mais elevados em relação aos de encostas convexas e côncavas por questão de iluminação solar. Outra justificativa seria um possível predomínio de LVA sobre LV na superfície remanescente de topo. A cor mais clara e a menor quantidade de minerais opacos presentes nos LVA proporcionam a estes uma maior reflectância. O fato de os solos CX e de LV e LVA de pedoformas convexas estarem juntos na linha de referência dos solos

pode ser explicado, também, pelo processo de homogeneização ocorrido nestes solos durante sua história de formação, o que proporcionou, como citado anteriormente, uma similaridade física, química, morfológicas e mineralógica destes solos.

A Figura 15 apresenta as curvas espectrais para valores médios de reflectância de solos amostrados nas diferentes pedoformas associadas às classes de solos do ambiente. As curvas apresentadas na Figura 15 foram originadas da Tabela 8. Estas curvas não apresentaram as concavidades de absorção por minerais, conforme mostrado nas Figuras 1. O Landsat é um sistema de banda larga, o que não permite a percepção de absorção em bandas espectrais estreitas. Quanto mais estreita for a largura da banda espectral, mais precisa será a determinação da feição de absorção do mineral.

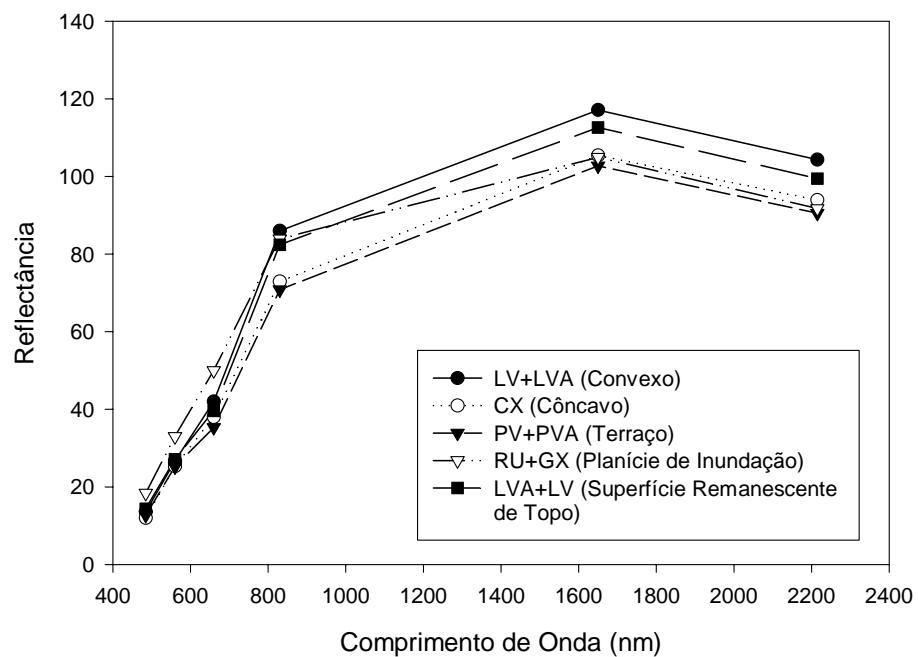


FIGURA 15 – Curvas espectrais de solos

TABELA 8 - Valores de média e desvio padrão (D.P.) de reflectância de solos

BANDA	LVA e LV (convexo)		CX (côncavo)		PVA e PV (terraço)		PVA e PV (Planície de inundação)		LVA e LV (Sup. Rem. de Topo)	
	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
B1	13,6	4,2	12,0	2,2	12,7	4,1	18,4	13,4	14,4	3,7
B2	26,7	4,5	25,3	2,7	25,2	4,4	33,0	15,0	27,1	3,0
B3	42,0	8,4	38,0	5,8	35,3	8,4	50,0	24,7	39,6	4,9
B4	86,0	10,1	72,9	9,6	70,8	11,4	83,9	19,7	82,4	6,1
B5	117,1	16,1	105,4	14,3	102,7	16,8	104,9	28,4	112,6	16,3
B7	104,3	15,0	93,9	14,5	90,5	19,3	91,7	33,3	99,4	20,9

Nota-se, na Figura 15, uma certa similaridade entre as curvas espectrais nas diferentes classes de solo, o que também pode ser observado pela média e pelo desvio padrão de cada classe de solo e para cada banda, conforme demonstrado na Tabela 8. Esta similaridade pode, também, estar relacionada à homogeneidade das características físicas, químicas, morfológicas e mineralógicas dos solos. Conforme discutido no item Geomorfopedologia e Geopedologia, os LATOSSOLOS eram os solos predominantes da região, desenvolvidos de uma paleounidade geomórfica aplainada. A partir de linhas de fraqueza (mais susceptíveis a erosão), houve a presença de drenos que promoveram um processo erosivo e, consequentemente, uma exposição maior do material de origem, resultando em solos mais rasos, como os CAMBISSOLOS. O material erodido de solos em altitudes maiores foi depositado em altitudes menores, contribuindo para a formação dos ARGISSOLOS. Tais fatos explicam a similaridade destes solos, visto que estes são originados a partir de um mesmo material de origem. Observa-se que esta similaridade é mais pronunciada entre LATOSSOLOS das encostas convexas e superfície remanescente de topo e entre CAMBISSOLOS de encostas convexas e ARGISSOLOS dos terraços. A curva para a planície de inundação foi a que

mais se diferenciou entre todas. Tal fato é justificado pela própria constituição dos solos na planície de inundação, como, por exemplo, os NEOSSOLOS FLÚVICOS, que são caracterizados pela variabilidade na sua pedogênese.

As curvas espectrais para os LATOSSOLOS de pedoforma Convexo e de Superfície Remanescente de Topo tiveram uma inversão com a curva dos solos RU e GX a partir da banda 4 (760-900nm). Este fato pode estar relacionado a uma melhor drenagem existente nos ambientes de pedoforma covexa, já que nestas a tendência é de encontrar LATOSSOLOS, ou seja, solos profundos e com grande permeabilidade. Esta melhor drenagem pode ter proporcionado, a partir da banda 4, maiores reflectâncias de solo para pedoforma convexa em relação aos de planície de inundação. Outro fato a ser considerado é que, conforme observado na nuvem de pontos acima da linha de reflectância de solos (Figura 13 e 14), as amostras de solos podem apresentar um percentual maior de vegetação verde para os LATOSSOLOS (pedoformas de encosta convexa e superfícies remanescentes de topo). Este fato pode ter aumentado a reflectância dos solos para estas classes a partir da banda 4, que reflete melhor a vegetação. Há que se considerar também que, segundo Demattê (1999), os óxidos de ferro hematita e goethita possuem baixa reflectância entre 450 e 700 nm, o que abrange as bandas 1, 2 e 3 (Figura 15). Já na faixa de 760 e 900 nm, intervalo que abrange a banda 4, estes óxidos apresentam alta reflectância. Tais fatos podem ser notados na Figura 15, em que as reflectâncias de LATOSSOLOS apresentavam baixos percentuais nas bandas 1, 2 e 3, passando a ter uma elevação na banda 4, indicando, portanto, uma possível influência de hematita e goetita. Estes óxidos de ferro podem, também, comprovar a similaridade entre Latossolos das encostas convexas e superfície remanescente de topo, já que a hematita e a goetita são características comuns destes solos.

A similaridade entre as respostas espectrais dos CAMBISSOLOS E ARGISSOLOS mostradas na Figura 15 pode ser explicada pela

geomorfopedogênese. Os ARGISSOLOS são formados em locais próximos às linhas de drenagem e geralmente dentro de grandes concavidades resultantes da dissecação aluvionar (Figuras 9 e 10). O material carreado pela dissecação das áreas de encostas côncavas tende a ser depositado em altitudes menores, contribuindo na formação dos terraços. Assim, estes solos podem ter composição mineralógica parecida, justificando esta similaridade. Outra questão é com relação à drenagem. Ao contrário do que acontece nos LATOSOLOS, os CAMBISSOLOS e ARGISSOLOS apresentam pior drenagem. Os CAMBISSOLOS podem ter os horizontes subsuperficiais com estrutura em blocos, o que pode causar um ajuste face a face, dificultando a passagem de água. Os ARGISSOLOS, como já comentado, parecem estar formados sobre ambientes úmidos, próximos às linhas de drenagem. Assim, ambientes mais úmidos proporcionam menor reflectância, como demonstrado na Figura 15.

Com exceção da curva de reflectância dos solos RU e GX, os demais têm intensidades de reflectância menores entre as bandas 1 e 2. Demattê (1999) explica este fato pela presença de ferro e matéria orgânica. Segundo este autor, a atuação do Fe é mais forte nas bandas 1, 2, 3 (absorção) e 4 (reflexão). Já a curva dos solos RU e GX demonstra o que foi discutido anteriormente em relação às Figuras 13 e 14, ou seja, solos de textura média ou uma presença maior de quartzo nos horizontes superficiais, o que pode ter proporcionado uma maior reflectância nas bandas 1, 2 e 3.

### **4.3 CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DA VEGETAÇÃO**

A Figura 16 mostra as curvas de valores médios de reflectância para as seguintes coberturas vegetais: café produção, mata, pastagem especial, café-formação e pastagem individualizadas em áreas sombreadas e áreas iluminadas, já que, em áreas de topografia acidentada, a iluminação do sol proporciona estes dois ambientes. Uma mesma lavoura posicionada nestes dois ambientes pode ter resposta espectral diferente em cada um deles, havendo, então, a necessidade de caracterizá-los de maneira distinta. As coberturas vegetais levantadas corresponderam aos principais tipos de uso da terra encontrados na área de estudo. Nota-se, conforme relatado por vários autores (Mausel et al., 1994 e Shimabukuro et al., 1991), uma distinção entre a região do espectro eletromagnético do visível e infravermelho. A reflectância na região do visível (bandas 1, 2 e 3) é baixa devido à grande absorção da luz nesta faixa do espectro eletromagnético pela clorofila e outros pigmentos da planta. Já no infravermelho próximo (banda 4), acontece o espalhamento da luz, determinado pela constituição estrutural das folhas, resultando em absorção mínima, alta transmitância e alta reflectância da luz. O predomínio do efeito absorção é acentuado na região do espectro eletromagnético do azul (banda 1) e do vermelho (banda 3) e mais reduzido na região do verde (banda 2). No infravermelho próximo, ocorre reflexão atribuída à estrutura interna da folha. No infravermelho médio (bandas 5 e 7), há uma diminuição da reflectância em relação à banda 4, atribuída à absorção da luz pela água interna das folhas e também pelo efeito de sombras promovido pelas próprias folhas no dossel.

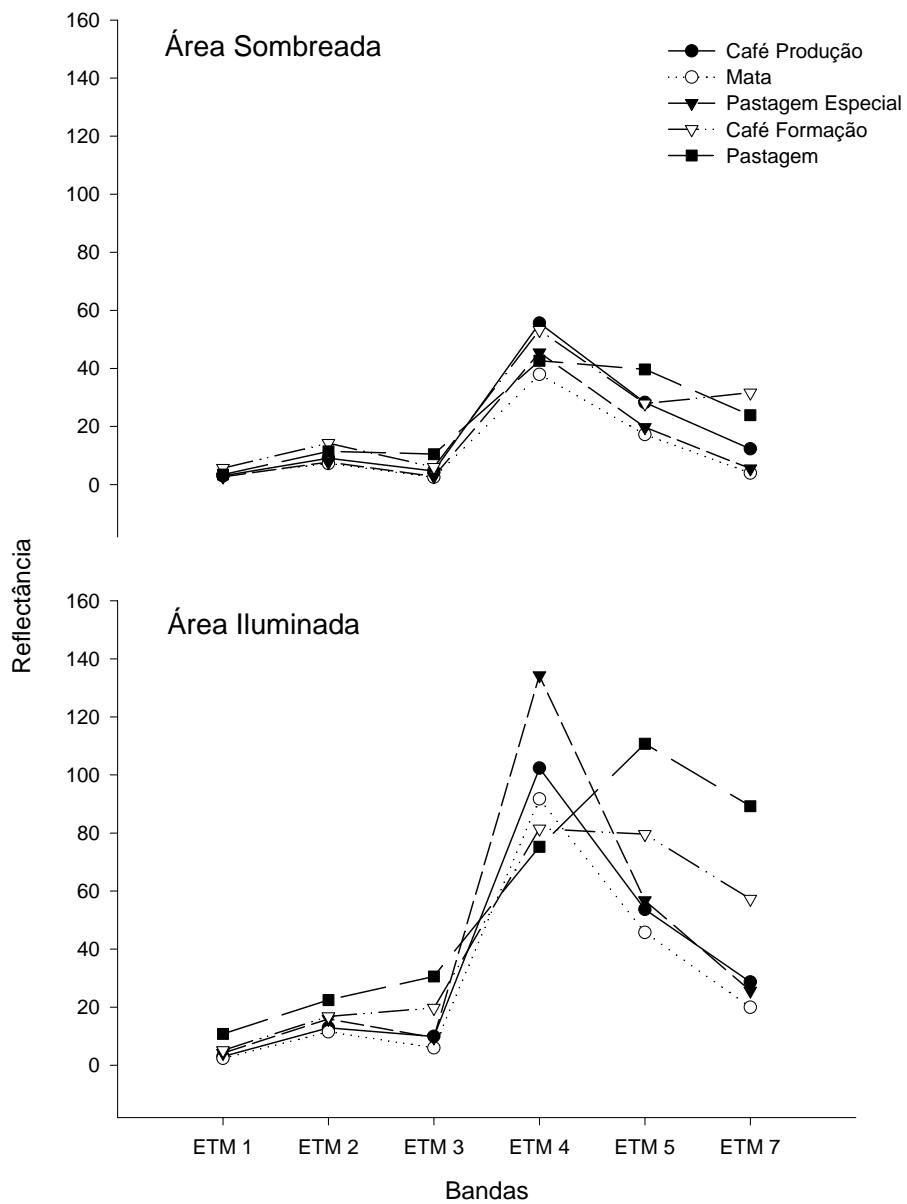


FIGURA 16 - Reflectâncias das culturas em área iluminadas e sombreadas

Observa-se, porém, que as curvas espectrais para as coberturas pastagem e café-formação tiveram um comportamento atípico nas áreas iluminadas. Estas curvas apresentaram aumento na reflectância nas bandas 3 e 5 em relação às bandas anteriores, respectivamente, quando se esperava decréscimo. Provavelmente, tal fato é justificado pela influência do solo nestas culturas. A época da imagem analisada (Junho de 2000) é de período seco, o que provavelmente promoveu, no caso da pastagem, a diminuição da massa verde sobre o solo. Portanto, a diminuição da clorofila na pastagem e uma maior exposição do solo devem ter sido os principais fatores que influenciaram a curva espectral da pastagem. Já o café em formação (0 a 6 meses) promove pouca cobertura vegetal, tendo, portanto, muita influência do solo nos seus valores de reflectância. Observa-se, ainda, certa similaridade entre estas curvas espectrais e as de solo, conforme mostrado na figura 15, confirmando, assim, a influência do solo exposto na resposta espectral destas culturas.

Nas áreas sombreadas, as classes de café-produção e café-formação tiveram comportamento espectral semelhantes até a banda 5; já na banda 7, elas se distinguiram. Esta situação pode estar ligada à menor quantidade de luz incidida sobre estas superfícies, que pode ter sobrepujado a influência do solo no caso do café-formação, prevalecendo a semelhança de feições até a banda 5. As menores reflectâncias da cobertura mata estão relacionadas, além do efeito iluminação, ao próprio sombreamento do dossel, em função da irregularidade de orientação das folhas. Tal fato concorda com Mausel (1993), que relatou a menor reflectância (na faixa do infravermelho) de florestas com grandes árvores devido à presença de sombras proporcionadas pela geometria complexa das árvores.

Observa-se ainda, na Figura 16, a similaridade entre as curvas de reflectância de café-produção e mata para áreas iluminadas e entre mata e pastagem especial para áreas sombreadas, justificando a dificuldade de distinção

entre estas coberturas vegetais para efeito de mapeamento nas imagens de satélite analisadas. Os valores de reflectância para as culturas café-produção e pastagem especial nas faixas do infravermelho médio foram bem próximos, indicando que estas coberturas vegetais poderiam estar com os percentuais de umidade semelhantes. A pastagem especial apresentou os maiores valores de reflectância na faixa do infravermelho próximo, mostrando o alto vigor vegetativo e massa verde desta cultura, o que pode ser comprovado nas fotografias aéreas pela textura lisa e cor acentuadamente verde, destacando-se das demais culturas. Na composição colorida RGB para a imagem de satélite mostrada na Figura 5, em que à banda 4 foi atribuída a cor vermelha, à banda 3 o azul e à banda 5 o verde, observam-se estas áreas em tons alaranjados.

A Tabela 9 mostra os valores médios de reflectância para as principais coberturas vegetais amostradas na área de estudo, para as condições sombreadas e iluminadas, para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, bem como a avaliação das diferenças estatísticas entre as médias de reflectância pelo teste de Tukey. Esta tabela objetivou mostrar quais as melhores bandas para discriminar uma cobertura dentro de uma condição específica de iluminação. Neste sentido, vale ressaltar que nem todas reflectâncias médias que apresentaram diferenças estatísticas foram consideradas neste trabalho. Por exemplo, a cobertura pastagem na banda 2, exposição iluminada, apresenta diferença estatística com as coberturas café-produção e mata, mas não com pastagem especial e café-formação. Esta situação demonstra que a banda 2, em condição iluminada, não é boa para distinção de coberturas vegetais, pois apresenta similaridade com outras.

TABELA 9 – Valores médios de reflectância para diferentes coberturas vegetais em condições de exposição iluminada e sombreada.

Banda	Exposição	Cobertura				
		Café Produção	Mata	Pastagem especial	Café Formação	Pastagem
1	Iluminada	3,10Aa <sup>1</sup>	2,70 Aa	4,23ABa	5,13Aba	10,80ABa
	Sombreada	2,97Aa	3,17Aa	3,13Aa	5,63Aa	3,50Ab
2	Iluminada	12,67Aa	11,97Aa	16,10ABa	16,83ABa	22,43Ba
	Sombreada	9,10Aa	7,40Aa	11,87Aa	14,20Aa	11,43Ab
3	Iluminada	9,80Aa	6,87Aa	9,67Aa	19,50Ba	30,60Ca
	Sombreada	4,93ABA	2,43Aa	6,20ABA	6,00ABb	10,43Cb
4	Iluminada	98,77Ca	91,33Ba	134,97Da	81,47Aa	75,27Aa
	Sombreada	56,33Bb	39,73Ab	86,77Cb	53,20Bb	42,63Ab
5	Iluminada	52,03ABA	48,97Aa	57,43Ba	79,47Ca	107,43Da
	Sombreada	28,63Bb	17,87Ab	38,13Cb	27,83Bb	39,63Cb
7	Iluminada	27,73Aa	23,80Aa	26,07Aa	57,23Ba	89,23Ca
	Sombreada	12,27Bb	4,13Ab	15,67Bb	31,63Db	23,87Cb

1- Médias acompanhadas de mesma letra maiúscula na horizontal não diferem significativamente ao nível de 5%. Médias acompanhadas de mesma letra minúscula entre tipos de exposição para cada banda não diferem significativamente ao nível de 5%.

Observa-se na Tabela 9, na região do espectro eletromagnético do visível, que somente a banda 3 apresentou diferença estatística entre tipos de coberturas, de forma a discriminá-las das demais, no caso a de café-formação e pastagem. Estas coberturas, conforme comentado acima e mostrado na Figura 16, apresentam influência do solo, o que pode ter proporcionado as diferenças aqui apresentadas. Nas áreas de condições iluminadas, o café-formação e pastagem apresentaram distinção das demais. Já nas áreas de condições sombreadas, somente a pastagem apresentou diferença estatística em relação às outras.

A região do infravermelho foi a que apresentou melhor distinção entre as coberturas. No infravermelho-próximo (banda 4), exposição iluminada, as coberturas café-produção, mata e pastagem especial apresentaram diferença estatística em relação às demais, o que pode ser explicado pela grande reflectância na vegetação, ocorrido, no comprimento de onda referente a esta banda. Na área sombreada, a pastagem especial foi a única cobertura a ter diferença estatística em relação às outras. Como já discutido anteriormente, a pastagem especial foi a cultura que apresentou o maior vigor vegetativo, com intensa ação da clorofila, o que pode ter proporcionado, mesmo em regiões com pouca quantidade de luz, uma separação ao nível de reflectância em relação às outras. Soma-se, ainda, o fato de esta cobertura ser de baixa estatura, com menor sombreamento provocado pelas folhas, o que pode ter implicado, também, no aumento de sua reflectância a ponto de destacá-la das demais. Estes resultados concordam com Batista et al. (1988), quando constataram, em seu trabalho, que entre as bandas individuais analisadas, a do infravermelho próximo foi a que apresentou maior quantidade de informação.

Na banda 5, exposição iluminada, as coberturas café-formação e pastagem tiveram diferença estatística em relação às outras. O café-formação e a pastagem, como já comentado, apresentam maior influência de solo exposto. Assim, a banda 5 pode estar diferenciando estas coberturas pela sua maior sensibilidade à umidade encontrada nos solos. O mesmo acontece para estas coberturas na banda 7, área iluminada. Já as coberturas de mata nas bandas 5 e 7, em exposição sombreada, tiveram diferença estatística, o que pode ter sido influência da sombra das folhas e/ou da geometria complexa das árvores, fato também já discutido anteriormente.

Com relação ao teste de média por bandas entre áreas iluminadas e sombreadas mostrado na Tabela 9, verifica-se que a cobertura pastagem nas bandas 1, 2 e 3, café-formação na banda 3 e todas as coberturas nas bandas do

infravermelho foram estatisticamente diferentes, comprovando que o infravermelho é a faixa do espectro eletromagnético que melhor diferencia reflectâncias de coberturas vegetais, quando comparada à faixa do visível.

Portanto, através da Tabela 9, foi possível separar, para cada cobertura vegetal e para cada condição de iluminação, as bandas que apresentaram diferença estatística em relação às demais, ou seja, quais as melhores bandas, sob uma determinada condição de iluminação, que melhor representam uma cobertura. A separação destas bandas está relatada na Tabela 10.

**TABELA 10 – Bandas mais representativas estatisticamente de coberturas vegetais sob condições iluminadas e sombreadas.**

<b>Coberturas</b>	<b>Bandas</b>	
	<b>Sombreada</b>	<b>Iluminada</b>
Café-produção	-	4
Café-formação	7	3, 5, 7
Mata	5, 7	4
Pastagem especial	4	4
Pastagem	3, 7	3, 5, 7

#### **4.3.1 Classificação supervisionada do uso e cobertura do solo**

A fotointerpretação sobre a área de estudo foi considerada como verdade de campo devido à melhor escala e riqueza de detalhes que as fotografias aéreas proporcionaram. Assim, para garantir que a amostragem de cada cobertura, para treinamento do classificador, fosse feita nos locais certos, os limites definidos na fotointerpretação foram sobrepostos à imagem do Landsat 7, o que permitiu dar maior certeza na avaliação das metodologias e acurácia de mapeamento aplicados neste trabalho.

Usaram-se, para a classificação, as bandas 3, 4, 5 e 7, definidas conforme Tabela 10, como as mais representativas estatisticamente para distinção de coberturas vegetais no mapeamento do uso da terra. Apesar de estas bandas terem sido atribuídas estatisticamente para melhor representar uma determinada

cobertura vegetal, elas foram usadas para discriminar todas as outras coberturas. A partir destas bandas, usou-se também a combinação dupla e tripla entre elas no processo de classificação supervisionada.

As imagens transformadas por componentes principais (PC), usadas na classificação, foram a primeira, com 74,7% das informações, e a segunda, com quase 23,4%. Devido à menor quantidade de informações, a segunda imagem entrou somente em combinação com a primeira.

As matrizes de erros proveniente da tabulação cruzada entre verdade de campo (fotointerpretação do mosaico) e classificação supervisionada na imagem para as imagens/transformações encontram-se na Tabela 11. O índice Tau e os valores do índice geral de acertos, para as classificações usando todas as coberturas (completa) e a classificação sem pastagem (usada como tentativa de melhoria de exatidão de mapeamento), encontram-se na Tabela 12.

TABELA 11- Matriz de erro para as imagens/transformações classificadas

TRANSF.		COBERTURAS (%)					
		Backg. <sup>(1)</sup>	Café Prod.	Mata	Café Form.	Pastag. Esp.	Pastag.
<b>PC1</b>	<b>Backg.</b>	4,1	19,0	18,3	14,7	20,2	23,7
	<b>Café Prod.</b>	0,1	38,2	37,4	4,1	16,0	4,4
	<b>Mata</b>	0,1	34,9	53,3	1,6	5,8	4,4
	<b>Café Form.</b>	0,9	26,5	22,2	13,4	25,1	11,9
	<b>Pastag. Esp.</b>	0,0	38,8	32,0	5,2	20,7	3,3
	<b>Pastag.</b>	1,7	25,6	24,8	11,7	18,7	17,6
<b>PC1 e 2</b>	<b>Backg.</b>	10,2	7,5	5,4	36,8	2,6	37,6
	<b>Café Prod.</b>	3,0	30,6	23,2	29,2	10,0	4,0
	<b>Mata</b>	3,0	26,1	43,8	18,2	2,9	6,0
	<b>Café Form.</b>	4,6	12,2	6,0	56,6	5,2	15,4
	<b>Pastag. Esp.</b>	2,7	27,7	21,6	19,1	25,5	3,5
	<b>Pastag.</b>	5,8	6,4	4,2	38,7	1,3	43,6

... continua ...

TABELA 11, Cont.

TRANSF.		COBERTURAS (%)					
		Backg. <sup>(1)</sup>	Café Prod.	Mata	Café Form.	Pastag. Esp.	Pastag.
<b>NDVI</b>	<b>Backg.</b>	16,9	8,6	6,9	23,1	0,9	43,5
	<b>Café Prod.</b>	1,6	32,4	31,3	23,7	3,7	7,2
	<b>Mata</b>	3,9	21,9	53,0	13,0	4,2	4,1
	<b>Café Form.</b>	2,5	20,4	6,8	42,6	1,4	26,3
	<b>Pastag. Esp.</b>	1,4	32,3	43,2	13,8	5,4	4,0
	<b>Pastag.</b>	4,1	10,8	3,9	32,4	0,8	48,0
<b>SAVI</b>	<b>Backg.</b>	18,4	0,0	12,2	22,3	1,5	45,5
	<b>Café Prod.</b>	4,2	0,0	41,9	27,4	4,9	21,5
	<b>Mata</b>	11,0	0,0	35,8	25,2	2,5	25,5
	<b>Café Form.</b>	5,5	0,0	21,5	40,1	0,9	31,9
	<b>Pastag. Esp.</b>	3,5	0,0	39,2	19,7	20,1	17,5
	<b>Pastag.</b>	17,5	0,0	7,1	21,2	0,2	54,0
<b>Bright.</b>	<b>Backg.</b>	3,0	29,9	28,2	13,7	0,0	25,2
	<b>Café Prod.</b>	0,1	30,6	35,2	13,9	0,0	20,1
	<b>Mata</b>	0,0	26,9	42,2	9,4	0,0	21,5
	<b>Café Form.</b>	0,8	32,1	32,5	14,3	0,0	20,3
	<b>Pastag. Esp.</b>	1,0	33,3	26,2	10,0	0,0	29,6
	<b>Pastag.</b>	0,6	29,5	35,1	12,7	0,0	22,1
<b>Banda 3</b>	<b>Backg.</b>	10,6	2,0	9,5	26,7	11,9	39,4
	<b>Café Prod.</b>	0,4	9,4	31,6	15,2	28,0	15,3
	<b>Mata</b>	0,1	19,4	52,3	5,9	16,4	5,9
	<b>Café Form.</b>	2,0	2,9	12,0	34,4	20,7	28,0
	<b>Pastag. Esp.</b>	0,1	10,2	34,6	9,9	34,4	10,8
	<b>Pastag.</b>	2,2	2,5	10,6	33,2	18,2	33,3
<b>Banda 4</b>	<b>Backg.</b>	0,2	23,7	1,9	30,3	1,8	42,1
	<b>Café Prod.</b>	0,0	33,8	2,8	29,2	5,7	28,6
	<b>Mata</b>	0,5	29,1	5,0	26,8	2,2	36,4
	<b>Café Form.</b>	0,0	24,0	2,1	37,4	1,3	35,2
	<b>Pastag. Esp.</b>	1,1	31,4	1,4	20,5	21,1	24,5
	<b>Pastag.</b>	0,2	25,3	2,5	20,2	0,4	51,4

... continua ...

TABELA 11, Cont.

TRANSF.		COBERTURAS (%)					
		Backg. <sup>(1)</sup>	Café Prod.	Mata	Café Form.	Pastag. Esp.	Pastag.
<b>Banda 5</b>	<b>Backg.</b>	0,8	18,6	13,8	31,1	17,6	18,2
	<b>Café Prod.</b>	0,0	41,8	31,3	8,1	17,4	1,3
	<b>Mata</b>	0,0	40,8	47,2	4,0	7,0	0,9
	<b>Café Form.</b>	0,1	25,5	15,7	28,3	22,4	8,0
	<b>Pastag. Esp.</b>	0,0	40,9	27,4	9,1	21,6	1,0
	<b>Pastag.</b>	0,3	24,9	16,9	23,7	18,2	16,0
<b>Banda 7</b>	<b>Backg.</b>	3,7	7,6	12,6	34,9	13,0	28,2
	<b>Café Prod.</b>	0,1	13,7	38,6	16,5	28,8	2,4
	<b>Mata</b>	0,1	12,3	63,3	6,6	16,3	1,3
	<b>Café Form.</b>	0,5	12,1	15,0	40,2	20,1	12,1
	<b>Pastag. Esp.</b>	0,0	12,2	39,4	12,4	34,2	1,8
	<b>Pastag.</b>	1,2	10,8	15,4	32,1	20,1	20,3
<b>Bandas 3 e 4</b>	<b>Backg.</b>	12,7	6,4	5,9	31,5	1,6	42,0
	<b>Café Prod.</b>	2,5	28,2	25,2	34,8	4,0	5,3
	<b>Mata</b>	2,4	20,7	49,4	21,5	1,6	4,4
	<b>Café Form.</b>	3,9	14,9	6,2	56,0	0,6	18,4
	<b>Pastag. Esp.</b>	2,6	27,7	26,9	21,5	18,0	3,3
	<b>Pastag.</b>	3,2	7,5	5,3	35,4	0,3	48,2
<b>Bandas 3 e 7</b>	<b>Backg.</b>	24,4	9,4	10,3	27,7	5,8	22,5
	<b>Café Prod.</b>	6,8	15,2	37,4	17,7	17,6	5,3
	<b>Mata</b>	2,8	8,4	67,3	8,6	9,9	3,1
	<b>Café Form.</b>	8,7	12,6	13,0	39,3	13,1	13,2
	<b>Pastag. Esp.</b>	2,0	14,1	40,6	15,7	23,4	4,2
	<b>Pastag.</b>	11,3	14,7	11,6	29,0	9,2	24,3
<b>Bandas 4 e 5</b>	<b>Backg.</b>	10,3	7,1	6,1	40,3	0,8	35,4
	<b>Café Prod.</b>	3,0	32,2	26,6	31,7	2,5	3,9
	<b>Mata</b>	1,3	25,9	45,0	19,9	1,3	6,6
	<b>Café Form.</b>	4,8	13,8	6,7	58,1	0,7	15,8
	<b>Pastag. Esp.</b>	5,4	34,3	23,5	23,0	10,5	3,3
	<b>Pastag.</b>	6,0	6,3	4,9	37,2	0,4	45,2

...continua...

TABELA 11, Cont.

TRANSF.		COBERTURAS (%)					
		Backg. 1)	Café Prod.	Mata	Café Form.	Pastag. Esp.	Pastag. Esp.
<b>Bandas 4 e 7</b>	<b>Backg.</b>	10,9	6,3	6,8	34,4	1,0	40,7
	<b>Café Prod.</b>	3,0	29,6	26,1	32,4	4,4	4,4
	<b>Mata</b>	1,8	22,6	50,2	17,3	2,3	5,8
	<b>Café Form.</b>	4,1	12,2	6,8	57,8	0,8	18,2
	<b>Pastag. Esp.</b>	4,6	26,7	26,0	20,5	18,5	3,7
	<b>Pastag.</b>	5,4	5,9	6,2	37,2	0,5	44,8
<b>Bandas 5 e 7</b>	<b>Backg.</b>	28,9	11,2	8,2	22,4	2,0	27,2
	<b>Café Prod.</b>	3,4	38,3	24,1	18,3	6,5	9,4
	<b>Mata</b>	3,5	35,1	41,9	7,2	6,7	5,6
	<b>Café Form.</b>	8,5	20,9	8,0	37,2	3,5	21,9
	<b>Pastag. Esp.</b>	5,1	28,8	24,3	9,8	27,0	4,9
	<b>Pastag.</b>	9,9	18,5	8,6	28,3	2,7	32,0
<b>Bandas 3 e 5</b>	<b>Backg.</b>	32,4	9,4	6,3	26,6	2,7	22,6
	<b>Café Prod.</b>	5,9	36,3	17,8	13,3	8,5	18,2
	<b>Mata</b>	2,5	37,5	37,4	5,8	7,4	9,4
	<b>Café Form.</b>	9,7	16,2	7,7	34,2	8,2	24,1
	<b>Pastag. Esp.</b>	2,5	36,8	17,2	10,3	24,0	9,3
	<b>Pastag.</b>	11,3	11,1	8,1	26,7	4,7	38,1
<b>Bandas 3, 4 e 5</b>	<b>Backg.</b>	36,2	6,8	5,2	28,7	0,9	22,3
	<b>Café Prod.</b>	10,0	31,2	23,2	28,3	3,5	3,9
	<b>Mata</b>	5,1	23,0	48,7	16,3	1,8	5,2
	<b>Café Form.</b>	13,1	10,9	6,5	52,4	0,7	16,3
	<b>Pastag. Esp.</b>	5,2	30,5	23,7	20,5	17,3	2,8
	<b>Pastag.</b>	16,5	4,3	5,2	29,1	0,3	44,6
<b>Bandas 3, 4 e 7</b>	<b>Backg.</b>	33,9	6,8	6,7	26,5	1,6	24,4
	<b>Café Prod.</b>	9,1	27,6	29,0	24,0	7,0	3,4
	<b>Mata</b>	5,2	16,7	56,4	13,0	4,4	4,3
	<b>Café Form.</b>	12,5	15,1	8,1	49,3	1,0	14,0
	<b>Pastag. Esp.</b>	5,6	25,2	30,2	14,2	21,9	2,9
	<b>Pastag.</b>	13,2	8,9	5,9	30,5	0,5	41,1

...continua...

TABELA 11, Cont.

TRANSF.	Backg. 1)	COBERTURAS (%)					
		Café Prod.	Mata	Café Form.	Pastag. Esp.	Pastag. Esp.	
<b>Bandas 3, 5 e 7</b>	<b>Backg.</b>	37,0	9,6	7,9	22,6	1,1	21,8
	<b>Café Prod.</b>	8,1	30,0	30,8	20,0	4,4	6,8
	<b>Mata</b>	4,6	17,1	60,3	9,1	4,5	4,4
	<b>Café Form.</b>	12,8	19,0	8,9	40,1	2,0	17,2
	<b>Pastag. Esp.</b>	5,3	22,1	35,2	11,2	21,9	4,2
	<b>Pastag.</b>	14,8	15,1	7,7	33,1	1,4	27,9
<b>Bandas 4, 5 e 7</b>	<b>Backg.</b>	27,4	5,9	4,3	43,4	1,4	17,6
	<b>Café Prod.</b>	10,5	31,5	16,4	34,4	5,2	2,0
	<b>Mata</b>	9,5	18,5	39,4	22,1	6,4	4,1
	<b>Café Form.</b>	8,8	12,0	4,6	63,7	1,4	9,5
	<b>Pastag. Esp.</b>	12,3	21,7	17,5	23,2	24,2	1,1
	<b>Pastag.</b>	15,5	4,7	4,0	40,0	1,1	34,7

(1) Backg.- corresponde às classificações que não foram enquadradas em nenhuma classe.

Os valores do índice Tau (Tabela 12) mostraram que a acurácia do mapeamento apresentou valores baixos apesar de a análise estatística ter demonstrado diferenças estatísticas entre as bandas apresentadas na Tabela 10. Não foi encontrada, na literatura, nenhuma classificação para os índices Tau, mas se compararmos os índices encontrados neste trabalho à classificação de índices Kappa proposta por Landis & Koch (1977), podemos enquadrar esses valores como razoável, Tau entre 0,20 a 0,40; ruim, Tau entre 0,00 e 0,20; e péssima, Tau com valores negativos.

TABELA 12 - Índice Tau e índice geral de acerto para a classificação completa e sem pastagem

Imagen/Transformação	Completa		Sem pastagem	
	IG	Tau	IG	Tau
PC1	0,27	0,12	0,23	0,04
Combinação PC1 e PC2	0,40	0,28	0,39	0,23
NDVI	0,42	0,31	0,39	0,23
SAVI	0,36	0,23	0,36	0,20
BRIGHTNESS	0,25	0,09	0,17	-0,03
Banda 3	0,31	0,17	0,39	0,09
Banda 4	0,33	0,20	0,17	-0,03
Banda 5	0,27	0,12	0,27	0,09
Banda 7	0,29	0,14	0,30	0,13
Combinação Bandas 3 e 4	0,42	0,31	0,40	0,25
Combinação Bandas 3 e 5	0,36	0,24	0,32	0,16
Combinação Bandas 3 e 7	0,32	0,19	0,36	0,20
Combinação Bandas 4 e 5	0,41	0,29	0,39	0,24
Combinação Bandas 4 e 7	0,41	0,29	0,43	0,28
Combinação Bandas 5 e 7	0,35	0,22	0,35	0,19
Combinação Bandas 3, 4 e 5	0,42	0,31	0,46	0,33
Combinação Bandas 3, 4 e 7	0,41	0,30	0,40	0,25
Combinação Bandas 3, 5 e 7	0,36	0,23	0,39	0,24
Combinação Bandas 4, 5 e 7	0,37	0,25	0,39	0,24

As melhores classificações foram as das imagens que apresentaram o índice Tau, para a classificação “completa”, acima de 0,30, que são o NDVI e as combinações das bandas 3-4, 3-4-5 e 3-4-7. O NDVI contrastou melhor a diferença de reflectância entre o vermelho (banda 3) e infravermelho-próximo (banda 4) em comparação ao outro índice de vegetação usado, o SAVI. O NDVI, ao lado da combinação das bandas 3 e 4, foram os que apresentaram melhor exatidão de mapeamento. A melhor exatidão atribuída ao NDVI se deve também, ao fato de terem sido usadas, nestas classificações, somente coberturas com predomínio vegetal verde. Pode-se entender, também, que o predomínio verde das coberturas e com maior vigor vegetativo proporcionam uma grande reflectância na banda 4 e uma grande absorção na banda 3. Portanto, esta diferença pode ter acarretado um melhor desempenho do NDVI em relação às

outras classificações. O NDVI, apesar de ter proporcionado o melhor índice, apresentou valores baixos de exatidão de mapeamento, assim como todas as outras classificações. Este fato pode confirmar a precaução de Sader (1989) ao usar NDVI para mapeamento de áreas florestais em regiões montanhosas, visto que esta transformação, no seu conceito, se mostrou mais adequada para regiões de relevo mais suavizado.

As combinações de bandas demonstraram um melhor desempenho em relação às classificações por bandas unitárias, concordando com as observações de Batista et al. (1988), Batista et al. (1990) e Silva (1994), segundo os quais a melhoria da classificação é obtida com o incremento do número de bandas utilizadas na análise. Estes autores ressaltam, ainda, que o máximo desempenho de classificação é atingido com a utilização de três bandas espectrais, o que concorda, em parte, com os resultados deste trabalho, em que a combinação das bandas 3-4-5, 3-4, além da transformação NDVI, foi a classificação com os melhores índices de exatidão.

As bandas 4 e 3, apesar da grande reflectância e absorbância de vegetação, respectivamente, apresentaram valores muito baixos para o índice Tau na classificação “completa” (0,20 para a banda 4 e 0,17 para a banda 3). Por outro lado, estas bandas estiveram presentes em todas as classificações que apresentaram os melhores índices de exatidão de mapeamento. A diferença estatística entre as bandas apresentados na Tabela 9 não descarta uma possível similaridade entre as classes classificadas pelo algoritmo da máxima verossimilhança. Moreira (2001) diz que a similaridade de resposta espectral entre duas ou mais classes gera uma curva de distribuição de freqüência que cruza com a curva determinada para outra classe. A interseção entre estas curvas é chamada de confusão espectral entre classes. Portanto, os baixos índices de exatidão de mapeamento demonstram confusão espectral para algumas classes devido à similaridade das coberturas e ao efeito das sombras, conforme

demonstrado na Figura 16, entre mata e café-produção para áreas iluminadas e café-produção e café-formação para áreas sombreadas. A Tabela 11 demonstra que houve um predomínio de confusão entre café-produção, café-formação e mata para quase todas as classificações. A classe Pastagem também apresentou confusão em relação à café e mata nas imagens / transformações Brightness, banda 4 e SAVI. Nesta situação, à banda 4 pode ter proporcionado uma maior confusão devido a sua grande capacidade de registrar reflectâncias de vegetação verde. Observa-se, também, que para quase todas as classificações, o café formação apresentou confusão com a Pastagem. Este fato pode estar relacionado à maior presença de solo exposto e menor quantidade de massa verde, conforme visto na Figura 16 e também já discutido anteriormente. A Pastagem especial, na maioria das vezes, apresentou confusão com todas as coberturas, o que pode indicar, assim como na pastagem, uma heterogeneidade espectral no decorrer de sua área, a qual, a depender do seu estado fenológico, tende a se assemelhar a uma das demais coberturas.

O índice geral foi sempre acima do índice Tau, concordando com a citação de Brites (1996). Segundo este autor, os valores mais elevados do índice global estão superestimando a avaliação de exatidão.

De forma geral, observa-se, pelos valores do índice Tau, que a exatidão de mapeamento diminuiu quando se retirou a classe pastagem da classificação completa. Apenas as combinação das bandas 3-7, 3-4-5 e 3-5-7 apresentaram uma pequena melhora na acurácia do mapeamento nesta situação. Este fato demonstra que, mesmo retirando uma classe caracterizada por uma grande variabilidade de reflectância, ou seja, sujeita a confusão com outras, a exatidão do mapeamento não melhorou. Portanto, a exclusão de uma classe que teoricamente seria fonte de erro na classificação é menos significativo no sentido de melhorar a exatidão de mapeamento do que sua permanência.

A Tabela 13 mostra os valores da diagonal da matriz de erro resumidos da Tabela 11, ou seja, as classificações corretamente interpretadas. Observa-se que entre os melhores índices de acertos para cada tipo de cobertura em cada banda, estão os de: café-produção (41,8%) na banda 5, mata (63,3%) na bandas 7, café-formação (63,7%) na combinação das bandas 4-5-7, pastagem especial (34,4%) na banda 3, e pastagem (54,0%) na transformação pelo índice de vegetação SAVI. Estes melhores índices foram unidos em um único plano de informação. A matriz de erro para esta reclassificação apresentou índice de Tau de 0,19 e índice geral de 0,32.

TABELA 13 - Percentuais de acertos das matrizes de erro da classificação “completa”

Imagen/ Transf.	BACKG.	Café Prod.	Mata	Café Form.	Reveg.	Pastagem
			(%)			
PC1	4,1	38,2	53,3	13,4	20,7	17,6
PC1-2	10,2	30,6	43,8	56,6	25,5	43,6
NDVI	16,9	32,4	53,0	42,6	5,4	48,0
BRIGHT.	3,0	30,6	42,2	14,3	0,0	22,1
B7	3,7	13,7	63,3	40,2	34,2	20,3
B5	0,8	41,8	47,2	28,3	21,6	16,0
B5-7	28,9	38,3	41,9	37,2	27,0	32,0
B4	0,2	33,8	5,0	37,4	21,1	51,4
B4-7	10,9	29,6	50,2	57,8	18,5	44,8
B4-5	10,3	32,2	45,0	58,1	10,5	45,2
B4-5-7	27,4	31,5	39,4	63,7	24,2	34,7
B3	10,6	9,4	52,3	34,4	34,4	33,3
B3-7	24,4	15,2	67,3	39,3	23,4	24,3
B3-5	32,4	36,3	37,4	34,2	24,0	38,1
B3-4	12,7	28,2	49,4	56,0	18,0	48,2
B3-5-7	37,0	30,0	60,3	40,1	21,9	27,9
B3-4-7	33,9	27,6	56,4	49,3	21,9	41,1
B3-4-5	36,2	31,2	48,7	52,4	17,3	44,6
SAVI	18,4	0,0	35,8	40,1	20,1	54,0

Dentro das imagens/transformações citadas no item anterior, retiraram-se, na linha da matriz (Tabela 11), as coberturas que apresentavam confusão superior a 10% em relação à melhor classificação. Assim, para a cobertura Mata, na banda 7, excluíram-se café-produção (12,33%) e pastagem especial (16,33%); para café-produção na banda 5, excluíam-se mata (31,34%) e pastagem especial (17,44%); para café-formação na combinação das bandas 4-5-7, excluiu-se café-produção (11,96%); para pastagem especial na banda 3, excluíram-se as coberturas café-produção (10,17%), Mata (34,56%) e pastagem (10,79%); e para pastagem na transformação SAVI, exclui-se a cobertura Café Formação (21,15%). Esta reclassificação apresentou o índice Tau de 0,08 e o índice geral de acertos de 0,24.

Estas reclassificações foram unidas em dois planos de informação: “melhores da classificação completa” e “melhores de completa sem confusão”, usando linguagem de análise espacial disponibilizada pelo SPRING. Os índices de exatidão nos dois modelos foram também bastante baixos. No caso da “melhores da classificação completa”, foi demonstrado que os mais altos valores de acertos dentro de cada cobertura não significaram, necessariamente, uma boa exatidão, haja visto que o índice Tau das imagens/transformações usados para compor esta reclassificação não esteve configurado entre os de maiores valores de acertos, conforme demonstrados na Tabela 12. Para as “melhores de completa sem confusão”, ficou demonstrado mais uma vez que a exclusão de coberturas visando a diminuição de confusão e a melhoria de exatidão, tende a causar um efeito contrário, como pode ser comprovado pelos seus baixíssimos índices de exatidão de mapeamento. Assim, a melhor opção para classificação supervisionada em imagens Landsat seria o uso de todas as classes de uso da terra existentes em campo.

A última opção usada para melhoria dos níveis de exatidão de mapeamento foi a união das classes de café-formação com café-produção e de

Pastagem com Pastagem especial, formando as classes Café e Pastagem, respectivamente. Esta metodologia foi aplicada somente às melhores da classificação “completa”. Os índices de exatidão estão apresentados na Tabela 14. Observa-se que os índices de exatidão não obtiveram um aumento a ponto de melhorar consideravelmente o desempenho da classificação. O índice geral de acerto teve, em média, 19% de aumento. Todos estes índices não ultrapassaram, em forma percentual, 50% de precisão. Já o índice Tau teve um aumento de exatidão bem mais modesto em relação aos apresentados na classificação “completa” (Tabela 12). Para este índice, o desempenho melhorou, em média, 6%. Estes fatos levam a crer que a confusão entre classes não foi tão grande a ponto de apresentar uma diferença relevante nos índices de exatidão de mapeamento.

TABELA 14 – Índice Tau e índice geral de acerto para nova classificação das imagens/transformações com melhor exatidão.

Imagen/Transformação	Índices de exatidão	
	IG	Tau
NDVI	0,48	0,33
Combinação Banda 3 e 4	0,51	0,34
Combinação Banda 3, 4 e 5	0,50	0,33
Combinação Banda 3, 4 e 7	0,48	0,31

#### 4.4 CORRELAÇÃO ESPACIAL DE ÁREAS CAFEEIRAS COM ATRIBUTOS DO MEIO FÍSICO.

As áreas cafeeiras usadas nesta correlação foram as levantadas na fotointerpretação abrangendo as classes café-produção, café-formação e solo exposto/café-formação. A área das lavouras cafeeiras no local estudado foi de 35.53 Km<sup>2</sup>. Estas áreas, correlacionadas espacialmente a atributos do meio físico, tais como solos, orientação de vertentes e faixas de altitude, estão descritas abaixo.

A Tabela 15 e a Figura 17 mostram a distribuição das áreas de café conforme a direção da vertente. As direções variaram em ângulos de 45º a partir do sentido norte.

TABELA 15 - Distribuição das lavouras de café nas orientações de vertentes.

Direção	Área (Km <sup>2</sup> )	% sobre Área Total
N-NE	3,56	3,3
E-NE	4,03	3,7
E-SE	5,00	4,6
S-SE	4,40	4,1
S-SW	3,63	3,3
W-SW	4,67	4,3
W-NW	4,57	4,2
N-NW	3,96	3,6
Plano	1,71	1,6
<b>Total</b>	<b>35,53</b>	<b>32,7</b>

Conforme observado na Tabela 15, as áreas de café plantadas não obedeceram a uma direção específica. Todas as lavouras, à exceção da direção Plano, tiveram uma distribuição uniforme no relevo, ocupando uniformemente todas as orientações de vertentes, com um ligeiro predomínio para as direções E-SE (4,6%), W-SW (4,3%) e W-NW (4,2%).

Esta distribuição regular das lavouras de café nas diferentes direções pode indicar a dissecação ocorrida na região ao longo do tempo. Além desta uniformidade na direção das vertentes, a homogeneidade das características de solo também pode estar contribuindo para a distribuição regular das lavouras de café, ou seja, a classe de solo não está influenciando no percentual de áreas cafeeiras devido às semelhanças de suas características físico-químicas.

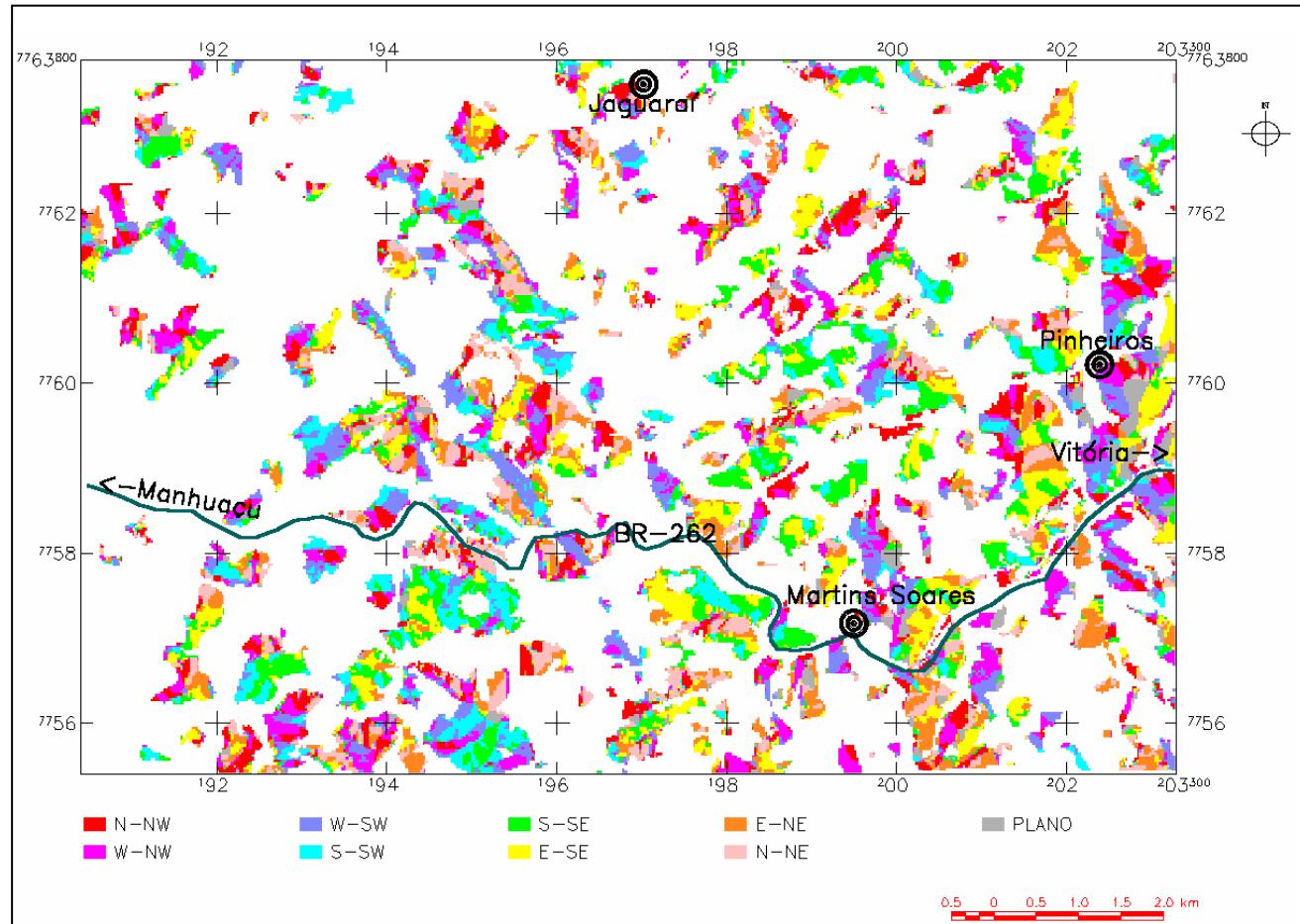


FIGURA 17 – Áreas de café por exposição de vertentes

A Tabela 16 e a Figura 18 demonstram a distribuição da cafeicultura em faixas de altitude na área de trabalho. Observa-se que nas altitudes menores (< 600 m) e nas altitudes maiores (>900 m), é pequena a quantidade de café plantada, totalizando 1,2% da área total. O predomínio da área plantada encontra-se entre 700 e 800 m, com quase 20% do total geral da área cafeeira, indicando que a cafeicultura na região estudada encontra-se instalada em altitudes médias, já que, na área de trabalho, a maior altitude encontrada foi por volta de 1300 m. Este fato indica a maior presença de lavouras nas unidades geomorfológicas de encostas côncavas e convexas, o que também pode ser comprovado pela Tabela 17.

TABELA 16 - Distribuição das lavouras de café em faixas de altitude.

Faixa (m)	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
<600	0,2	0,2
600-700	5,7	5,3
700-800	21,2	19,6
800-900	7,4	6,8
900-1000	1,0	0,9
1000-1100	0,1	0,1

A distribuição das lavouras de café em faixas de altitude, mostrada na Tabela 16, enquadra-se bem nas condições estabelecidas pelo Instituto Brasileiro do Café (1980), que estabelece altitudes entre 500 e 1200m ao sul do paralelo 20° S, na Zona da Mata Mineira, como aptas ao cultivo de café arábica.

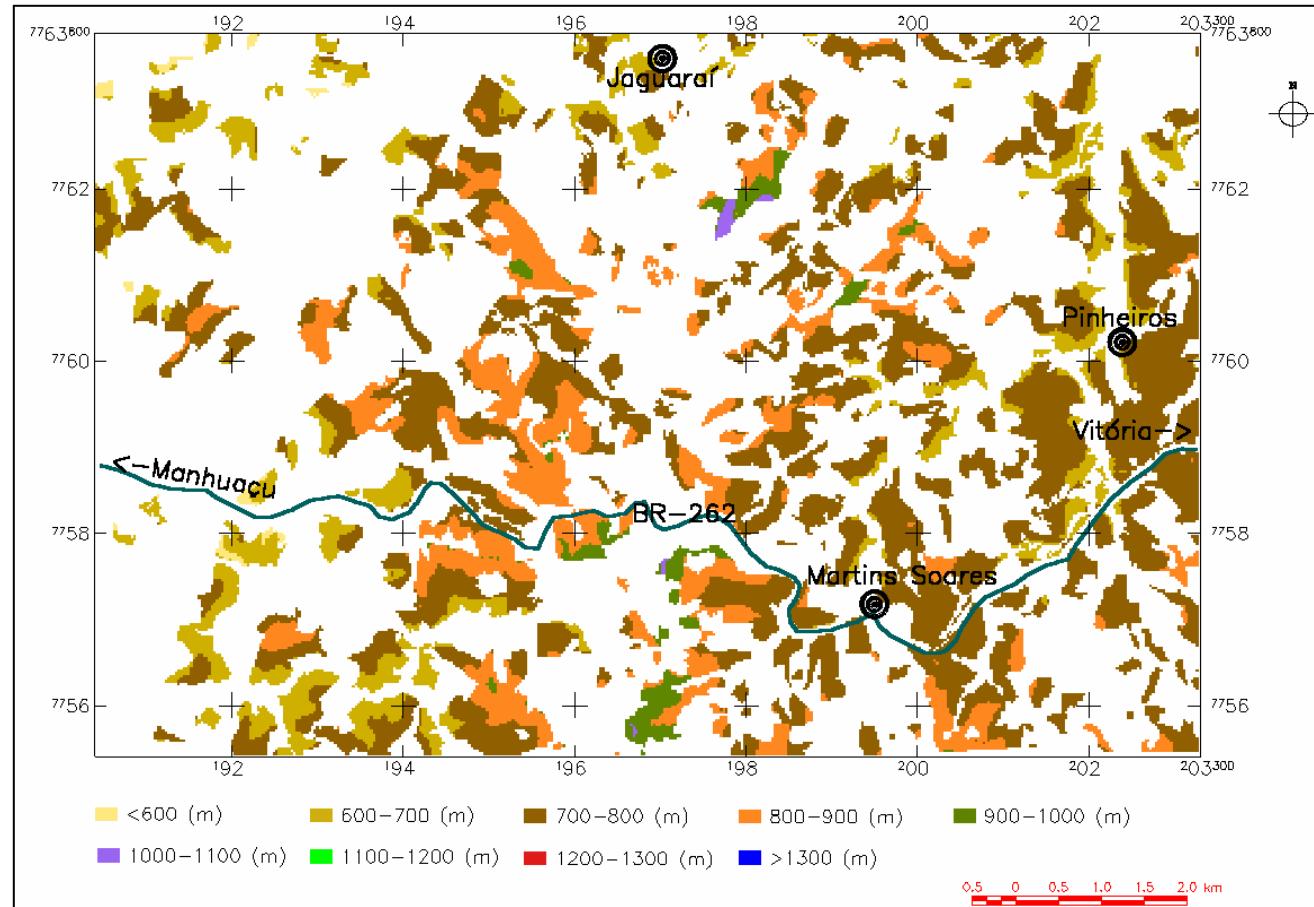


FIGURA 18 – Áreas de café em faixas de altitude

A Tabela 17 e a Figura 19 mostram a distribuição das áreas cafeeiras sob as diferentes classes de solos. A maior área ocupada por café encontra-se sob CAMBISSOLOS e LATOSOLOS (unidade geomorfológica de encostas convexas e côncavas), com quase 18%. Em áreas de ARGISSOLOS (terraços), observa-se a segunda maior área ocupada com café, com 27% do total. Os LATOSOLOS da superfície remanescente de topo apresentam a terceira maior área de lavouras de café, com 3,5%. Os NEOSSOLOS FLÚVICOS e GLEISSOLOS (Planície de Inundação) apresentaram 2,3% de áreas cultivadas, o que pode indicar um certo erro de mapeamento, já que estas áreas estão sujeitas à inundação e, provavelmente, o produtor não as utiliza para cultivo de café. Este erro pode ser justificado pelo percentual de 0 a 5% de declive usado para descreminalizar as áreas de planície de inundação, já que as áreas planas citadas por Lemos & Santos (1996) são de 0 a 3%. Esta diferença, entre 3 e 5%, pode representar uma área que está sendo usada para o cultivo de áreas cafeeiras. Aliada a este fato, existe a imprecisão proporcionada pela escala das cartas do IBGE no processo de digitalização das curvas de nível quando comparada à escala maior usada na fotointerpretação, lembrando que a escala de mapeamento do uso e cobertura da terra pela fotointerpretação foi de 1:10.000 e da digitalização das curvas de nível foi de 1:50.000. Neste mesmo sentido, a área de 0,2% para Afloramento Rochoso e NEOSSOLO LITÓLICO (Escarpa) indica a imprecisão de mapeamento proporcionada também pela questão das escalas.

TABELA 17 - Distribuição das lavouras de café dentro de cada unidade geomorfológica.

<b>Classe</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>
LV+LVA (Superfície Remanescente de Topo)	3,84	3,5
RU+GX (Planície de Inundação)	2,49	2,3
PVA+PV (Terraço)	9,62	8,9
LV+LVA (Encosta Convexa) e CX (Côncava)	19,40	17,9
Afloramento Rochoso + RL (Escarpa)	0,23	0,2

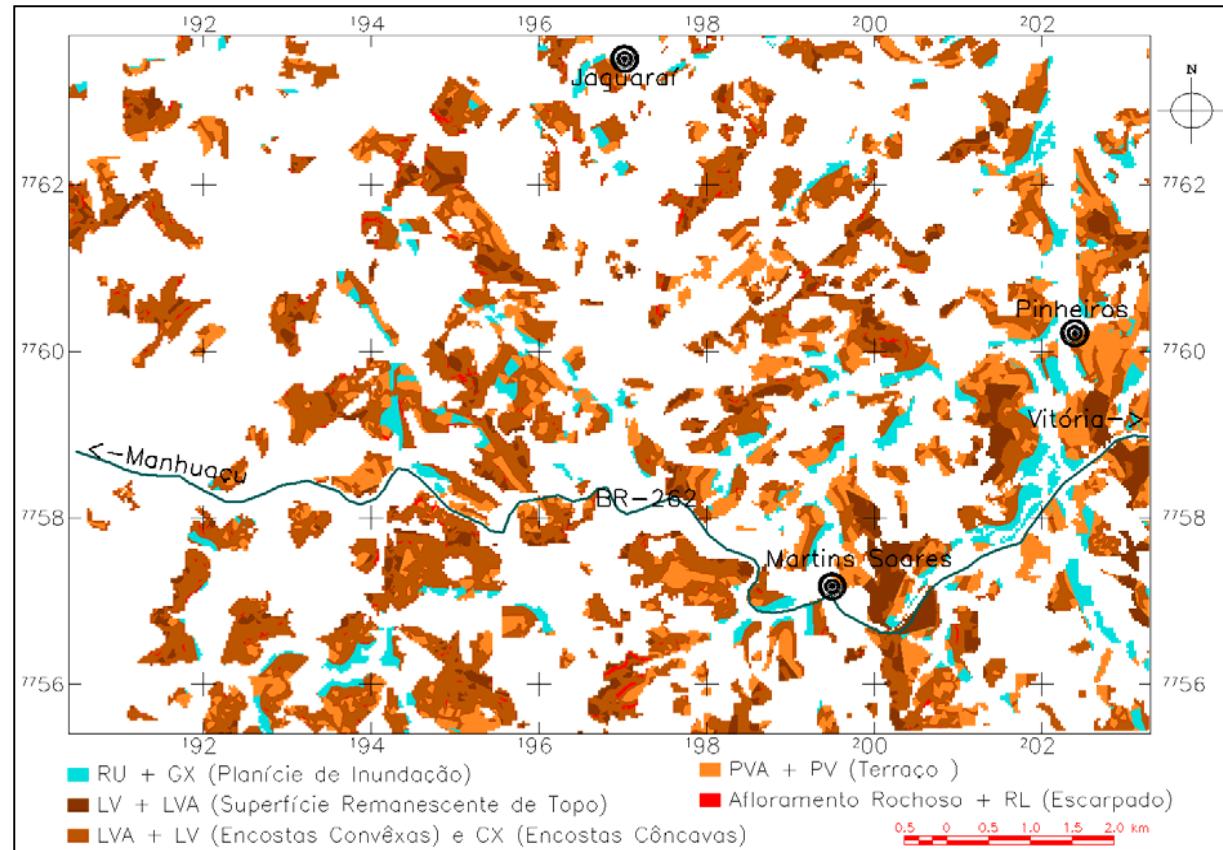


FIGURA 19 – Áreas de café por classes de solos, segundo modelagem

## **5 CONCLUSÕES**

Considerando que o objetivo deste trabalho foi estabelecer uma estratégia baseada no sensoriamento remoto e geoprocessamento para caracterização e mapeamento de agroecossistemas cafeeiros da Zona da Mata de Minas Gerais, é possível concluir que:

O processamento digital de informações espaciais, por meio do Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica, quando comparado à metodologia tradicional, possibilita a caracterização do meio físico de uma região com maior rapidez e a um custo menor, uma vez que demanda uma quantidade menor de levantamentos de campo e análises laboratoriais.

A metodologia usada para obtenção do mapa de solos, checada pelo trabalho de campo realizado na microbacia, mostrou a potencialidade do uso de sistemas de informações geográficas associados à modelagem para mapeamento de solos. Contudo, é necessário o estabelecimento de um método de avaliação estatística para quantificar o percentual de acertos, a acurácia do mapeamento e a validação da metodologia.

Dados de reflectância de solos oriundos de imagens orbitais, quando trabalhados por softwares que permitam uma boa análise espacial, podem auxiliar na caracterização dos solos, principalmente para levantamento e classificação, fornecendo subsídios à determinação de propriedades pedológicas.

As análises espectrais associadas às caracterizações físicas, químicas e morfológicas comprovaram outros estudos feitos na Zona da Mata por diferentes autores, nos quais foi demonstrado o intenso grau de intemperismo, pobreza química e homogeneidade dos solos.

O uso de imagens Landsat para mapeamento de áreas cafeeiras da Zona da Mata mostrou-se restrito, apesar da pouca diversidade de tipos de uso da terra

e cobertura vegetal encontrados na região. Os resultados da classificação supervisionada indicaram que a confusão na classificação aconteceu principalmente entre plantações de café e áreas de mata e que, consequentemente, o mapeamento digital automatizado de áreas cafeeiras nesta região poderá ser usado apenas para referência de localização destas áreas e não para limitar e quantificar lavouras. Problemas relacionados à similaridade espectral, à topografia accidentada da região, com o consequente sombreamento das imagens, e à fragmentação das lavouras de café, localizadas em áreas contíguas a matas nativas, foram os principais causadores desta baixa performance. Esperam-se melhores resultados quando da aplicação desta metodologia em condições de relevo mais suave e para regiões com áreas agrícolas mais extensas e homogêneas.

As fotografias aéreas não-convencionais coloridas propiciaram condições ideais para a fotointerpretação visual detalhada do uso da terra, inclusive por estereoscopia. Por outro lado, as distorções apresentadas nas fotos, devido a oscilações do avião, promovem erros que podem comprometer a exatidão do mapeamento. Desta forma, o uso deste sistema para fins de mapeamento deve ser feito em perfeitas condições climáticas, que proporcionem o mínimo de oscilação do avião, e com o devido apoio de campo, que proporcione o georreferenciamento de um número suficiente de pontos para propiciar a correção das referidas distorções.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, H. M.; LACERDA, M. P. C.; VIEIRA; T. G. C. Caracterização de agroecossistemas cafeeiros em regiões produtoras de Minas Gerais, por meio do gGeoprocessamento. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas. **Resumos expandidos...**: Brasília:Embrapa Café, 2000. v. 2, p.1360-1363.
- ARONOFF, S. **Geographic information systems:** a management perspective. Ottawa: WDL Publications, 1989. 225p.
- BARET, F. Vegetation canopy reflectance factors of variation and application for agriculture. In: BELWARD, A. S.; VALENZUELA, C. R. (Ed.). **Remote sensing and geographical information system for resource management in developing countries.** Dordrecht: Kluwer Academic, 1991. v.1, p.145-167, 1991.
- BARTHOLOMÉ, E. Remote Sensing and Agricultural production monitoring in Sahelian countries. In: BELWARD, A. S.; VALENZUELA, C. R. (Ed.). **Remote sensing and geographical information system for resource management in developing countries.** Dordrecht: Kluwer Academic, 1991. v.1, p.189-214.
- BASHER, L. R. Is pedology dead and buried? **Journal of Soil Research**, New Zealand, v. 35, p. 979-974, 1997.
- BATISTA, G. T.; CHEN, S. C.; TARDIN, A. T. et al. avaliação de produtos HRV/SPOT e TM/LANDSAT na discriminação de culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 25, n. 3, p. 289-467, mar. 1990
- BATISTA, G. T.; CHEN, S. C.; TARDIN, A. T. et al. **Separabilidade de culturas através da análise digital de dados SPOT e TM.** São Jose dos Campos: INPE, 1988. 18p.
- BATISTA, G. T.; TARDIN, A. T.; CHEN, S. C. et al. Avaliação de produtos HRV/SPOT e TM/Landsat na discriminação de culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 25, n. 3, p. 379-386, mar. 1990.
- BELWARD, A. S. Spectral characteristics of vegetation, soil and water in the Visible, Near-Infrared and Middle-Infrared wavelengths. In: BELWARD, A. S.; VALENZUELA, C. R. (Ed.). **Remote sensing and geographical information**

**system for resource management in developing countries.** Dordrecht: Kluwer Academic, 1991. v.1, p.31-53.

BIARD, F.; BARET, F. Crop Residue Estimation Using Multiband Reflectance. **Remote Sensing Environment**, New York, v. 59, n. 3, p. 530-536, Mar. 1997.

BRÄNDLI, M. Hierarchical Models for the Definition and Extraction of Terrains Features. In: BURROUGH, P. A.; FRANK, A. U. **Geographic objects with indeterminate boundaries**. London: Ed. Taylor&Francis, 1996. v. 2, cap. 17, p.257-270. (Série GISDATA)

BRITES, R. S. **Verificação de Exatidão em classificação de imagens digitais orbitais:** efeitos de diferentes estratégias de amostragens e avaliação de índices de exatidão. 1996. 101p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographic information systems for land resources assessment.** Oxford: Oxford University Press, 1986. 193p.

CAMPBELL, J. B. **Introduction to remote Sensing.** New York: The Guilford Press, 1987. 551p.

CASELLES, V.; GANDIA, S.; MELIA, J. Landsat-5 TM application to the study of modification of spectral signatures of citric orchards affected by frost. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON SPECTRAL SIGNATURES OF OBJECTS IN REMOTE SENSING, 1985, Les Arcs, France. **Proceedings....** Montfavet: INRA, 1985. p.183-190.,

CHAGAS, C. da S.; CURI, N.; DUARTE, M. N. et al. Orientação das camadas de rochas metapelíticas na gênese de Latossolos sob Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, n. 5, p. 539-548, maio 1997.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais:** 5<sup>a</sup> aproximação. Viçosa, MG, 1999. 359p.

CONGALTON, R. G.; MEAD, R. A. A quantitative method to test for consistency and correctness in photointerpretation. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 49, n. 1, p. 69-74, Jan. 1983.

**CORRÊA, G. F. Modelo de evolução e mineralogia da fração argila de solos do Planalto de Viçosa, MG.** 1984. 87p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

**COUTINHO, A. C. Segmentação e classificação de imagens LANDSAT-TM para o mapeamento dos usos da terra na região de Campinas, SP.** 1997. 112p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo.

**CPRM; COMIG. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil:** Ipanema, Folha SE.24-Y-C-IV. Belo Horizonte, 2000. v. 26. 1 CD-ROM.

**CROSTA, A. P. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto.** Campinas: IG/UNICAMP, 1999. 170p.

**CYR, L.; BONN, F.; PESANT A.** Vegetation indices derived from remote sensing for an estimation of soil protection against water erosion. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 79, n. 1/3, p. 277-285, May 1995.

**DALLEMAND, J. F. Identificação de culturas de inverno por interpretação visual de dados SPOT e Landsat TM no noroeste do Paraná.** 1987. 131p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – INPE – São José dos Campos.

**DAY, P. R.** Particle fractionation and particle size analysis. In: **Methods of soil analysis physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling.** Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.545-566.

**DEMATTÊ, J. A. M. Reflectância espectral de solos.** 1999. 452p. Tese (Livre Docente) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

**DISPERATI, A. A. O uso do ultraleve para a obtenção manual de fotografias aéreas (35mm) verticais e inclinadas.** 1993. 118p. Tese (Concurso de professor do Departamento de Silvicultura e Manejo, Setor de Ciências Agrárias) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

**DNPM; CPRM. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil.** Cachoeiro do Itapemerim, 1993.

**EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA.** Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de**

**solos.** Brasília: EMBRAPA-Produção de Informação; Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 1999. 412p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de método de análise de solo.** Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS, 1979.

EPIPHANIO J.C.N.; FORMAGGIO, A.R. Abordagens de uso do número digital e de reflectância em sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 5., Natal, 1988. **Anais.** São José dos Campos: INPE. 1988, v. 2, p. 400-405.

EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R.; VALERIANO, M. et al. **Comportamento espectral dos solos do Estado de São Paulo.** São José dos Campos: INPE, 1992. 132 p. (INPE-5424-PRP/172).

FERNANDES, M. M. **Caracterização de solos e uso atual empregando aerofotos não-convencionais nas sub-bacias Marengo, Palmital e Silibar - Rio Turvo Sujo, MG.** 1996. 107p. Dissertação (Mestrado em Solos Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

FOODY, G. M. On the compensation for chance agreement in image classification accuracy assessment. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 58, n. 10, p. 1459-1460, Oct. 1992.

FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N.; VALERIANO, M. M. et al. Comportamento espectral (450-2.450 nm) de solos tropicais de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 3, p. 467-474, set./dez. 1996.

FRANCO, F. S. **Sistemas agroflorestais:** uma contribuição para a conservação dos recursos naturais na Zona da Mata de Minas Gerais. 2000. 148p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

FUNDAÇÃO DE DESENVOLVIMENTO REGIONAL – FUNDER. Disponível em: <<http://www.artnet.com.br/funder>>. Acesso em: 1 ago. 2000.

GALVÃO, L. S.; PIZARRO, M. A.; EPIPHANIO, J. C. N. Variations in Reflectance of Tropical Soils: Spectral-Chemical Composition Relationships from AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment, New York**, v. 75, n. 2, p. 245-255, Feb. 2001.

GAUSMAN, H. W.; GERBERMANN, A. H.; WIEGAND, C. L. et al. Reflectance differences between crop residues and bare soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 39, n. 4, p. 752-755, July/Aug. 1975.

GONG, P.; HOWART, P. J. An assessment of some factors influencing multispectral land-cover classification. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 56, n. 5, p. 597-603, May 1990.

HALL, F. G.; STREBEL, D. E.; NICHESON, J. E.; GOETZ, S. J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multibeam, multisensor images. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 35, n. 1, p. 11-27, Jan. 1991.

HILL, J.; STURM, B. Radiometric correction of multitemporal thematic mapper data for use in agricultural land-cover classification and vegetation monitoring. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 12, n. 7, p. 1471-1491, July 1991.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society America Bulletin**, Rochester, v. 56, n. 3, p. 275-3700, 1945.

IBC-GERCA (Rio de Janeiro, RJ). **Cultura de café no Brasil** – manual de recomendações. 4. ed. Rio de Janeiro, 1981. 503p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **SPRING 3.4**. São José dos Campos, 2000. 1 CD-ROM.

IPPOLITI-RAMILO, G. A. **Imagens TM/LandSat-5 da época de pré-plantio para a previsão da área de culturas de verão**. 1999. 183p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP.

JI, C. Y. Delineating agricultural field boundaries from TM imagery using dyadic wavelet transforms. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, Amsterdam, v. 51, n. 6, p. 268-283, Dec. 1996.

LACERDA, M. P. C. **Correlação geo-pedológica em solos B teturais na Região de Lavras, MG**. 1999. 257p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

LACERDA, M. P. C.; VIEIRA, T. G. C; ALVES, H. M. Estimativa de áreas cafeeiras ocupadas pela cafeicultura em regiões produtoras de Minas Gerais por meio de Geoprocessamento. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas. **Resumos expandidos...**: Brasília: Embrapa Café, 2000. v. 2, p.1356-1359.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, St. Louis, v. 33, n. 1, p. 159-174, Mar. 1977.

LELONG, C. C. D.; PINET, P. C.; POILVÉ, H. Hyperspectral imaging and stress mapping in agriculture: a case study on wheat in beauche (France). **Remote Sensing Environment**, New York, v. 66, n. 2, p. 179-191, Nov. 1998.

LEMONS, R. C. de; SANTOS, R. D. dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 3. ed. Campinas: SBCS/CNPS, 1996. 84p.

LEONARDI, L. **Influência de parâmetros culturais de cafezais sobre os dados TM/Landsat-5**. 1990. 171p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP.

MA, Z.; REDMOND, R. L. Tau coefficients for accuracy assessment of classification of remote sensing data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 61, n. 4, p. 453-459, Apr. 1995.

MARQUES JÚNIOR, J.; CURI, N.; LIMA, J. M. Evolução diferenciada de Latossolo vermelho-amarelo e Latossolo vermelho-escuro em função da litologia gnáissica na região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, n. 2, p.235-240, maio/ago. 1992.

MARKHAM, B.L.; BARKER, J.L. **Landsat MSS and TM postcalibration on dynamic ranges of exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures**. Lanham: EOSAT, 1986. 21 p. (Landsat Technical Notes n°1).

MATHER, P. M. **Computer processing of remotey-sensed images: an introduction**, 3. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1993. 352p.

MAUSEL, P.; BRONDIZIO, E. S.; MORAN, E. F. Discrimination between Alfisols and Oxisols in Areas along the Transamazon highway using Landsat TM data. **Proceedings of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing**. Rio de Janeiro: Eco-Rio 94, 1994. p.55-66.

MAUSEL, P.; WU, Y.; LI, Y. et al. Spectral Identification of Successional Stages Following Deforestation in the Amazon. **Geocarto International**, Hong Kong, v. 8, n. 4, p. 61-71, 1993.

MILNE, A. Change detection analysis using Landsat imagery: a review of methodology. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS'88), 1988, Edinburgh. **Proceedings**. Edinburgh: European Space Agency (ESA), 1988. p.541-544.

MONIZ, A. C. **Formation of an Oxisol-Ultisol transition in São Paulo, Brazil**. 1980. 290p. Tese (Doutorado) – North Caroline State University, Raleigh.

MOREIRA, A. M.; MARCELHAS e SOUZA, I. Análise de resultados de segmentação por crescimento de regiões em diferentes técnicas de processamento digital de dados do LANDSAT/TM para mapeamento de áreas cafeeiras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORISAMENTO REMOTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: INPE, 2001. 1 CR-ROM.

MOREIRA, L. de M. **Evolução crustal do Leste de Minas Gerais: uma contribuição a partir do estudo geotermobarométrico de metamorfítos da região de Simonésia-Manhuaçu (MG)**. 1997. 116p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. São José dos Campos: INPE, 2001.

MOREIRA, M. A.; NITZCHE, R. P. **Análise de índices de vegetação obtidos de dados de Landsat/TM e do SPOT/XS**. São José dos Campos: INPE, 1991. 10p.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 2. ed. São Paulo: E. Blücher, 1995. 308p.

NUNES, W. A. G. A.; KER, J. C.; SCHAEFER, C. E. G. R. et al. Relação solo-paisagem-material de origem de alguns solos no Domínio do “Mar de Morros”, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 341-354, abr./jun. 2001.

PENTEADO, M. M. **Fundamentos de geomorfologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: FIBGE, 1980. 185p.

PELLERIN, J.; POUGET, J.; FILHO, M. V. et al. Metodologia de utilização de dados espaciais Landsat MSS e TM no estudo de uso do solo: região de Marília, SP. **Geosul**, n.16, ano 8, 1993

POULTER, M. A. On the Integration of Earth Observation Data: Defining Landscape Boundaries to a GIS. In: **GEOGRAPHIC OBJECTS WITH INDETERMINATE BOUNDARIES – GISDATA**, 2., 1996, London. cap. 19, p.287-298.

**QUINTEIRO, F. Q. L. Levantamento do uso da terra e caracterização de ambientes da bacia hidrográfica do rio Turvo Sujo, com a utilização de aerofotos não-convenionais.** 1997. 91p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

RADAM Radar da Amazonia. Brasília, DF: Departamento Nacional de Minas Gerais e Energia. DNPM.

RESENDE, M. Sistema de classificação da aptidão agrícola dos solos (FAO-Brasileiro) para algumas culturas específicas: necessidades e sugestões para o desenvolvimento. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 9, n. 105, p. 83-88, set. 1983.

RESENDE, M.; CURI, N.; SANTANA, D. P. **Pedologia e fertilidade do solo: interações e aplicações**. Brasília: Ministério da Educação; Lavras: ESAL; Piracicaba: POTAPOS, 1988. 81p.

RESENDE, M.; REZENDE, S. B. Levantamentos de solos: uma estratificação de ambientes. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 9, n. 105, p. 3-25, set. 1983.

RESENDE, R. J. T. P. de. **Caracterização do meio físico de áreas cafeeiras do Sul de Minas Gerais por meio do SPRING**. 2000. 120p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

RESENDE, R. J. T. P. de; ALVES, H. M.; ANDRADE, H. Utilização do SPRING para a avaliação do uso da terra em agrossistemas cafeeiros da região de Lavras. In: **SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL**, 1., 2000, Poços de Caldas. **Resumos expandidos....**: Brasília: Embrapa Café e MINASPLAN, 2000. v. 2, p.1368-1371.

**REZENDE, S. B. Geomorphology, mineralogy and genesis of four soils on gneiss in southeastern Brazil.** 1980. 143p. Thesis (Ph D) – West Lafayette, Indiana./

RICHARDSON, A. J.; WIEGAND, C. L. Distinguishing vegetation from background information. **Photogrammetry and Engineering Remote Sensing**, Bethesda, v. 43, n. 12, p.1541-1552, Dec. 1977.

**ROCHA, J. V. The influence of ground survey size on accuracy of area estimates from satellite images.** 1992. 224p. Thesis (Ph.D.) - Cranfield Institute of Technology, Silsoe.

SADER, S.; WAIDE, R.; LAWRENCE, W. et al. Tropical forest biomass and successional age relationships to a vegetation index derived from Landsat TM data. **Remote Sensing Environment**, New York, v. 28, n. 2, p. 143-156, 1989.

**SERE; CAPÍTULO BRASIL; INPE. Projeto Educa SERE II. Capitais brasileiras.** 1998. 1 CD-ROM.

SHEVYRNOGOV A. P.; SIDKO, A. F. Remote diagnostics of vegetation covers by spectral brightness of plants. **Advances in Space Research**, Oxford, v. 16, n. 8, p. 185-188, 1995.

SHIMABUKURO, Y. E.; SANTOS J. R. dos; HANADEZ FILHO, P.; LEE, D. C. L. **Avaliação conjuntural da técnica de abordagem multisensor para o monitoramento da vegetação do Brasil.** São José dos Campos: INPE, 1991. 9p.

**SILVA, H. R. Técnicas de geoprocessamento na estimativa das áreas de culturas de verão.** 1994. 111p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – INPE, São José dos Campos, SP.

SILVA, S. L.; BALTAZAR, O. F.; BRANDALISE, L. A. et al. Estratigrafia, petrografia e petrologia. In: **Programa de levantamentos geológicos básicos do Brasil.** Ponte Nova – Folha SF.23-X-B-II, Estado de Minas Gerais. Brasília: MIE/SNMM/DNPM, 1991. p.7-9.

STORY, M.; CONGALTON, R. Accuracy assessment: a user's perspective. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 52, n. 3, p. 397-399, Mar. 1986.

TARDIN, A. T.; ASSUNÇÃO, G. V. de; SOARES, J. V. **Análise preliminar de imagens TM visando a discriminação de café, citrus e cana-de-açucar cana-de-açúcar na região de Furnas - MG.** São José dos Campos: INPE, 1990.

TOWNSHEND, J. R. G.; JUSTICE, C. O.; GURNEY, C. et al. The impact of misregistration on change detection. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 30, n. 5, p. 1054-1060, Sept. 1992.

TRIOLA, M. F. **Introdução a estatística.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999. 410p.

TSILIGIRIDES, T. A. Remote Sensing as a tool for agricultural statistics: a case study of area frame sampling methodology in Hellas. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 20, p. 45-77, June 1998.

VALENZUELA, C. R. Basic principles of Geographic Information System. In: In: BELWARD, A. S.; VALENZUELA, C. R. (Ed.). **Remote sensing and geographical information system for resource management in developing countries.** Dordrecht: Kluwer Academic, 1991. v.1, p.279-295.

VAN WAMBEKE, A. R. Criteria for classifying tropical soils by age. **Journal of Soils Science**, London, v. 13, n. 1, p. 124-132, Mar. 1962.

VETTORI, L. **Métodos de análise de solo.** Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura/Equipe de pedologia e Fertilidade de solos. 1969. 24p. (Boletim técnico, 7).

VIEIRA, T. G. C; LACERDA, M. P. C.; ALVES, H. M. Imagens orbitais aplicadas ao levantamento da cultura do café em Minas Gerais. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas. **Resumos expandidos...** Brasília: Embrapa Café, 2000. p.86-89.

WEIR, M. J. C. Errors in geographic information systems. In: BELWARD, A. S.; VALENZUELA, C. R. (Ed.). **Remote sensing and geographical information system for resource management in developing countries.** Dordrecht: Kluwer Academic, 1991. v. 1, p.349-355.

## **ANEXO A**

### **Caracterização morfológica**

#### **Perfil 1**

DATA: 21/06/01

CLASSIFICAÇÃO: LATOSOLO VERMELHO Distrófico típico

UNIDADE DE MAPEAMENTO: Lvd

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO ESTADO E COORDENADAS: Br-262, a cerca

de 9,5 Km da cidade de Reduto, MG (sentido Manhuaçu - Vitória). Vira-se à esquerda caminhando 1,3 Km no sentido de Jaguaraí; coordenadas geográficas: 41°54'56" W e 20°14'25" S.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL:

Descrito e coletado em barranco de corte de estrada no terço superior da encosta em declividade de 30%, sob plantio de café.

ALTITUDE: 840m

LITOLOGIA: granitóides, gnaisses e granulitos de composição variada

FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Unidade Inferior Simonésia, Unidade Superior Santana do Manhuaçu e Suíte Barra do Jaguaraí

GEOCRONOLOGIA: precambriano

MATERIAL ORIGINÁRIO: gnaisses

PEDREGOSIDADE: não pedregosa

ROCHOSIDADE: não rochosa

RELEVO LOCAL: forte ondulado

RELEVO REGIONAL: forte ondulado a montanhoso

EROSÃO: laminar moderada

DRENAGEM: acentuadamente drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta tropical subcaducifólia

USO ATUAL: café

CLIMA: Cwb (Köppen)

DESCRITO E COLETADO POR: M.L. Machado e H. Andrade.

### **Descrição morfológica**

- Ap 0-10 cm; bruno-avermelhado (5YR 4/4, úmida) (7,5YR 5/4, seca); argilosa; forte muito pequena granular; poros grandes; ligeiramente dura; friável, plástica e pegajosa; transição irregular e clara.
- AB 10-35 cm; bruno-avermelhado-escuro (2,5YR 3/4, úmida) e vermelho (2,5YR 5/8, seca); argilosa; forte muito pequena granular; macia, friável, plástica e pegajosa; transição ondulada e gradual.
- BA 35-50 cm; vermelho (2,5YR 4/6, úmida e seca); muito argilosa; fraca pequena blocos angulares e sub-angulares que tendem a forte muito pequena granular; macia, muito friável a friável, plástica e pegajosa; transição ondulada e gradual.
- Bw1 50-150 cm; vermelho-escuro (2,5YR 3/6, úmida); vermelho (2,5YR 4/6, seca); muito argilosa; forte muito pequena granular; macia; muito friável plástica e pegajosa; transição plana e difusa.
- Bw2 150-200(+) cm; vermelho-escuro (2,5YR 3/6, úmida e seca); muito argilosa; moderada média blocos angulares e sub-angulares que se desfazem em forte pequena granular; macia, muito friável, plástica e pegajosa.

**RAIZES** - Raízes pouco fasciculadas no A, finas; raras e finas no AB e BA; médias, mortas e raras no B1 e B2.

**OBSERVAÇÕES** – Intensa atividade biológica. Poros pequenos a grandes no A; galeria no AB, B (minhocas, térmitas); presença de carvão ao longo do perfil (do A ao B2).

### **Perfil 2**

**CLASSIFICAÇÃO:** ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico

**UNIDADE DE MAPEAMENTO: PVAd**

**LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO ESTADO E COORDENADAS:** Br-262 a cerca de 7 Km da cidade de Reduto, MG (sentido Manhuaçu - Vitória). Vira-se à esquerda na estrada de acesso a Jaguaraí; caminha-se 1,6 Km até o ponto de coordenadas geográficas 20°13'54"S 41°55'33"W.

**SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL:**

Descrito e coletado em barranco de corte de estrada (terraço) com declividade de 15%, sob plantio de café.

**ALTITUDE:** 710m

**LITOLOGIA:** granitóides, gnaisses e granulitos de composição variada

**FORMAÇÃO GEOLÓGICA:** Unidade Inferior Simonésia, Unidade Superior Santana do Manhuaçu e Suíte Barra do Jaguaraí

**GEOCRONOLOGIA:** precambriano

**MATERIAL ORIGINÁRIO:** Gnaisses

**PEDREGOSIDADE:** não pedregosa

**ROCHOSIDADE:** não rochosa

**RELEVO LOCAL:** ondulado

**RELEVO REGIONAL:** forte ondulado a montanhoso

**EROSÃO:** não aparente

**DRENAGEM:** bem drenado

**VEGETAÇÃO PRIMÁRIA:** Floresta tropical subcaducifólia

**USO ATUAL:** café

**CLIMA:** Cwb (Köppen)

**DESCRITO E COLETADO POR:** M.L. Machado e H. Andrade.

### **Descrição morfológica**

Ap 0-20 cm; bruno (7,5YR 4/4, úmida); bruno (7,5YR 5/4, seca); argilosa; forte pequena a média blocos angulares e sub-angulares; extremamente dura, firme, muito plástica e pegajosa; transição plana e clara.

- Bt 20-50 cm; bruno (7,5YR 4/4, úmida e seca); argilosa; forte pequena a grande blocos angulares e sub-angulares; dura; firme; cerosidade fraca e comum; plástica e pegajosa; transição plana e clara.
- 2Ab 50-80 cm; bruno escuro (7,5YR 3/3, úmida) e bruno (7,5YR 4/3, seca); argilosa; fraca a moderada pequena a grande blocos angulares a sub-angulares; ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa; transição plana e clara.
- Bg 80-100(+) cm (10YR 4/4, úmida) e bruno forte (7,5YR 4/6, seca); argilosa; fraca a moderada muito pequena a pequena blocos angulares e sub-angulares; dura, friável, muito plástico e muito pegajosa.
- RAIZES – poucas no A e B, faciculadas e pivotantes, finas, médias e grossas; raras no C1 e C2, faciculadas muito finas.

OBSERVAÇÕES – porosidade comum no A e B, poucas no C1 e C2; galerias no A e B.

### **Perfil 3**

CLASSIFICAÇÃO: LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico

UNIDADE DE MAPEAMENTO: LVAd

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO ESTADO E COORDENADAS: Br-262 a cerca de 7 Km da cidade de Reduto, MG (sentido Manhuaçu - Vitória). Vira-se à esquerda na estrada de acesso a Jaguaraí, caminhando 2,45 Km até o entrocamento de coordenada 20°14'24"S e 41°57'33"W; vira-se à direita, caminhando mais 0,95 Km até o ponto de coordenadas geográficas 20°13'12"S e 41°55'44"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL:

Descrito e coletado em barranco de corte de estrada, terço superior da encosta, com declividade de 29%, sob pastagem.

ALTITUDE: 770m

LITOLOGIA: granitóides, gnaisses e granulitos de composição variada  
FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Unidade Inferior Simonésia, Unidade Superior  
Santana do Manhuaçu e Suíte Barra do Jaguaraí  
GEOCRONOLOGIA: precambriano  
MATERIAL ORIGINÁRIO: Gnaisses  
PEDREGOSIDADE: não pedregosa  
ROCHOSIDADE: não rochosa  
RELEVO LOCAL: forte ondulado  
RELEVO REGIONAL: forte ondulado a montanhoso  
EROSÃO: laminar moderada  
DRENAGEM: acentuadamente drenado  
VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta tropical subcaducifólia  
USO ATUAL: pastagem natural  
CLIMA: Cwb (Köppen)  
DESCRITO E COLETADO POR: M.L. Machado e H. Andrade.

#### **Descrição morfológica**

- Ap 0-10 cm; bruno forte (7,5YR 4/6, úmida), amarelo brunado (7,5YR 6/8, seca); argilosa; forte muito pequena a média blocos angulares subangulares e granular; macia, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
- A2 10-60 cm; bruno forte (7,5YR 4/6, úmida), amarelo brunado (7,5YR 6/8, seca); argilosa; moderada muito pequena a pequena granular; macia, friável, plástica e ligeiramente pegajosa; concreções duras pequenas e muito pouco; transição plana difusa.
- A3 60-100 cm; bruno forte (7,5YR 5/6, úmida), amarelo brunado (7,5YR 6/8, seca); argilosa; forte moderada muito pequena a pequena granular; macia; muito friável a friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; concreções duras pequenas e muito pouco; transição plana difusa.

Bw 100-160(+) cm; bruno forte (7,5YR 5/8, úmida), amarelo brunado (7,5YR 6/8, seca); argilosa; forte muito pequena granular; macia, friável, plástica e pegajosa; concreções duras pequenas e muito pouco.

OBSERVAÇÕES – A1: topo degradado de uma A húmico. A2: base de A húmico degradado.

#### **Perfil 4**

CLASSIFICAÇÃO: CAMBISSOLO HÁPLICO Tb distrófico típico

UNIDADE DE MAPEAMENTO: CXbd

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO ESTADO E COORDENADAS: Br-262 a cerca de 7 Km da cidade de Reduto, MG (sentido Manhuaçu - Vitória). Vira-se à esquerda na estrada de acesso a Jaguaraí, caminhando 1,2 Km até o ponto de coordenadas geográficas 20°14'04"S e 41°55'34"W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL:

Descrito e coletado em barranco de corte de estrada, terço inferior da encosta, com declividade de 32%, sob plantio de café.

ALTITUDE: 720m

LITOLOGIA: granitóides, gnaisses e granulitos de composição variada

FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Unidade Inferior Simonésia, Unidade Superior Santana do Manhuaçu e Suíte Barra do Jaguaraí

GEOCRONOLOGIA: precambriano

MATERIAL ORIGINÁRIO: Gnaisses

PEDREGOSIDADE: não pedregosa

ROCHOSIDADE: não rochosa

RELEVO LOCAL: forte ondulado

RELEVO REGIONAL: forte ondulado a montanhoso

EROSÃO: laminar moderada

DRENAGEM: bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta tropical subcaducifólia

USO ATUAL: café

CLIMA: Cwb (Köppen)

DESCRITO E COLETADO POR: M.L. Machado e H. Andrade.

#### **Descrição morfológica**

- Ap 0-5 cm; (2,5YR 5/4, úmida) (5YR 6/4, seca); textura média; fraca pequena a média blocos angulares e sub-angulares; macia friável a firme, plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
- Bi 5-40 cm; (2,5YR 4/4, úmida) (2,5YR 4/6, seca); argilosa; fraca pequena média blocos angulares e sub-angulares; macia; firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana difusa.
- BC 40-80 cm; (2,5YR 5/4, úmida) (2,5YR 5/4, seca); textura média; fraca pequena a média sub-angulares; macia, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e abrupta.
- 2Ab 80-90 cm; (2,5YR 4/3, úmida) (5YR 5/3, seca); textura média; fraca pequena blocos angulares sub-angulares e granular; macia, firme, não plástica e não pegajosa; transição plana clara.
- B 90-115 cm; (2,5YR 4/4, úmida) (2,5YR 4/4, seca); textura média; fraca pequena a média blocos angulares e sub-angulares; macia, friável, ligeiramente plástica e não pegajosa; transição plana e difusa.
- BC 115-150(+) cm; (2,5YR 3/4, úmida) (2,5YR 4/4, seca); textura média; fraca pequena blocos angulares e sub-angulares; macia, friável, ligeiramente plástica e não pegajosa.

Os perfis descritos acima são mostrados nas fotos 2, 3, 4 e 5.

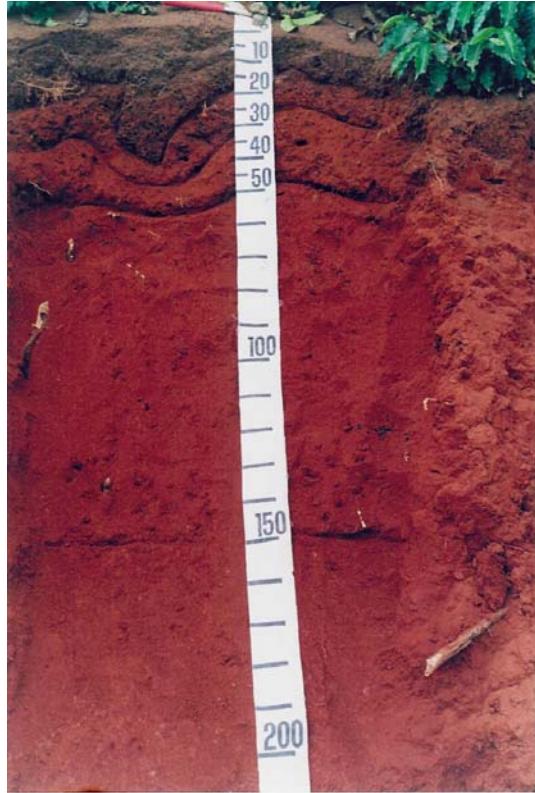


FOTO 1 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (LVd) amostrado em pedoforma convexa.



FOTO 2 - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico (PVAd) amostrado em terraço.

120



FOTO 3 - LATOSOLO VERMELHO-AMARELO  
Distrófico típico (LVAd) amostrado  
em pedoforma convexa

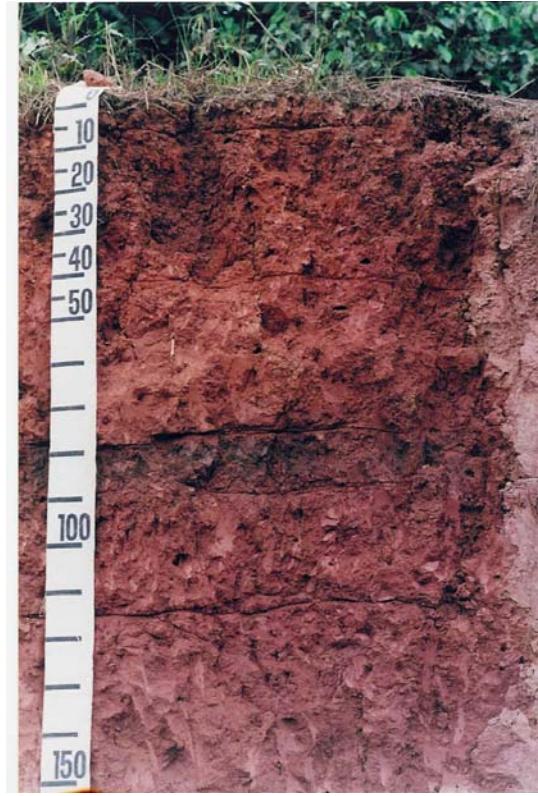


FOTO 4 - CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico  
(CXbd) amostrado em pedoforma côncava