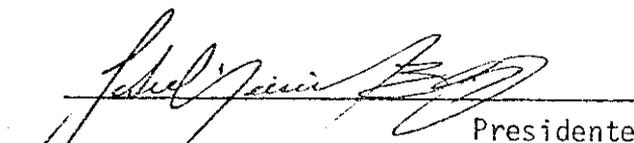


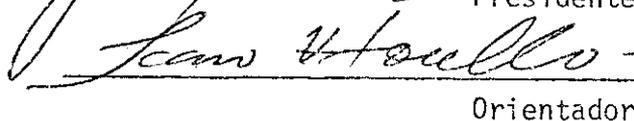
| | | | |
|---|----------------------------|---|--|
| 1. Publicação nº <i>INPE-2878-TDL/144</i> | 2. Versão | 3. Data <i>Set., 1983</i> | 5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita |
| 4. Origem <i>DRH-DDS</i> | Programa <i>FRH/SER</i> | | |
| 6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>COMPORTAMENTO ESPECTRAL ESPECTRORADIOMETRIA</i> <i>SOLOS</i> <i>SEPARABILIDADE ESPECTRAL</i> | | | |
| 7. C.D.U.: <i>528.711.7:631.41(816.1)</i> | | | |
| 8. Título <i>INPE-2878-TDL/144</i> <i>COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE QUATRO SOLOS DO ESTADO DE SÃO PAULO NOS NÍVEIS ORBITAL, DE CAMPO E DE LABORATÓRIO</i> | | 10. Páginas: <i>140</i> | 11. Última página: <i>B.31</i> |
| 9. Autoria <i>Antonio Roberto Formaggio</i> | | 12. Revisada por  <i>Ícaro Vitorello</i> | |
| Assinatura responsável  | | 13. Autorizada por  <i>Nelson de Jesus Parada</i> Diretor Geral | |
| 14. Resumo/Notas <i>Os objetivos da presente pesquisa foram: a) caracterizar o comportamento espectral dos Grandes Grupos de Solos Latossol Vermelho-Amarelo (LV), Latossol Vermelho Escuro (LE), Latossol Roxo (LR) e Podzólico Vermelho-Amarelo (PV), que se constituem em quatro solos de grande importância no Estado de São Paulo; b) determinar a separabilidade espectral entre os quatro solos; e c) analisar a influência dos parâmetros físicos e químicos destes solos em seu comportamento espectral. Foram obtidos dados espectrais em três níveis: laboratório, campo e orbital. Para os dois primeiros, os dados foram coletados no intervalo de 400 a 1100 nm com um espectrorradiômetro e com um radiômetro portátil, respectivamente. Para o último, os níveis de cinza foram extraídos de fitas compatíveis com computador (CCT) do sensor MSS/LANDSAT-3, através do Analisador de Imagens Multiespectrais Image-100. Os resultados, analisados e discutidos, permitiram chegar, entre outras, às seguintes conclusões: a) os quatro solos estudados apresentam dois tipos de padrões espectrais (LV e PV, tipo 1 e LR e LE, tipo 2); b) os solos do tipo 1 são separáveis dos do tipo 2, porém não são entre si; c) os fatores que mais influenciaram os comportamentos espectrais dos solos foram as suas características físicas e químicas, principalmente as suas condições superficiais, os conteúdos de óxidos de ferro e de matéria orgânica e a cor; d) os três níveis de coleta de dados utilizados ratificaram-se tanto relativa como mutuamente.</i> | | | |
| 15. Observações <i>Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto aprovada em 09 de junho de 1983.</i> | | | |

Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Sensoriamento Remoto

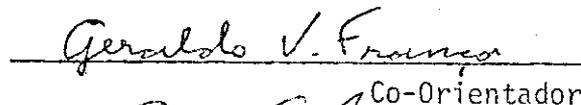
Dr. Getúlio Teixeira Batista


Presidente

Dr. Ícaro Vitorello


Orientador

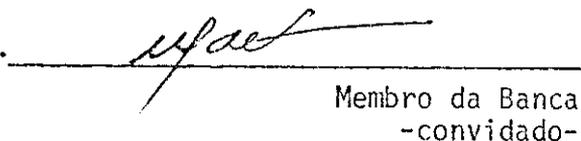
Dr. Geraldo Victorino de França


Co-Orientador

Dr. Liovando Marciano da Costa


Membro da Banca
-convidado-

Engº Agro. Mario Valério Filho, MSc.


Membro da Banca
-convidado-

Candidato: Antonio Roberto Formaggio

São José dos Campos, 09 de junho de 1983

Aos meus queridos pais,
com gratidão,

dedico.

À minha esposa Marta,
pelo decidido apoio e incentivo,

ofereço.

AGRADECIMENTOS

Toda pesquisa é produto do esforço de várias pessoas, imbuídas do mesmo espírito construtivo voltado para o bem comum. Assim, expressamos os nossos agradecimentos

- aos prezados orientadores, Dr. Ícaro Vitorello (INPE) e Dr. Geraldo Victorino de França (ESALQ);
- aos companheiros de trabalho Mário Valério Filho, Juércio Tavares de Mattos, José Carlos Neves Epiphanyo, Waldir Renato Paradella, Paulo Roberto Meneses, Tomoyuki Ohara, Edison Crepani, Maria Bernadete Caetano de Souza, Horacina Maria da Silva Montes, Nilton Nobuhiro Imai, Bernardo Friedrich Theodor Rudorff, Edgar da Silva Fagundes Filho, Tereza Florenzano, Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo, Maria Aparecida de Souza e Luis Henrique Azevedo Barbosa pela sempre pronta colaboração e valiosas sugestões;
- à minha esposa Marta Marize Ducatti Formaggio, pelos desenhos;
- ao Moacir Godoy Júnior e ao Sérgio Roberto Mattiello Pelegrino pelos trabalhos computacionais;
- à Rosana Bandones, pela parte de obtenção dos dados de laboratório; e
- a todos aqueles que, de uma ou de outra forma, deram a sua colaboração.

Também agradecemos ao IAA/Planalsucar na pessoa do Dr. Natálio Felipe Koffler, pelo empréstimo das fotografias aéreas; ao CPAC/EMBRAPA, pelo empréstimo do radiômetro de campo; e ao INPE, nas pessoas do Dr. Nelson de Jesus Parada e do Sr. René Antonio Novaes, por terem proporcionado o uso de todas as facilidades deste Instituto.

ABSTRACT

The objectives of the present research were: a) to characterize the spectral behaviour of four important soil great groups of the State of São Paulo, Brazil, namely, Red Yellow Latosol (LV), Dark Red Latosol (LE), Dusk Red Latosol (LR) and Red Yellow Podsollic (PV); b) to ascertain the spectral separability among these four soils; and c) to determine the effects of physical and chemical soil parameters in their spectral behaviour. The study involved spectral data collected at laboratory, field and orbital levels. For the first two, data were collected at the 400 to 1100 nm interval with a spectroradiometer and a hand-held radiometer, respectively. For the last kind of data, gray levels were extracted from CCT (Computer Compatible Tape) derived from LANDSAT-3 MSS through the use of the Multispectral Image Analyzer Image-100. The following conclusions were reached after data analysis and discussions over the results: a) the four studied soils presented two types of spectral behaviour (type 1, composed by LV and PV and type 2, composed by LR and LE); b) type 1 soils were spectrally separable from type 2 soils but not among themselves; c) the most spectrally affecting factors were the soil surface conditions, iron and organic matter content, and color; and d) the resulting spectral behaviour observed at the three levels were in concordance with each other.



SUMÁRIO

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| LISTA DE FIGURAS | <i>xi</i> |
| LISTA DE TABELAS | <i>xiii</i> |
| <u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u> | 1 |
| <u>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA</u> | 3 |
| 2.1 - Energia radiante - Espectro eletromagnético | 3 |
| 2.2 - Tipos de sensores - Utilização dos dados | 5 |
| 2.3 - Características espectrais dos solos | 7 |
| 2.4 - Técnicas multiespectrais para mapeamento de solos | 23 |
| <u>CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS</u> | 27 |
| 3.1 - Descrição geral da área de estudo | 27 |
| 3.2 - Descrição sucinta dos Grandes Grupos de solos da área | 30 |
| 3.2.1 - Latossol Vermelho Escuro (LE) | 30 |
| 3.2.2 - Latossol Vermelho-Amarelo (LV) | 31 |
| 3.2.3 - Latossol Roxo (LR) | 31 |
| 3.2.4 - Podzólico Vermelho-Amarelo (PV) | 32 |
| 3.3 - Dados MSS/LANDSAT | 32 |
| 3.4 - Fotografias aéreas | 33 |
| 3.5 - Mapas e cartas | 33 |
| 3.6 - Analisador Multiespectral Image-100 | 34 |
| 3.7 - Espectrorradiômetros | 35 |
| 3.7.1 - Para as medidas de campo | 35 |
| 3.7.2 - Para as medidas de laboratório | 36 |
| 3.8 - Outros equipamentos e materiais | 36 |
| 3.9 - Seleção da área de estudo | 37 |
| 3.10 - Obtenção dos parâmetros espectrais digitais | 38 |
| 3.11 - Obtenção dos dados de espectrometria de campo | 40 |
| 3.12 - Obtenção dos dados de espectrometria de laboratório | 42 |
| 3.12.1 - Preparação das amostras | 42 |
| 3.12.2 - Obtenção das medidas espectrais | 43 |
| 3.13 - Obtenção dos parâmetros físicos e químicos | 44 |
| 3.13.1 - Teor de matéria orgânica | 45 |

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 3.13.2 - Teor de Fe ₂ O ₃ | 45 |
| 3.13.3 - Capacidade de troca catiônica (CTC) | 45 |
| 3.13.4 - Composição granulométrica | 46 |
| 3.14 - Análises quantitativas dos dados | 46 |
| <u>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO</u> | 51 |
| 4.1 - Comportamentos espectrais dos quatro solos | 51 |
| 4.1.1 - Dados de laboratório | 51 |
| 4.1.2 - Dados de campo | 56 |
| 4.1.3 - Dados digitais MSS/LANDSAT | 62 |
| 4.2 - Separabilidade espectral dos solos | 67 |
| 4.3 - Influência dos parâmetros físicos e químicos | 78 |
| 4.4 - Correlações entre os dados espectrais de campo e de laboratório | 81 |
| <u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u> | 83 |
| 5.1 - Conclusões | 83 |
| 5.2 - Recomendações | 84 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 85 |
| APÊNDICE A - DADOS DAS ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS DE 17 AMOSTRAS DE SOLOS UTILIZADAS PARA A ESPECTROMETRIA DE LABORATÓRIO. | |
| APÊNDICE B - CURVAS ESPECTRAIS DOS QUATRO SOLOS OBTIDAS EM CONDIÇÕES DE CAMPO E DE LABORATÓRIO. | |

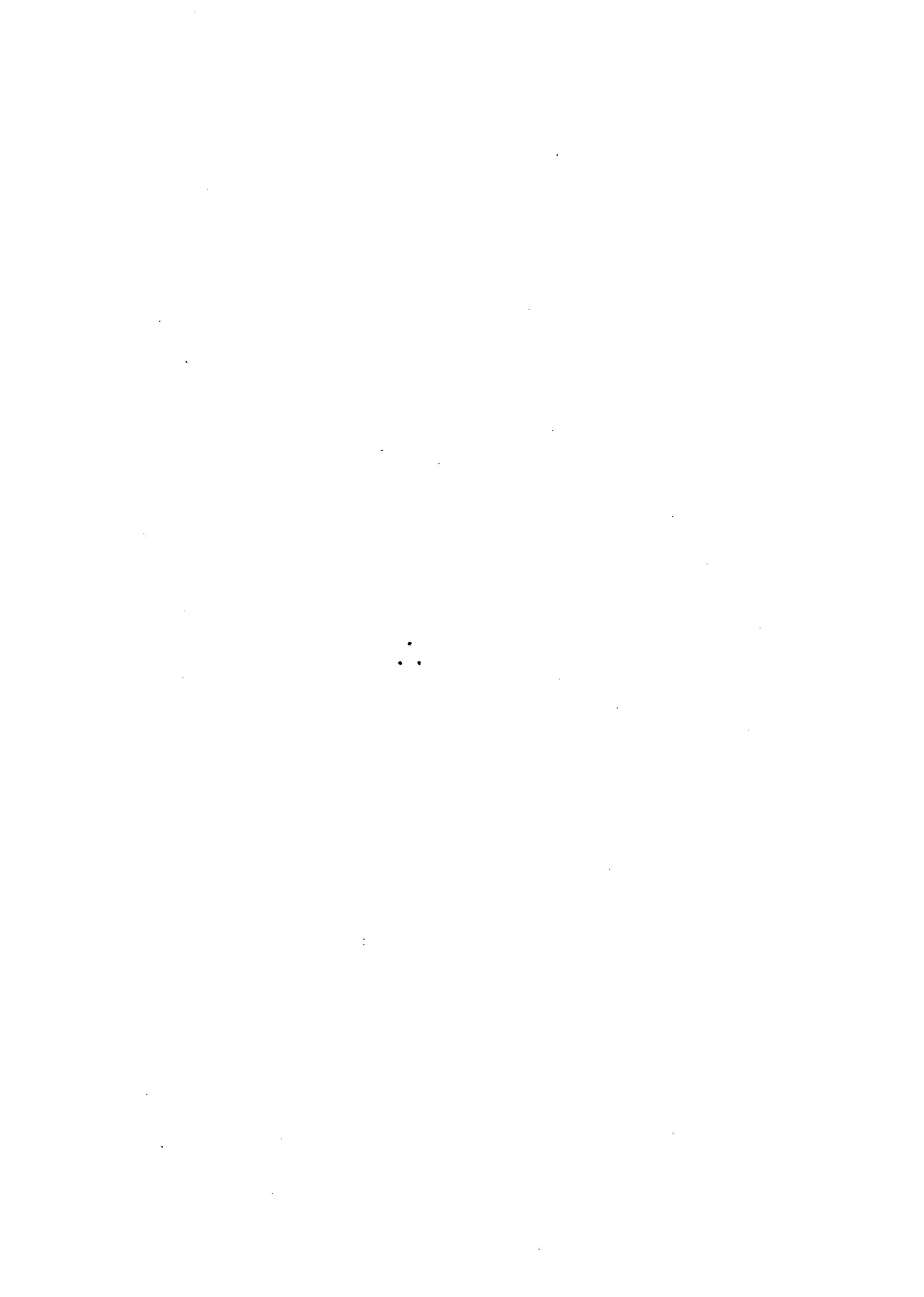
LISTA DE FIGURAS

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| 2.1 - O espectro eletromagnético, enfatizando, na parte inferior, as regiões mais importantes em sensoriamento remoto multiespectral | 4 |
| 2.2 - Curvas de reflectância espectral de vegetação verde e de solos secos ao ar, as quais correspondem à média de 240 espectros de vegetação e de 15 espectros de solos | 8 |
| 2.3 - Porcentagem de reflectância X radiação incidente em vários conteúdos de umidade; os conteúdos de umidade estão indicados diretamente acima de cada curva | 9 |
| 2.4 - Curva de reflectância do Tipo 1 para amostras de solos da Ordem dos "Mollisols" | 16 |
| 2.5 - Curva de reflectância do Tipo 2 para amostras de solos da Ordem dos "Alfisols" | 17 |
| 2.6 - Curva de reflectância do Tipo 2 para amostras de solos da série "Frederick" | 18 |
| 2.7 - Curva de reflectância do Tipo 3 para amostras de solos da série "Talbott" | 19 |
| 2.8 - Curva de reflectância do Tipo 4 para amostras de solos "very-fine oxidic thermic Haplic Acrorthox" | 20 |
| 2.9 - Curva de reflectância do Tipo 5 para amostras de solos "Typic Haplorthox" de Londrina-PR, Brasil | 21 |
| 3.1 - Localização da área de estudo dentro da cena LANDSAT 178/27, abrangendo o município de Leme-SP | 27 |
| 3.2 - Solos da área de estudo (Leme-SP) | 29 |
| 3.3 - Esquema utilizado para a obtenção de medidas espectrais no campo | 41 |
| 3.4 - Configuração do sistema de equipamentos montado para a obtenção das medidas espectrorradiométricas das amostras de solos em laboratório | 43 |
| 3.5 - Gráfico ilustrativo da probabilidade de classificação correta em função da distância JM | 49 |
| 4.1 - Curvas espectrais médias para os solos LE, LR, LV e PV, obtidas em condições de laboratório | 53 |
| 4.2 - Curvas espectrais médias para os solos LE, LR, LV e PV, obtidas em condições de campo | 59 |
| 4.3 - Valores digitais médios de 63 amostras de níveis de cinza do MSS/LANDSAT, dos quatro solos | 64 |
| 4.4 - Projeção dos índices discriminantes sobre os eixos das funções discriminantes, para os dados de laboratório, com os quatro solos combinados dois a dois | 71 |

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 4.5 - Projeção dos Índices discriminantes sobre os eixos das funções discriminantes, para os dados de campo, com os quatro solos combinados dois a dois | 72 |

LISTA DE TABELAS

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 3.1 - Importância dos solos estudados, em relação ao Estado de São Paulo, em extensão areal | 38 |
| 3.2 - Distribuição das amostras de níveis de cinza por Grande Grupo de solo, obtidas no Image-100 | 39 |
| 4.1 - Valores espectrais de 17 amostras dos quatro solos, obtidos em laboratório | 52 |
| 4.2 - Valores espectrais dos quatro solos, obtidos em condições de campo | 57 |
| 4.3 - Valores digitais de 63 amostras de níveis de cinza obtidos das fitas CCT | 63 |
| 4.4 - Valores da relação canal 5/canal 7 e da magnitude para as 63 amostras de níveis de cinza para os quatro solos | 66 |
| 4.5 - Valores da Análise Discriminante Linear para os dados espectrais de laboratório | 68 |
| 4.6 - Valores da Análise Discriminante Linear para os dados espectrais de campo | 69 |
| 4.7 - Valores da Distância JM para a combinação dos quatro canais MSS/LANDSAT | 74 |
| 4.8 - Valores máximos de Distância JM para combinações de três canais MSS/LANDSAT | 75 |
| 4.9 - Valores máximos de Distância JM para combinações de dois canais MSS/LANDSAT | 76 |
| 4.10- Valores máximos de Distância JM e respectivos canais MSS/LANDSAT | 77 |
| 4.11- Valores dos coeficientes de correlação linear simples (r^2) entre os dados de campo (CCH) e os de laboratório (LCH) | 81 |



CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Por definição, Sensoriamento Remoto é o conjunto de técnicas destinadas à obtenção de informações sobre objetos de interesse, sem entrar em contato direto com eles.

Neste esforço, as técnicas de espectrometria são muitas vezes usadas para determinar a composição e a natureza dos materiais-alvo, particularmente no tocante aos recursos naturais terrestres.

No caso das geociências, muitas vezes o comportamento espectral da vegetação, ou dos solos, ou mesmo das rochas que lhes deram origem, tem interesse; ou como uma assinatura espectral por si própria, ou como um ruído que deve ser entendido a fim de que os seus efeitos possam ser bem circunscritos e eliminados; ou ainda para estudar a discriminabilidade de classes, para orientar na seleção de faixas espectrais de aquisição e no processamento ou na análise de dados coletados remotamente.

Assim, razoável número de pesquisas vem sendo realizado em muitas instituições, tendo-se já obtido excelentes avanços nos métodos de medida da energia radiante para identificar e caracterizar feições naturais terrestres. Para tanto, grande variedade de instrumentos vem sendo empregada para medir a energia refletida e emitida por alvos ou por objetos de interesse, tanto em condições de laboratório como em condições de campo.

Estudos deste tipo têm demonstrado boas correlações entre certas propriedades químicas e físicas dos solos e as suas características de interação com a radiação eletromagnética natural.

Entretanto, a despeito do largo uso das técnicas espectrométricas em Sensoriamento Remoto, o comportamento espectral dos solos,

especialmente no caso brasileiro, com sua ampla variedade de tipos, até o presente foi muito pouco estudado e, assim, pode-se afirmar que ainda não é bem entendido.

Visando contribuir para o preenchimento desta lacuna, a presente pesquisa tem por objetivo examinar, dentro das possibilidades técnicas e instrumentais disponíveis no momento, as características espectrais de quatro dos mais importantes solos do Estado de São Paulo. Avalia-se também, qualitativa e quantitativamente, a discriminabilidade espectral destes solos, bem como as relações entre algumas propriedades físicas e químicas deles com os seus espectros de reflectância.

Para tanto, foram obtidos dados em três estágios distintos e complementares de abordagens utilizadas em Sensoriamento Remoto: ao nível de laboratório, ao nível de campo e ao nível de satélite, os quais serviram de base para todos os passos deste trabalho.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DE LITERATURA

2.1 - ENERGIA RADIANTE - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

O sensoriamento remoto multiespectral baseia-se fundamentalmente nas interações (reflexão, absorção e emissão) entre a energia eletromagnética e os alvos de interesse.

A energia eletromagnética desempenha o papel de elo de ligação entre os sensores e os objetos localizados remotamente. As mudanças nas propriedades da radiação eletromagnética tornam-se, ao serem detectadas, uma valiosa fonte de informações sobre as propriedades do meio com o qual ela interagiu.

O Sol, para a Terra, constitui-se na fonte de radiação natural mais importante, pois a sua energia, ao atingir a superfície terrestre, origina uma série de fenômenos, tais como a absorção, a reflexão e a emissão, os quais são influenciados por parâmetros intrínsecos aos materiais-alvos.

O espectro eletromagnético estende-se desde os comprimentos de onda mais curtos e, portanto, de maiores frequências, que são os raios cósmicos, até as ondas de rádio, de baixas frequências e comprimentos de onda muito longos (Figura 2.1).

A radiação eletromagnética é definida por um espectro de emissão da fonte, e as suas ondas eletromagnéticas são caracterizadas por dimensões convencionadas como comprimento de onda, frequência, energia, etc.

As unidades internacionais usadas para dimensionar o comprimento de onda são o micrômetro (μm), equivalente a 10^{-6} do metro, e o nanômetro (nm), equivalente a 10^{-9} do metro.

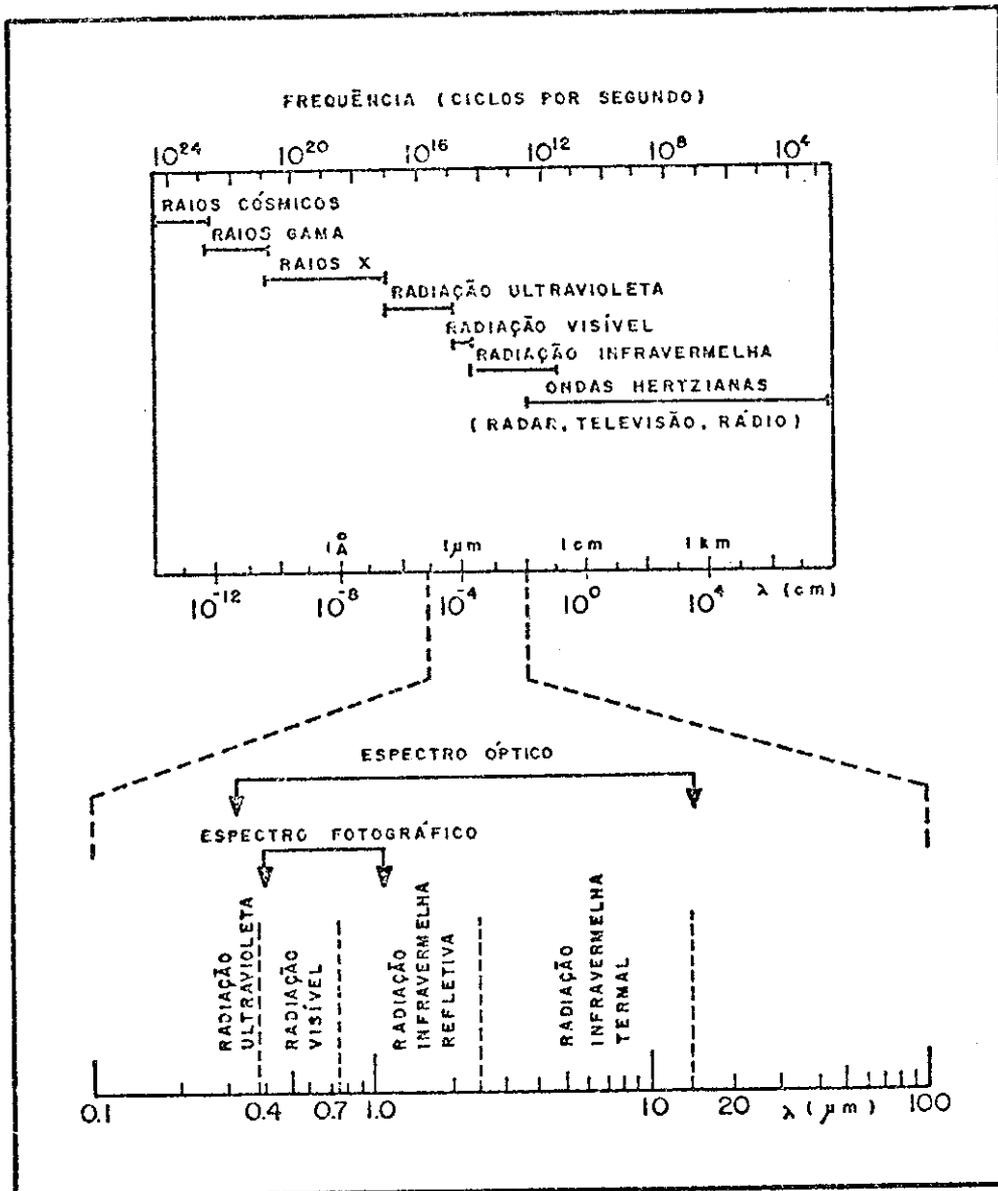


Fig. 2.1 - O espectro eletromagnético, enfatizando, na parte inferior, as regiões mais importantes em sensoriamento remoto multiespectral.

FONTE: Hoffer (1967), p. 21.

Segundo Bauer (1975), a faixa de $0,3 \mu\text{m}$ a 100 cm é a utilizada em sensoriamento remoto, sendo que a porão visível do espectro estende-se desde $0,4$ até $0,7 \mu\text{m}$ e é composta por comprimentos de onda aos quais nossos olhos são sensíveis.

2.2 - TIPOS DE SENSORES - UTILIZAÇÃO DOS DADOS

A fim de captar a energia eletromagnética interagida com os alvos naturais, foram desenvolvidos e são atualmente utilizados vários tipos de sensores.

Segundo Colwell (1966), os sensores podem ser de dois tipos: (1) passivos, quando registram a energia solar refletida e emitida pela superfície terrestre e (2) ativos, quando geram a própria energia para iluminar artificialmente os objetos-alvos.

Entre os sensores do tipo passivo podem ser citados os radiômetros, espectrômetros, as máquinas fotográficas, os imageadores multiespectrais, os imageadores IV termal e outros de utilização menos generalizada.

Entre os sensores do tipo ativo podem ser citados, principalmente, os lasers e os radares.

Quanto ao tipo de produto fornecido, os sistemas sensores podem ser classificados em imageadores e não-imageadores. No primeiro caso, obtêm-se uma representação tridimensional da variável de interesse (fotografias aéreas, imagens de radar, etc.). No segundo caso, obtêm-se valores de leituras, gráficos ou fitas magnéticas.

Segundo Amaral (1975), a maior precisão e sensibilidade dos espectrômetros, quando comparados com os seus equivalentes imageadores, torna-os indispensáveis quando se deseja um tratamento quantitativo das propriedades espectrais dos materiais naturais.

As fotografias aéreas estão entre os mais comuns e úteis tipos de produtos de sensores remotos. São usadas para diversos tipos de mapeamentos em Agricultura, Pedologia, Geologia, Silvicultura e em Planejamento Cívico, assim como servem para muitos outros usos (Whitmore e Thompson, 1966).

Os filmes fotográficos disponíveis são sensíveis ao intervalo espectral de 0,4 a 0,9 μm , correspondente às faixas espectrais do visível e do infravermelho refletivo.

Costa (1979) afirma que as fotografias aéreas também desempenham um importante papel como parte da verdade terrestre na interpretação de imagens de satélite.

Os imageadores multiespectrais de varredura têm a capacidade de coletar dados de 0,3 a 14,0 μm e podem ser montados em aeronaves ou em satélites. Estudos de laboratório e de campo são usualmente executados para comparação com os dados obtidos através de imageadores, a fim de auxiliar a sua interpretação.

Segundo Lowe et alii (1975), os imageadores óptico-mecânicos são considerados instrumentos mais complexos do que as câmaras fotográficas, com resolução semelhante. Entretanto, eles levam algumas vantagens, tais como: (1) a possibilidade de obter imagens fora da região fotográfica; (2) a saída é um sinal elétrico, sendo assim possível a sua imediata transmissão, gravação e digitalização; e (3) os detectores não são consumidos durante o processo de detecção.

Graças a estas características, estes tipos de imageadores têm sido utilizados nos satélites da série LANDSAT, destinados ao levantamento dos recursos naturais da Terra.

De acordo com Koffler (1982), em imagens orbitais, da mesma forma que em fotografias aéreas de pequena escala, a tonalidade é o fator mais significativo e útil para os trabalhos de identificação de feições da superfície terrestre.

Para Hoffer et alii (1972), na interpretação de áreas agrícolas e florestais em imagens de grande escala, a tonalidade é menos importante do que a forma, o tamanho, a textura e outros elementos de foto interpretação. Entretanto, à medida que diminui a escala, perde-se em resolução espacial e as variações tonais tornam-se mais importantes.

Koffler (1982) comenta que em imagens LANDSAT, obtidas a 918 km de altitude, a tonalidade ganha ainda mais importância por refletir o comportamento espectral dos objetos nas quatro dimensões geradas pelo imageador de varredura do sistema MSS. Entretanto, a dificuldade da interpretação visual simultânea de quatro imagens, além da subjetividade inerente a tal tipo de trabalho, tem levado a maior parte dos pesquisadores à análise quantitativa, seja através da densitometria de transparências ou do tratamento automático dos dados digitais armazenados em fitas compatíveis com computador (CCT).

Nesse sentido, Landgrebe (1976) afirma que a análise numérica automática ainda não está bem desenvolvida, mas está sendo melhorada muito rapidamente, a fim de corresponder aos anseios e à grande demanda de uma ampla variedade de usuários.

2.3 - CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DOS SOLOS

A superfície terrestre, conforme é detectada pelos sensores remotos, pode ser vista como uma paisagem composta dos seguintes elementos: água, vegetação e solos.

Tanto a vegetação como os solos possuem padrões próprios de resposta a interações com a energia eletromagnética natural (Figura 2.2), o que propicia a possibilidade de obtenção de informações sobre aqueles alvos através de sensores colocados em plataformas remotas.

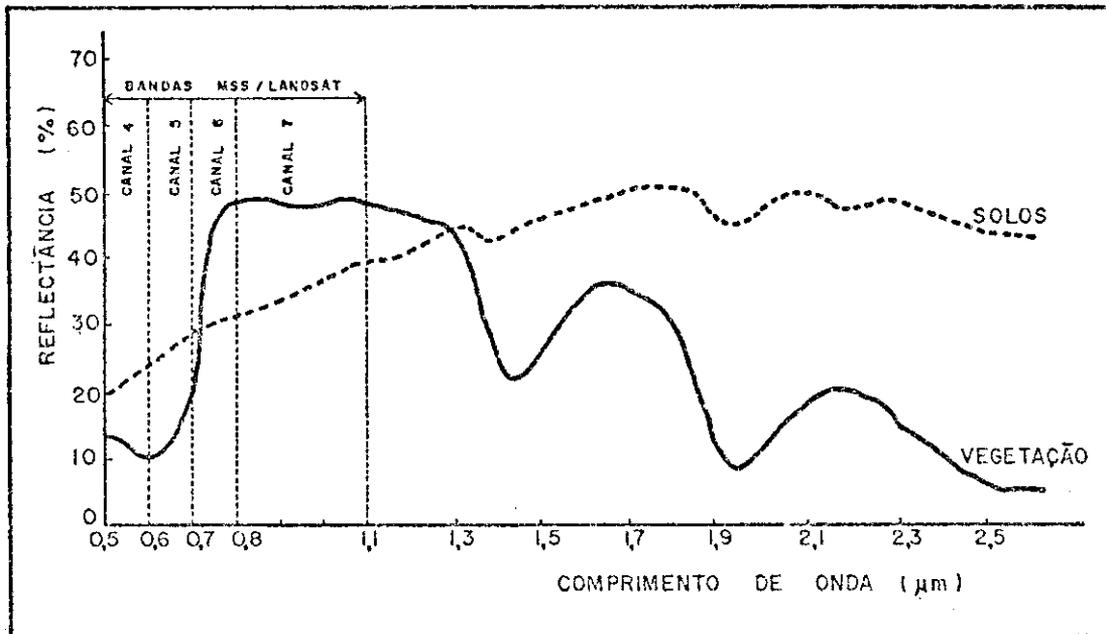


Fig. 2.2 - Curvas de reflectância espectral de vegetação verde e de solos secos ao ar, as quais correspondem à média de 240 espectros de vegetação e de 15 espectros de solos.

FONTE: Hoffer (1972), p. 14.

Os contrastes de reflectância espectral para os alvos naturais aparecem como contrastes tonais em imagens fotográficas e não-fotográficas e são importantes em todo o intervalo espectral da energia solar refletida (cerca de 250 a 3000 nm), no sensoriamento remoto.

No caso dos solos, o seu comportamento espectral varia de acordo com diversos fatores intrínsecos a eles, dentre os quais têm sido citados como os mais importantes: a umidade, o conteúdo de matéria orgânica, a textura, a cor, a capacidade de troca catiônica (CTC), o conteúdo de óxidos de ferro e as suas condições de superfície.

Bowers e Hanks (1965) realizaram medidas de reflectância de amostras de solos num espectrofotômetro Beckam DK-2A e mostraram que o conteúdo de umidade da camada superficial, a matéria orgânica e o tamanho das partículas influenciam fortemente a reflectância dos solos. Quanto à umidade, aqueles autores concluíram que, à medida que aumenta, pro

voca a diminuição da reflectância. Aumentando o conteúdo de água de um solo da série "Newtonia silt loam" de 0,8 para 20,2%, a absorção de energia radiante pela água aumentou de 14,2% no intervalo espectral de 500 a 2500 nm (Figura 2.3).

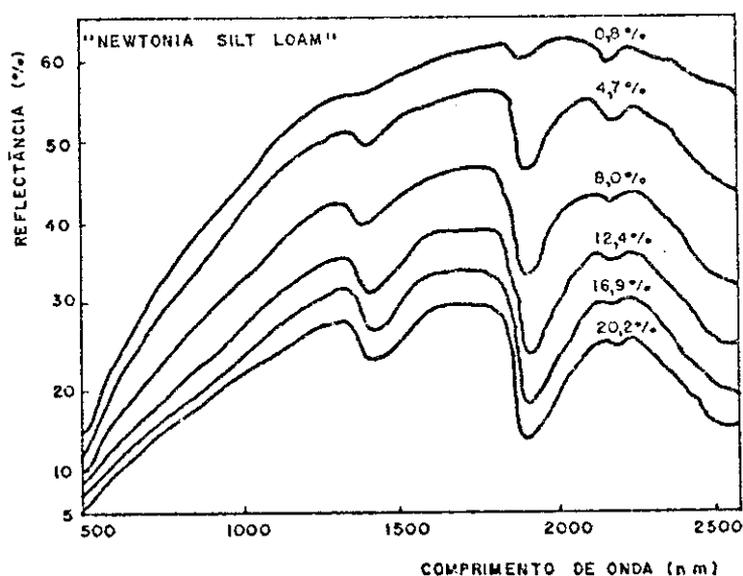


Fig. 2.3 - Porcentagem de reflectância X radiação incidente em vários conteúdos de umidade; os conteúdos de umidade estão indicados diretamente acima de cada curva.

FONTE: Bowers and Hanks (1965), p. 132.

Como pode ser observado nas curvas da Figura 2.3, obtidas por Bowers e Hanks (1965) e, também, segundo Montgomery (1974), o aumento da umidade provoca a diminuição na reflectância dos solos; porém a forma geral das curvas espectrais dos solos não é afetada pelas variações de umidade.

Tendo utilizado um espectrorradiômetro Exotech 20C, Beck et alii (1976) constataram que, dentre vários fatores estudados, a umidade do solo tinha a maior influência na reflectância quando este estava com um nível de umidade correspondente à tensão de 1/3 de bar, vindo a

matéria orgânica em segundo lugar. Porém, em nível de umidade correspondente à tensão de 15 bars, os mesmos solos evidenciaram que a matéria orgânica tem o maior efeito em certas regiões espectrais.

Baumgardner et alii (1970), estudando os efeitos da matéria orgânica nas propriedades espectrais dos solos, afirmaram que a matéria orgânica, em quantidades maiores que 2%, pode provocar um efeito de mascaramento na contribuição que os outros constituintes dão para aquelas propriedades, na região refletiva do espectro eletromagnético.

De acordo com Al-Abbas et alii (1972), quando há um aumento no conteúdo de matéria orgânica do solo, a reflectância deste diminui, sendo que há uma relação semelhante entre o conteúdo de argila dos solos e os seus dados espectrais. Isto, continuam, sugere que pode existir uma boa correlação entre matéria orgânica e conteúdo de argila e que ainda não está claramente entendido se a relação entre a reflectância relativa e o conteúdo de argila é real. Esta relação pode ser secundária, como um resultado da correlação entre conteúdos de argila e de matéria orgânica. Assim, os autores nada concluem a respeito da relação direta entre a reflectância multiespectral dos solos e o seu conteúdo de argila e o tamanho das partículas.

Nesse mesmo estudo, Al-Abbas et alii (1972) utilizaram os resultados de modelos de regressões quadráticas e lineares para produzirem automaticamente mapas da área de estudo, os quais mostraram solos com cinco níveis de matéria orgânica e com cinco níveis de conteúdos de argila.

Segundo Baumgardner et alii (1970), há muitos anos os cientistas de solos vêm usando uma designação de cor como parte da descrição dos vários horizontes do perfil do solo. A designação comumente utilizada em muitos países é o sistema de notação de Munsell (1947). De uma determinada designação de cor, o pedólogo pode fazer um certo número de inferências sobre outras propriedades dos solos. Ele pode relacionar a variabilidade da cor do solo com: (1) o conteúdo de matéria orgânica; (2) a presença ou ausência de componentes de ferro oxidados ou reduzidos; (3) as

características de drenagem interna dos solos; e, (4) até certo ponto, a produtividade potencial dos solos.

Myers e Allen (1968) afirmam que a reflexão difusa da luz está associada com uma propriedade diagnóstica muito importante dos solos - a sua cor. Afirmam também que, quando a cor da camada superficial dos solos difere daquela do material de origem, isto usualmente é uma indicação dos processos responsáveis pela formação destes solos, havendo a possibilidade de monitorar outros fatores, tais como acentuados graus de salinidade ou de erosão.

Obukhov e Orlov (1964) constataram que todos os solos por eles pesquisados possuíam características de refletividade espectral relacionadas com a sua cor. A reflexão mínima ocorreu na porção azul-violeta do espectro eletromagnético e a máxima estava na região do vermelho, onde o coeficiente de reflexão das mesmas amostras aumentou de 15% para 44%. Concluíram também que a região do infravermelho próximo é a mais favorável para uma descrição qualitativa e quantitativa dos solos.

As relações entre as propriedades de cor dos solos e as suas características físicas foram também pesquisadas por Karmanov e Bozhkov (1972), que analisaram quarenta e duas amostras de solos "cinnamon-brown", "calcareous clays" e "saline gypsum-bearing clay loam". Chegaram às seguintes conclusões: (1) existem fortes correlações lineares simples e também fortes correlações múltiplas entre as características de cor e a composição dos solos "cinnamon-brown"; (2) a cor dos solos é direta e linearmente relacionada à quantidade de húmus e de argila presentes, e inversamente relacionada ao conteúdo de carbonatos. Portanto, a cor é função de muitas propriedades dos solos.

Por sua vez, Costa (1979) concluiu que as mais importantes propriedades dos solos relacionadas à sua cor - quando esta é descrita através de métodos visuais - são a matéria orgânica, o conteúdo e o tipo de argilas e de ferro. Segundo este autor, para medidas espectrais da reflectância dentro do infravermelho refletivo são muito importantes outras propriedades como os conteúdos de silte e areia, a água retida a 15 bars,

e as propriedades químicas, tais como os teores de cálcio, de magnésio e de potássio. Concluiu também que medidas espectrais podem ser usadas para prever outras propriedades interrelacionadas dos solos. Acrescenta ainda que, através de relações qualitativas da cor com outras propriedades dos solos, é possível usá-las para estimar algumas destas propriedades, como por exemplo os conteúdos de argila e de carbono orgânico, a água retida a 15 bars e a capacidade de troca catiônica. Entretanto, ele ressalta que a cor do solo, conforme é avaliada pelos pedólogos, não é precisa; mesmo sendo útil para estimar outras propriedades do solo. Uma possibilidade para aumentar significativamente esta precisão seria através da utilização de espectrorradiômetros; porém estes instrumentos não estão facilmente disponíveis aos cientistas do solo.

De acordo com Stoner et alii (1980), as cores vermelhas e amarelas dos solos estão associadas com o conteúdo de diferentes formas de óxidos de ferro. A absorção no infravermelho próximo pode ser devida ao alto conteúdo de ferro.

Ainda com relação à cor do solo, Crown e Pawluk (1974) concluíram que este parâmetro foi o fator dominante na influência sobre a reflectância na porção visível do espectro; enquanto a rugosidade superficial e o conteúdo de umidade afetam mais no infravermelho refletido. Para solos de cores claras, a rugosidade tendeu a aumentar a reflectância no infravermelho, enquanto para os solos de cores superficiais escuras, a rugosidade tendeu a diminuir a reflectância na faixa correspondente ao infravermelho.

Estudando a reflectância em relação ao tamanho de partículas, desde argila grosseira até areia, Bowers e Hanks (1965) verificaram um aumento exponencial na reflectância à medida que havia uma diminuição no tamanho das partículas.

Mathews et alii (1973) estudaram a reflectância espectral de solos e de minerais de argila na Pensilvânia, no intervalo espectral de 500 a 2600 nm. Os resultados indicaram que o tipo de argila e as quantidades de matéria orgânica, óxidos de ferro livre e silte influenciam a

intensidade da energia refletida pelos solos naquele intervalo. Altos conteúdos de matéria orgânica e de óxidos de ferro livre reduziram a intensidade da reflectância no intervalo de 500 a 1200 nm, enquanto o tipo de argila influenciou a forma da curva e a intensidade em todo o intervalo estudado. Para a camada superficial do solo "Hagerstown", o silte é altamente correlacionado com a porcentagem de reflectância no intervalo de 800 a 2500 nm.

Montgomery (1974) utilizou um espectrorradiômetro de campo, em condições de laboratório, para a análise dos efeitos das propriedades físicas e químicas dos solos em sua reflectância espectral. Os resultados indicaram que a capacidade de troca catiônica (CTC) e o conteúdo de silte dos solos explicam importantes variações nas suas respostas espectrais dentro do intervalo de 520 a 2320 nm. Um aumento na CTC causou um decréscimo na reflectância dos solos para todos os intervalos de comprimento de onda utilizados. Admitiu que a influência da CTC sobre a reflectância pode ser explicada pela sua relação com os conteúdos de matéria orgânica e de argila dos solos. Um aumento no conteúdo de argila ou de matéria orgânica aumenta a CTC dos solos. Constatou também que a reflectância aumenta quando cresce o conteúdo de silte e que a influência do Fe_2O_3 é praticamente constante entre 600 e 2320 nm, acrescentando que os resultados sugeriam que a análise multiespectral poderia ser uma ferramenta para o delineamento e a quantificação das diferenças entre solos.

Condit (1970) foi o primeiro pesquisador a caracterizar as curvas de reflectância dos solos conforme os seus respectivos formatos. Concluiu que tais curvas poderiam ser enquadradas em três tipos gerais no intervalo espectral de 0,32 a 1,00 μm .

Stoner e Baumgardner (1980) trabalharam no intervalo de 400 a 2300 nm e acrescentaram aos três tipos de Condit mais um quarto e um quinto tipos; além de terem feito correlações destes tipos de curvas com algumas características físicas e químicas dos solos.

É necessário ressaltar neste ponto que as curvas apresentadas nas Figuras 2.4 a 2.9 foram adaptadas, por questões de escala e a

fim de permitir futuras comparações, de acordo com as necessidades do presente trabalho; sendo que foram mantidas as descrições das curvas feitas por Condit (1970) e por Stoner e Baumgardner (1980), da forma que vem a seguir.

As curvas do Tipo 1 exibem preferencialmente baixa reflectância, com uma declividade aumentando suavemente, o que lhes imprime um formato côncavo característico, desde 0,32 até cerca de 1,00 μm . As curvas de reflectância de certos "Mollisols" (Figura 2.4) e "Vertisols" seguem este tipo geral de curvas. Entretanto, segundo Stoner e Baumgardner (1980), de 1,00 a 1,30 μm a declividade é praticamente constante para estes solos, uma característica não verificada por Condit, devido ao intervalo espectral limitado (0,32 a 1,00 μm) dos instrumentos empregados.

As curvas do Tipo 2 são caracterizadas por uma declividade de geralmente decrescente até 0,60 μm , seguida por um mergulho de 0,60 a 0,70 μm , com a declividade decrescendo acima de 0,75 μm . O resultado é uma curva de formato convexo desde o visível até 1,30 μm . Alguns dos solos da Ordem dos "Alfisols" (Figura 2.5) e alguns outros da Ordem dos "Ultisols" (Figura 2.6) exibem este formato de curvas do Tipo 2. Foi observado por Stoner e Baumgardner (1980) que os solos do Tipo 2 tendem a ser melhor drenados e mais pobres em matéria orgânica do que os solos do Tipo 1.

O terceiro tipo de curvas de reflectância do solo, observado por Condit (1970), mostra uma declividade íngreme levemente decrescente em 0,60 μm , seguindo-se um leve mergulho de 0,62 a 0,74 μm , com a declividade decrescendo até quase a zero ou mesmo tornando-se negativa de 0,76 a 0,88 μm . Acima de 0,88 μm (até 1,00 μm), a declividade cresce com o aumento dos comprimentos de onda. O solo "Talbot", um "Alfisol" de regiões térmicas úmidas, apresenta este Tipo 3 de curvas (Figura 2.7). Segundo Stoner e Baumgardner (1980), são observados conteúdos moderadamente altos de ferro livre na maioria dos solos que apresentam curvas do Tipo 3.

Devido ao escopo limitado dos estudos de Condit (1970), outros tipos de curva não foram observados ou descritos. Desta forma, de acordo com Stoner e Baumgardner (1980), embora similares em alguns aspectos às curvas de Tipo 3, um quarto tipo pode ser considerado. As curvas deste tipo exibem uma declividade decrescente desde 0,88 até 1,00 μm , com a declividade decrescendo até a zero, e tornando-se negativa de 1,00 a 1,30 μm (Figura 2.8). Este quarto tipo de curvas foi observado em solos com altos conteúdos de ferro e também de matéria orgânica.

Stoner e Baumgardner (1980) sugerem ainda uma outra modificação em relação às curvas do Tipo 3, que permite considerar a existência de um quinto tipo característico de curva, isto é, aquela em que a declividade decresce até zero e torna-se negativa de 0,75 a 1,30 μm (Figura 2.9). Neste tipo de curva, a reflectância em 1,30 μm é realmente menor do que a reflectância na porção vermelha do espectro. Somente este quinto tipo de curvas não mostrou uma forte banda de absorção da água em 1,45 μm , enquanto todos os solos estudados por Stoner e Baumgardner (1980) mostraram uma forte banda de absorção da água em 1,95 μm . De acordo com estes autores, os solos que mostram este quinto tipo de curva apresentam altos conteúdos de ferro, com baixos conteúdos de matéria orgânica.

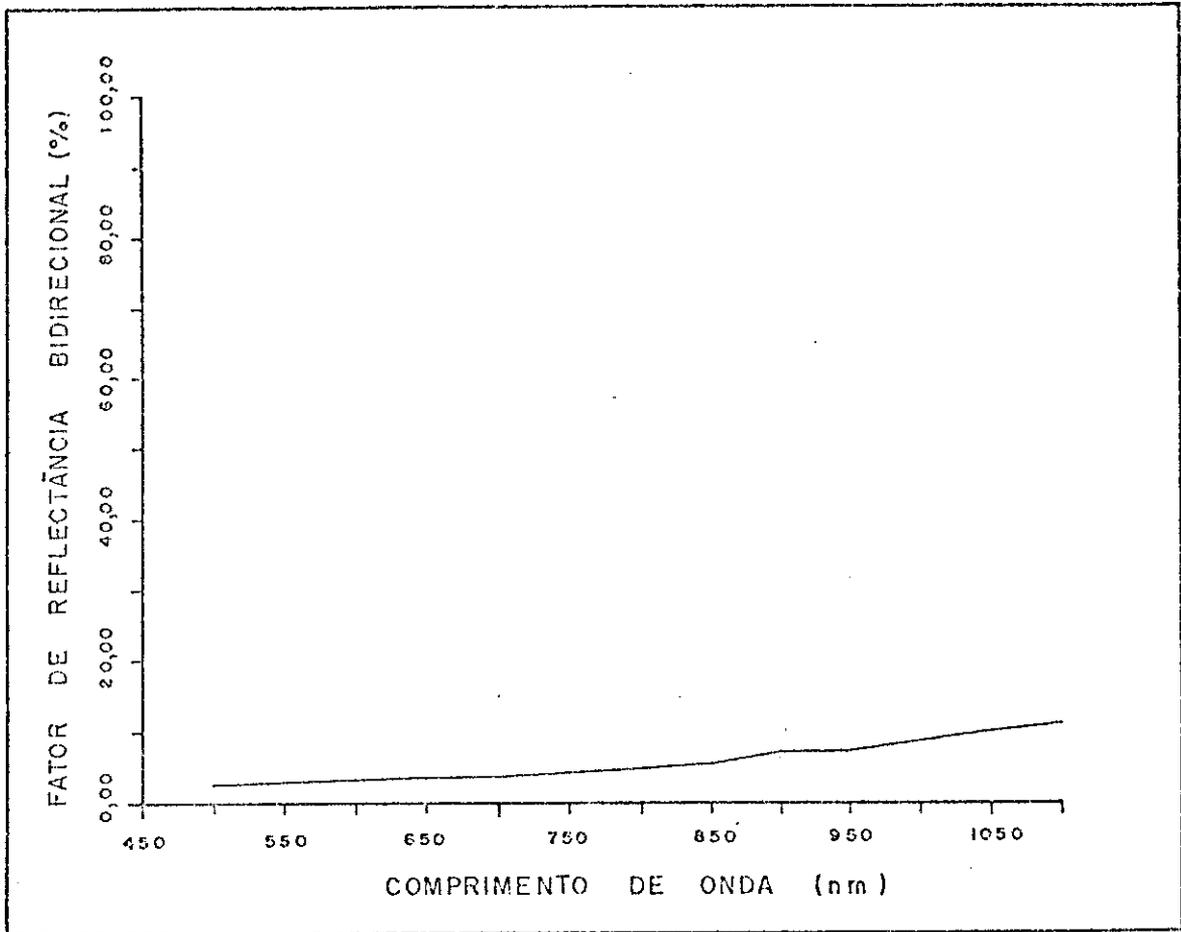


Fig. 2.4 - Curva de reflectância do Tipo 1 para amostras de solos da Ordem dos "Mollisols".

FONTE: Adaptado de Stoner e Baumgardner (1980), p. 32.

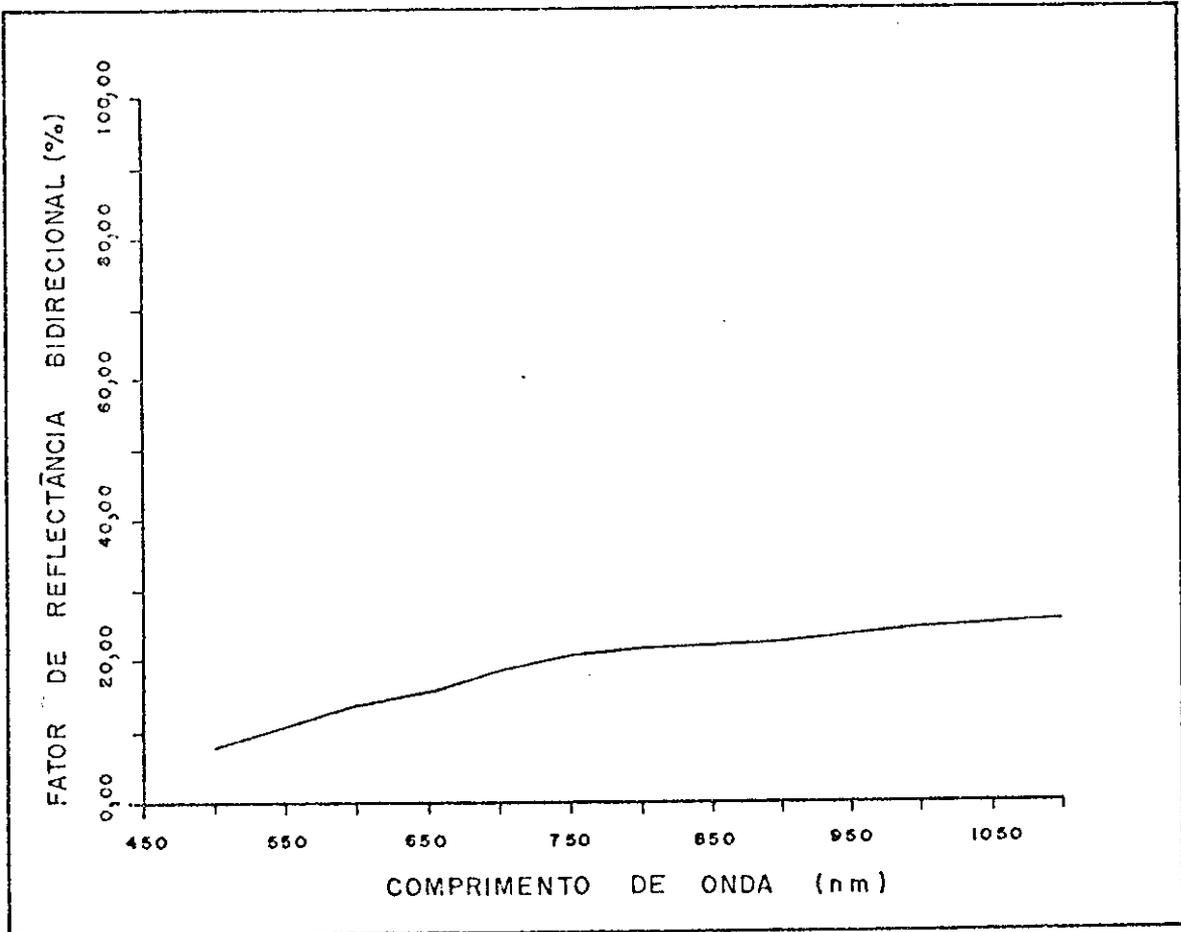


Fig. 2.5 - Curva de reflectância do Tipo 2 para amostras de solos da Ordem dos "Alfisolts".

FONTE: Adaptado de Stoner e Baumgardner (1980), p. 31.

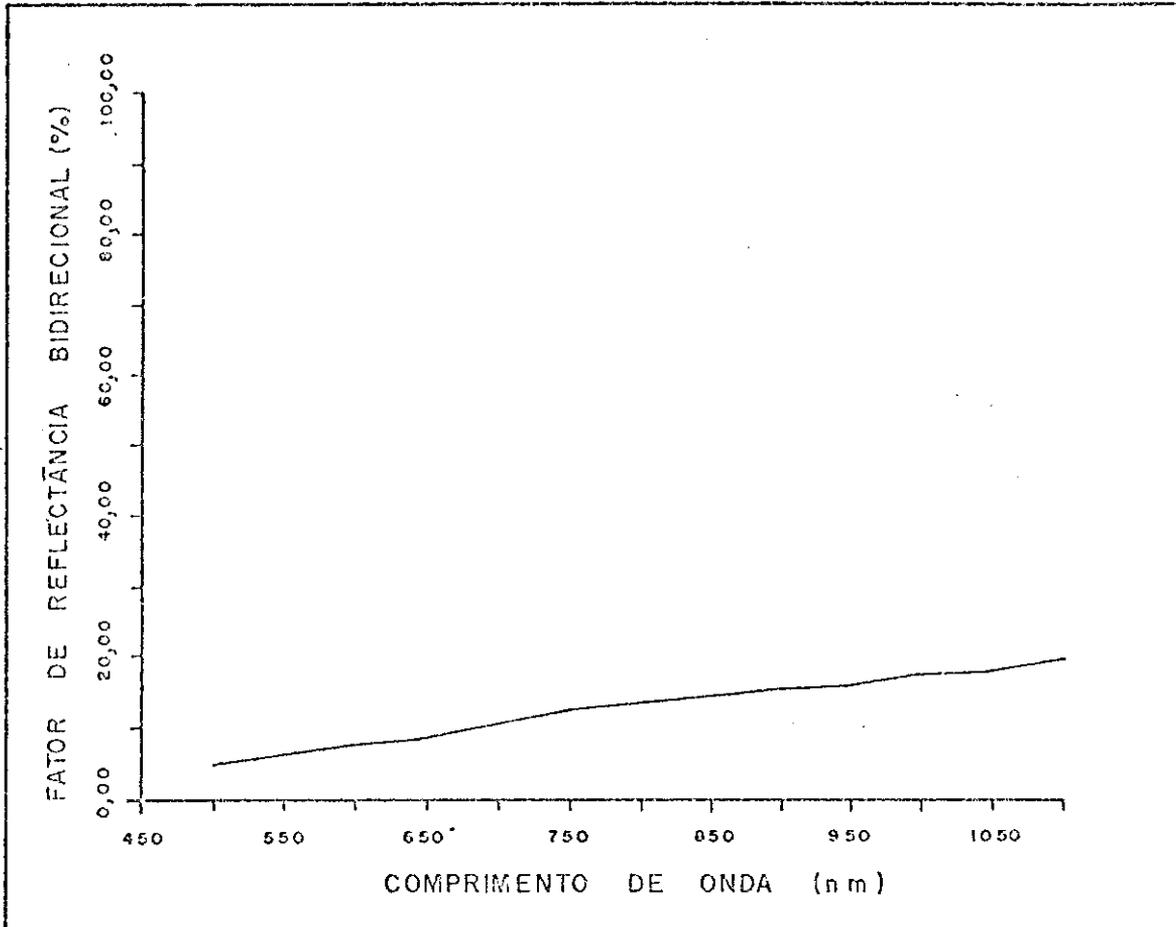


Fig. 2.6 - Curva de reflectância do Tipo 2 para amostras de solos da série "Frederick".

FONTE: Adaptado de Stoner e Baumgardner (1980), p. 37.

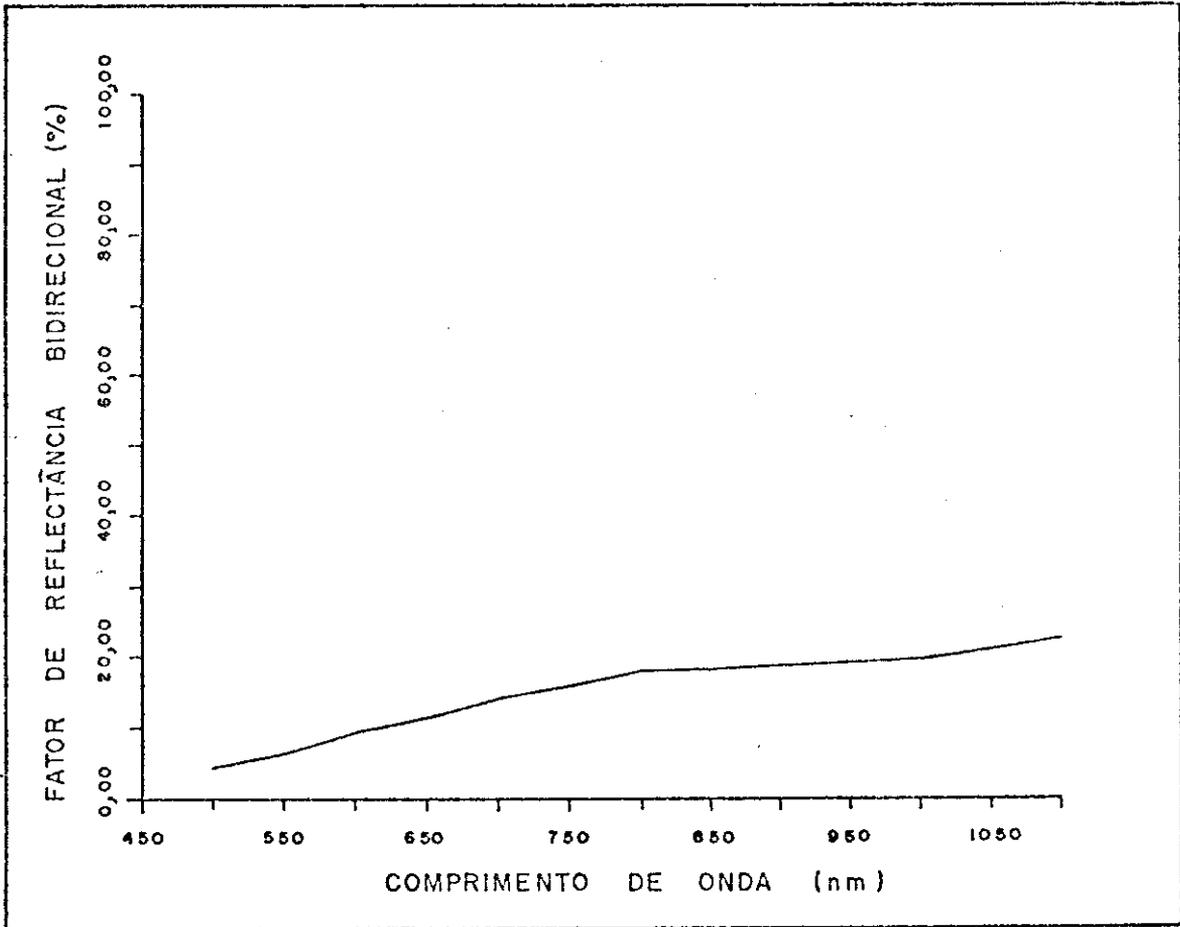


Fig. 2.7 - Curva de reflectância do Tipo 3 para amostras de solos da série "Talbot".

FONTE: Adaptado de Stoner e Baumgardner (1980), p. 10.

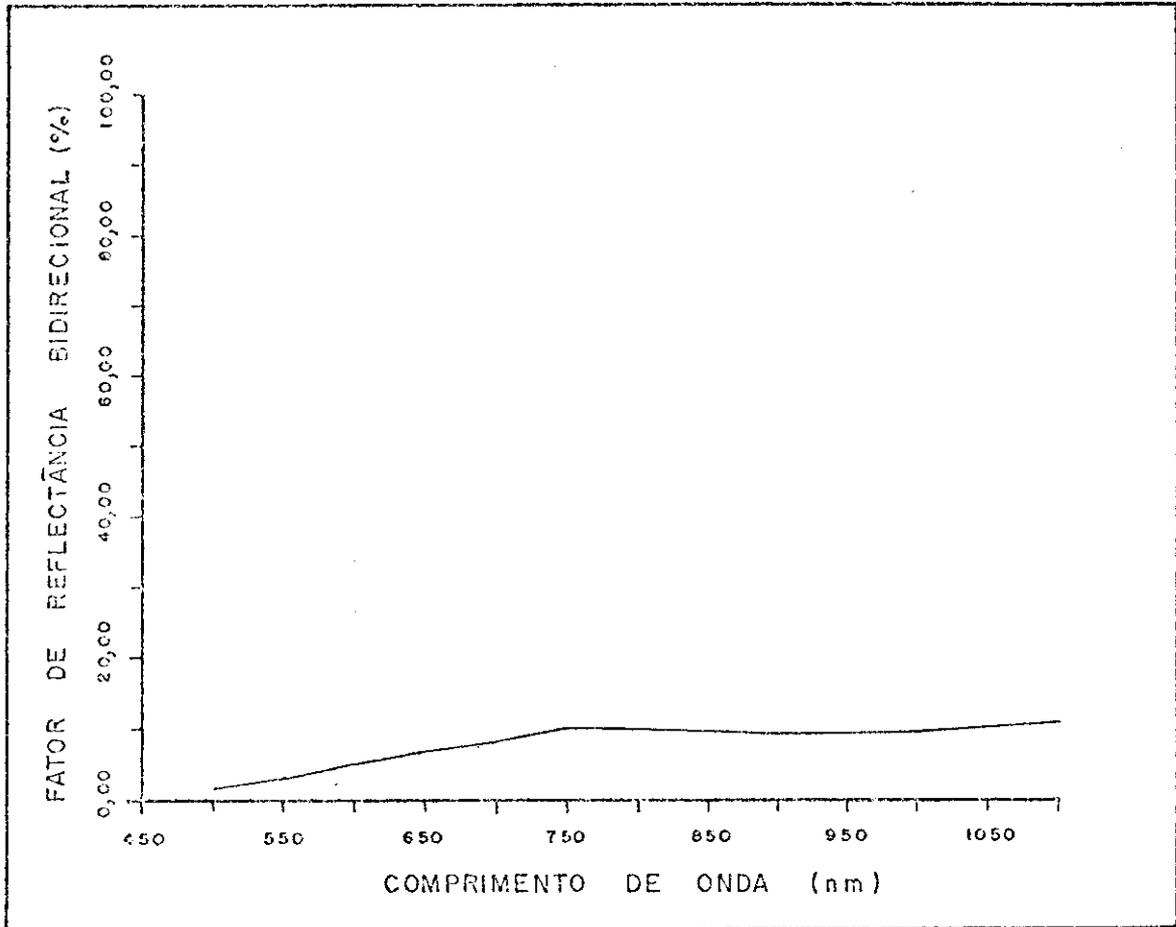


Fig. 2.8 - Curva de reflectância do Tipo 4 para amostras de solos "very-fine oxidic thermic Haplic Acrorthox".

FONTE: Adaptado de Stoner e Baumgardner (1980), p. 33.

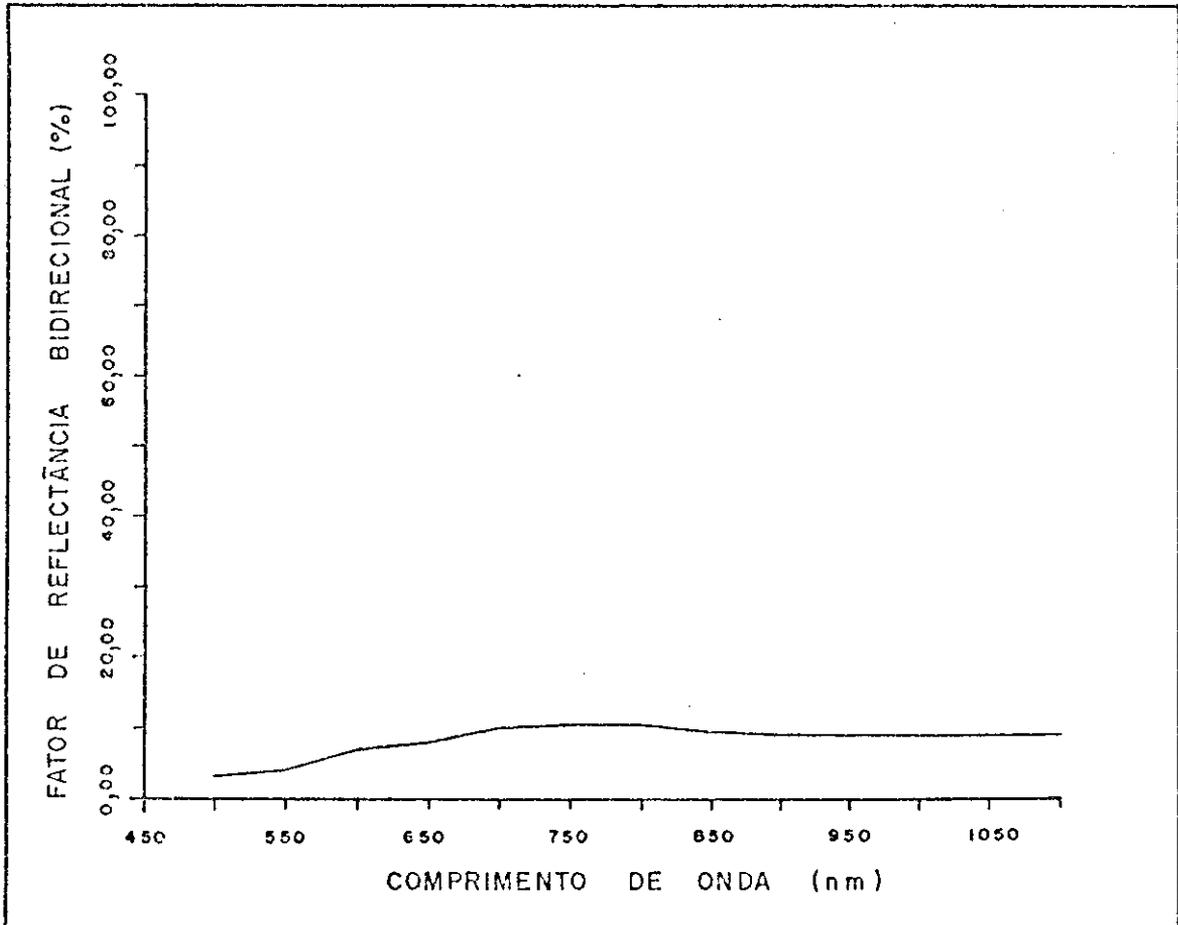


Fig. 2.9 - Curva de reflectância do Tipo 5 para amostras de solos "Ty pic Haplorthox" de Londrina-PR, Brasil.

FONTE: Adaptado de Stoner e Baumgardner (1980), p. 40.

Cipra et alii (1971) utilizaram um espectrorradiômetro de campo para medir a radiação de amostras de sete séries de solos de Indiana, num intervalo espectral de 0,43 a 0,73 μm , tanto em condições úmidas como secas, com os agregados destorroados e também, em alguns casos, com crostas secas. Concluíram que os "Mollisols" poderiam ser facilmente distinguidos dos "Alfisols" pelas curvas de reflectância. Entretanto, um "Entisol" muito arenoso (da série "Chelsea sand"), de cor clara, tinha uma curva muito semelhante àquela dos "Alfisols". Um "Mollisol" arenoso (da série "Maumee sandy loam"), muito escuro, tinha uma curva semelhante a outro "Mollisol" ("Chalmers silty clay loam"), mas apresentava uma reflectância maior ao longo do espectro visível. Um "Histosol" (da série "Carlisle") era quase indistinguível do "Chalmers silty clay loam" (um "Mollisol") nos comprimentos de onda estudados. Os autores concluem afirmando que os solos secos mostraram valores maiores de reflectância do que os solos úmidos. As superfícies encrostadas deram valores maiores de reflectância do que aquelas com crostas quebradas, em todos os casos estudados. A superfície rugosa dos solos cultivados presumivelmente deve ter provocado algum espalhamento de luz e causou um efeito de sombreamento. Um destes fatores, ou ambos, poderiam ter causado a menor reflectância para os solos com as crostas quebradas. Afirmam ainda que as interações entre as características espectrais e outras propriedades dos solos foram lógicas; porém, mais amostragens de cada uma das séries de solos são necessárias para caracterizar precisamente as propriedades espectrais destes solos, sob várias condições de umidade e de rugosidade superficial. Além destas, outras causas de variação espectral, dentro de uma série, deveriam ser pesquisadas.

Todas estas pesquisas foram realizadas tendo-se utilizado vários tipos de espectrorradiômetros, com o intuito de determinar as características de reflectância dos solos, com vistas a permitir o mapeamento pedológico com o auxílio das técnicas de sensoriamento remoto. Porém, as pesquisas nas técnicas de mapeamento, através de sensoriamento remoto, vão desde a interpretação visual de imagens até a análise automática de dados digitais multiespectrais.

2.4 - TÉCNICAS MULTIESPECTRAIS PARA MAPEAMENTO DE SOLOS

As pesquisas iniciais de análise automática de dados multiespectrais para estudos de solos foram conduzidas com dados coletados por "scanner" de vinte canais instalado em aeronave.

Assim, Mathews et alii (1973) concluíram que solos desenvolvidos de calcário, arenitos e de colúvios locais poderiam ser separados com um alto grau de precisão e também que as classes de erosão eram separáveis em algum grau.

Kristof (1971) conseguiu mapear automaticamente seis categorias diferentes de condições superficiais de solos com razoável precisão e achou que estas categorias mapeadas de solos seriam de grande valia aos pedólogos. Suas conclusões foram que observações de umidade da camada superficial do solo, erosão, conteúdo de matéria orgânica e rugosidade superficial poderiam auxiliar muito na interpretação dos dados.

Cipra et alii (1972) concluíram que os dados espectrais coletados ao longo de uma linha de voo de vinte milhas poderiam ser divididos em três classes de solos espectralmente separáveis. Estas três classes correspondiam em alguma extensão a grupos de manejo. Entretanto, concluíram também que uma correspondência restrita entre unidades de mapeamento obtidas em levantamentos de solos e aquelas discriminadas espectralmente foi difícil para solos originados de sedimentos glaciais do oeste de Indiana.

Usando dados obtidos por aeronave, Kristof e Zachary (1971) conseguiram identificar as variações mais nítidas em feições de solos. As variações no tom do solo poderiam ser vistas como feições relacionadas com padrões de drenagem e conteúdo de matéria orgânica. Estes autores encontraram problemas para extrapolar amostras de treinamento espectral de uma área para outra.

Num estudo realizado numa área de 430 ha. em Indiana, Kirchner et alii (1978) conseguiram diferenciar classes de drenagem do solo através de análise digital de dados LANDSAT. Concluíram que a correlação das características de drenagem com séries de solos permite que os componentes de unidades de mapeamento de solos sejam precisamente averiguados.

Stoner e Horvath (1978) acharam que o conteúdo de matéria orgânica, a textura, a cor e o tipo de solo poderiam ser mostrados em um mapa produzido automaticamente, através da análise de dados obtidos por aeronave. Práticas culturais como aração e gradagem, assim como a quantidade e o tipo de cobertura vegetal, mostraram que têm influência na resposta multiespectral de superfícies de solos. Constataram, também, que áreas recentemente aradas apresentavam uma reflectância menor que áreas aradas há mais tempo; e conseguiram delimitar estas áreas ao utilizarem técnicas de reconhecimento automático de padrões multiespectrais.

Um trabalho de Weismiller et alii (1977) mostrou que a combinação de dados auxiliares, na forma de limites fisiográficos, com dados espectrais LANDSAT classificados automaticamente pode aumentar em muito a utilidade dos dados espectrais. Neste estudo, esta técnica permitiu uma melhor correlação de solos com as respectivas classes espectrais.

Usando a idéia de combinar dados auxiliares com dados espectrais, Kaminsky (1978) produziu um mapa espectral de solos de Jasper County, Indiana, através de análises automáticas de dados LANDSAT. O município foi dividido em seis áreas de materiais de origem através da interpretação de imagens LANDSAT e a classificação final foi feita exclusivamente dentro da área de cada material de origem. As características de drenagem, diferenças texturais, diferenças de matéria orgânica, erosão e vegetação esparsa foram dados de significativa contribuição para as respostas dos solos. De modo geral, a autora achou que o mapa espectral produzido poderia ser usado no futuro levantamento de solos do município.

Hinzel et alii (1980), tentando correlacionar classes espectrais obtidas de dados MSS/LANDSAT com séries de solos e condições dos

solos em Indiana, concluíram que as séries de solos se relacionam com a drenagem interna e que os seguintes fatores influenciam a resposta espectral: a presença de vegetação, as condições de umidade da camada superficial, as condições de encrostamento, a presença de areia depositada na superfície, a textura da camada superficial, o conteúdo de matéria orgânica e a exposição de horizonte subsuperficial, incluindo erosão. Concluíram também que a classe de drenagem é correlacionada com a magnitude de reflectância relativa.

Desta forma, pode-se afirmar que os produtos de sensoriamento remoto auxiliam, como ferramenta adicional, o processo de levantamento de solos, assim como é de grande potencialidade também a análise automática de dados digitais multiespectrais LANDSAT.

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

De acordo com a divisão geomorfológica do Estado de São Paulo proposta por Almeida (1974), a área de estudo selecionada localiza-se na província geomórfica denominada Depressão Periférica, na Zona de Moji-Guaçu. Situa-se ao norte do município de Araras, abrangendo o município de Leme e está entre as latitudes de $22^{\circ}04'$ e $22^{\circ}17'$ Sul e as longitudes de $47^{\circ}10'$ e $47^{\circ}28'$ Oeste, com uma superfície aproximada de 75000 ha (Figura 3.1).

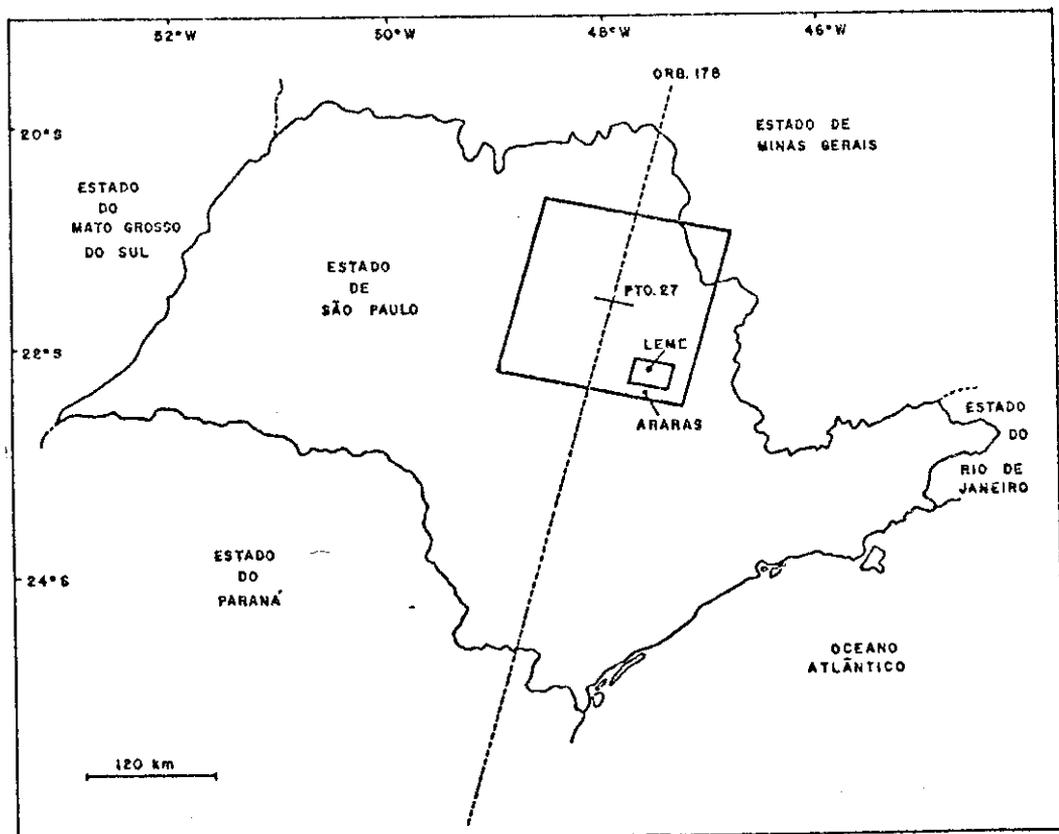


Fig. 3.1 - Localização da área de estudo dentro da cena LANDSAT 178/27, abrangendo o município de Leme-SP.

Em relação às unidades litoestratigráficas, segundo São Paulo (1981), são encontradas, aproximadamente em faixas norte-sul, a Formação Aquidauana à margem direita do Rio Mogi-Guaçu e, à esquerda, a Formação Itararé e uma área de Coberturas Cenozóicas Indiferenciadas. Seguindo em direção oeste, são observadas faixas constituídas pelas Formações Tatuí e Irati, sobrepostas por Intrusivas Básicas Tabulares. Já ao redor da cidade de Leme, é encontrada uma faixa norte-sul constituída pela Formação Corumbataí, e, mais a oeste, a Formação Pirambóia. Em resumo, pode-se dizer que todas estas classes geológicas são formações sedimentares, com exceção das rochas intrusivas básicas.

O relevo predominante na área é o suave ondulado, com declives longos e uniformes, com vales amplos, pouco profundos, abrangendo cursos d'água em cujas margens são frequentes pequenas planícies aluviais arenosas, bem como alguns terraços. A suavidade deste relevo só é rompida em alguns lugares pela presença de morros de altura modesta, indicando sítios de maiores intrusões de diabásio (Almeida, 1974).

Segundo Setzer (1966), o clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é designado pelo símbolo Cwa, sendo do tipo mesotérmico e sub-tropical úmido com estiagem de inverno; a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C e a do mês mais quente é superior a 22°C; o total de chuvas do mês mais seco não atinge os 30 mm. O total anual de chuvas está compreendido entre 1200 e 1300 mm.

De acordo com o Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo, que vem sendo executado em convênio entre a EMBRAPA e a SECRETARIA DA AGRICULTURA E ABASTECIMENTO DO ESTADO DE SÃO PAULO (Oliveira et alii, 1981), os principais solos encontrados na área de estudo são os apresentados na Figura 3.2.

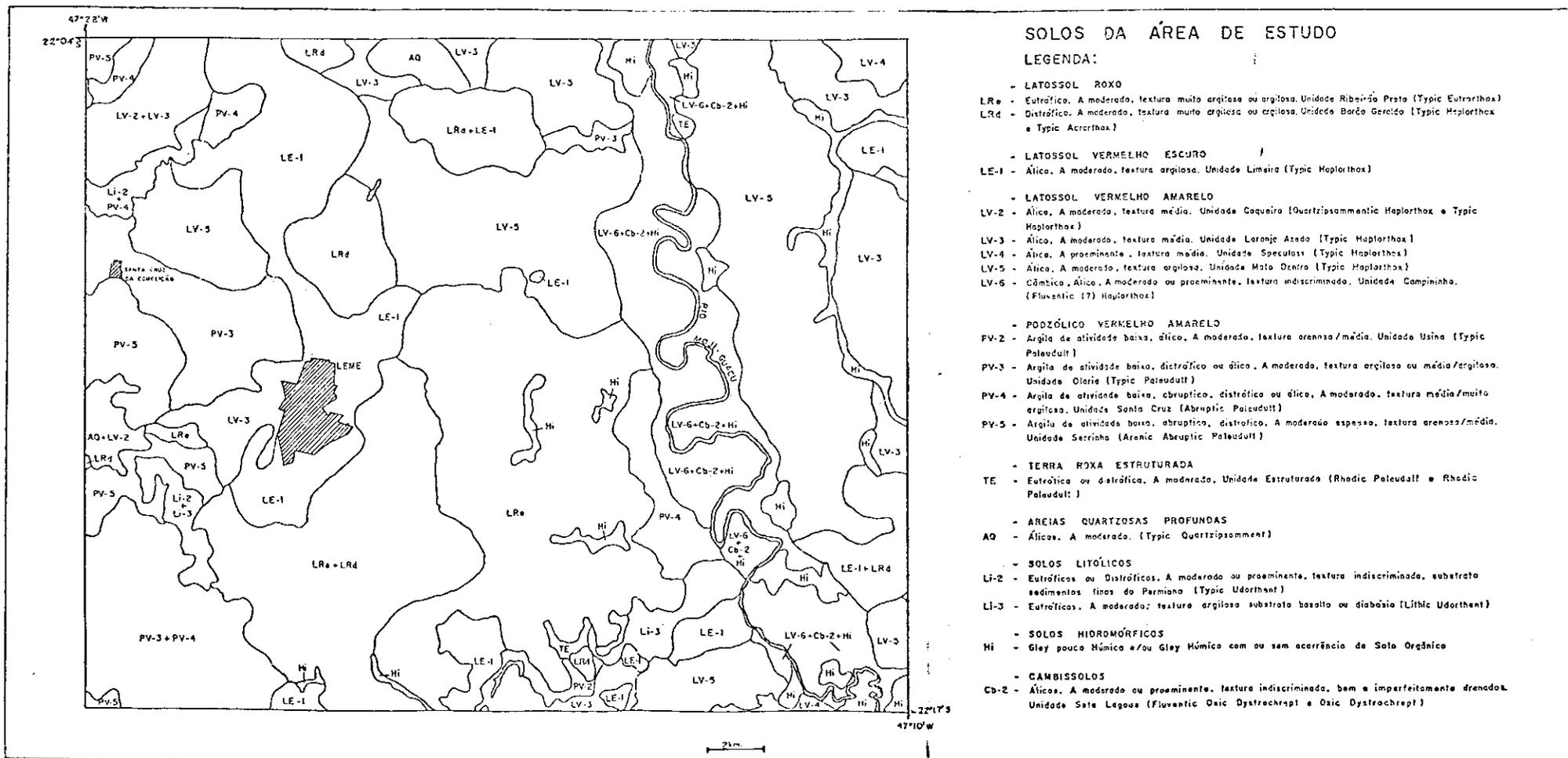


Fig. 3.2 - Solos da área de estudo (Leme-SP).

FORNE: Oliveira et alii (1981).

O uso atual da terra é caracterizado por cultivos agrícolas, destacando-se a cultura de cana-de-açúcar e, com menor expressão, algodão, citrus, pastagens e reflorestamentos.

3.2 - DESCRIÇÃO SUCINTA DOS GRANDES GRUPOS DE SOLOS DA ÁREA

Tendo em vista a utilização do mapa semidetalhado de solos executado por Oliveira et alii (1981), no qual os solos foram classificados segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - 2ª Aproximação - ainda em desenvolvimento, proposta pelo Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo da EMBRAPA, esta foi também a legenda de classificação adotada.

Os solos em questão são enquadrados nos seguintes Grandes Grupos: Latossol Vermelho Escuro, Latossol Vermelho-Amarelo, Latossol Roxo e Podzólico Vermelho-Amarelo, cuja descrição vem a seguir, de acordo com a Comissão de Solos (1960a) e Oliveira et alii (1982).

3.2.1 - LATOSSOL VERMELHO ESCURO (LE)

Esta unidade taxonômica é formada por solos de coloração vermelho-escuro, os quais possuem características que os colocam entre o Latossol Roxo e o Latossol Vermelho-Amarelo.

A unidade taxonômica LE foi dividida em duas unidades de mapeamento: 1) LE-orto, correspondente ao conceito central desta unidade, tendo como materiais originários produtos de intemperização de folhelhos e argilitos; 2) LE-fase arenosa, equivalente ao LE desenvolvido de arenito, tendo como material de origem os produtos de intemperização de arenitos sem cimento calcário.

São solos profundos, de coloração vermelho-escuro, bem drenados, ácidos e de baixa saturação de bases, textura argilosa (LE-orto) ou média (LE-fase arenosa) nos horizontes A e B. Na área de estudo ocorrem os solos de textura argilosa, conforme mostra a Figura 3.2.

3.2.2 - LATOSSOL VERMELHO-AMARELO (LV)

O conceito geral desta unidade taxonômica é o de solos normalmente profundos, com transições difusas entre horizontes e diferenciação pouco evidente de horizontes, baixos teores de óxidos de ferro (normalmente menores que 15%), fração argila com dominância de caulinita e saturação de bases baixa.

No horizonte B estes solos apresentam cores variáveis desde o vermelho até o amarelo e possuem estrutura maciça porosa e pouco evidente.

Assim como os Latossolos Roxo e Vermelho Escuro, o LV também possui horizonte B latossólico, o qual apresenta baixo teor de argila, quase ausência de minerais primários pouco resistentes ao intemperismo, ausência de cerosidade e relação molecular K_i (SiO_2/Al_2O_3) normalmente inferior a 1,5.

Podem ter como materiais de origem os produtos de intemperização de várias rochas: granitos e gnaisses (LV-orto); granitos, gnaisses, filitos e xistos (LV-fase rasa); ou arenitos sem cimento calcário (LV-fase arenosa). Na área de estudo ocorrem apenas os solos desta última classe, conforme mostra a Figura 3.2.

3.2.3 - LATOSSOL ROXO (LR)

Os solos que compõem esta unidade de mapeamento são profundos, argilosos, bem drenados, apresentando cor vermelho-arroxeadada e foram originados a partir de rochas eruptivas básicas. Outras características destes solos são a pequena variação de cor entre os horizontes A e B; a presença abundante de poros; a abundância de minerais pesados, muitos dos quais, facilmente atraídos por ímã; elevados teores de manganês; relação molecular K_i no horizonte B inferior a 1,4 e saturação de bases baixa a elevada.

3.2.4 - PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO (PV)

Estes solos apresentam horizonte B textural (Bt), saturação de bases baixa no horizonte Bt, estrutura em blocos e cerosidade forte e abundante no Bt, presença de horizonte A2. O material originário é constituído por sedimentos argilosos, folhelhos e argilitos.

3.3 - DADOS MSS/LANDSAT

O Sistema LANDSAT, originalmente denominado ERTS (Earth Resources Technology Satellite), encontra-se bem caracterizado nos trabalhos de NASA (1972) e de Koffler (1982).

O programa LANDSAT foi planejado e vem sendo desenvolvido visando obter-se uma ferramenta prática e eficiente para o inventário e o manejo dos recursos naturais terrestres. Foi inicialmente prevista uma série de seis satélites, dos quais, até o momento, quatro foram colocados em órbita. O último, o LANDSAT-4, encontra-se em órbita desde julho de 1982 e possui algumas características distintas e melhoradas em relação aos satélites anteriores: continua com o MSS que já existia; não transporta mais o sensor RBV (Return Beam Vidicon); porém serve de plataforma para um mapeador temático (Thematic Mapper), que possui 7 canais espectrais e resolução de 30 metros (os outros LANDSATs possuíam 4 canais e resolução de 80 metros do imageador multiespectral MSS); este tem sua órbita a 705 Km de altitude e repetitividade de 16 dias.

O subsistema MSS/LANDSAT tem sido o mais utilizado desde o lançamento do primeiro satélite da série. Ele obtém dados de radiação eletromagnética refletida pelos alvos da superfície terrestre em quatro bandas espectrais, simultaneamente:

- 1) - Canal 4: 0,5 a 0,6 μm (verde-laranja);
- 2) - Canal 5: 0,6 a 0,7 μm (laranja-vermelho);
- 3) - Canal 6: 0,7 a 0,8 μm (vermelho-infravermelho próximo);
- 4) - Canal 7: 0,8 a 1,1 μm (infravermelho próximo).

As informações obtidas pelos sensores a bordo dos satélites são enviadas para a Terra na forma de sinais eletromagnéticos, que são recebidos por Estações de Recepção e, após gravados, são processados pelas Estações de Processamento, onde são convertidos em imagens fotográficas e fitas digitais compatíveis com computador (CCTs).

No presente trabalho foram utilizadas as imagens MSS e respectivas fitas CCT, processadas nos laboratórios do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), identificadas pela órbita 178/27, passagem de 10 de agosto de 1978.

3.4 - FOTOGRAFIAS AÉREAS

Como apoio à realização do presente trabalho de pesquisa, foram utilizadas fotografias aéreas pancromáticas verticais, resultantes da cobertura aerofotográfica realizada pela Terrafoto S/A, para a Secretaria de Economia e Planejamento do Estado de São Paulo. As fotografias estão na escala aproximada de 1:35000 e foram obtidas entre 04/07/78 e 26/08/78, no horário das 10:45 h às 11:25 h.

As fotografias aéreas, por sua maior resolução espacial em relação aos dados MSS/LANDSAT, foram muito úteis para a obtenção de informações da distribuição dos tipos de cobertura e das condições superficiais dos solos da área de estudo, visando auxiliar na localização dos dados espectrais no Image-100 e, também, na localização terrestre durante as etapas de execução de espectrometria de campo.

3.5 - MAPAS E CARTAS

Em várias etapas durante a realização dos trabalhos, foram utilizados os seguintes documentos cartográficos:

- 1 - Carta dos Solos do Estado de São Paulo - escala de 1:500.000, executada pela Comissão de Solos (1960b);
- 2 - Carta do Brasil - Folha SF.23-Y-A-II-1 (Leme-SP) - escala de 1:50.000, IBGE (1975a);
- 3 - Carta do Brasil - Folha SF.23-Y-A-II-2 (Rio Capetinga-SP) - escala de 1:50.000, IBGE (1975b);

- 4 - Carta do Brasil - Folha SF.23-Y-A-II-4 (Conchas-SP) - escala de 1:50.000, IBGE (1975c);
- 5 - Carta do Brasil - Folha SF.23-M-II-3 (Araras-SP) - escala de 1:50.000, IBGE (1975d);
- 6 - Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo - escala de 1:100.000, Folha SF.23-Y-A-II, Quadrícula de Araras-SP, executado por Oliveira et alii (1981).

3.6 - ANALISADOR MULTIESPECTRAL IMAGE-100

Os valores de níveis de cinza correspondentes aos solos de interesse, e contidos nas imagens LANDSAT digitalizadas em fitas magnéticas compatíveis com computador, foram obtidos através do Sistema Interativo de Análise de Imagens Multiespectrais (Image-100), produzido pela General Electric Company. Informações detalhadas sobre o funcionamento e as aplicações desse equipamento podem ser encontradas no manual da General Electric (1975) e nos trabalhos de Ribeiro et alii (1982) e de Koffler (1982).

O Sistema Image-100 foi planejado para auxiliar o intérprete na extração de informações úteis a partir de dados multiespectrais fornecidos por sensores a bordo de satélites ou de aeronaves. Operando com base no princípio de que diferentes objetos possuem características espectrais únicas, ou "assinaturas", o I-100 analisa simultaneamente as assinaturas em várias faixas de comprimento de onda para identificar áreas similares na imagem, que são assinaladas com determinadas cores em um vídeo.

Cada ponto de cada imagem LANDSAT em preto e branco é uma medida da energia refletida de uma área no terreno com o formato aproximado de 60m X 80m, em um determinado segmento do espectro eletromagnético. Cada nível de energia é representado em termos de níveis de cinza que, no analisador Image-100, podem variar de 0 a 255. Como o LANDSAT coleta quatro imagens simultaneamente, há quatro níveis de cinza para cada ponto da imagem. Estes quatro valores representam as respostas espectrais, ou assinatura, daquela área no terreno.

Para fazer a análise, o intérprete deve informar à máquina a localização de amostras da área e alvo de seu interesse, o que é feito através de um cursor luminoso que se move no vídeo, no qual está representada a imagem em estudo. O Image-100 extrai as informações espectrais dos objetos examinados, a partir das quais serão tomadas as decisões de análise quantitativa multidimensional. Este processo é chamado de "treinamento". Em seguida, o Image-100 examina cada elemento da imagem através do critério de decisão adotado, e determina os elementos com características semelhantes aos da área de interesse. Esta fase é chamada de "classificação" e o resultado é um mapa, com a área classificada representada por caracteres alfa-numéricos conforme os temas selecionados.

3.7 - ESPECTRORRADIÔMETROS

Para a realização deste estudo foram necessárias medidas de reflectância espectral de solos, tanto em condições de campo, como em condições de laboratório, tendo-se utilizado os equipamentos descritos a seguir.

3.7.1 - PARA AS MEDIDAS DE CAMPO

Para a obtenção das características espectrais dos solos de interesse, em condições de campo, foi utilizado um radiômetro portátil ABBE SEKKEJ, modelo 2701, cujo intervalo espectral abrange desde 400 até 1050 nm e dispõe de filtros para os comprimentos de onda de 450, 500, 550, 600, 650, 750, 850 e 1050 nm.

Este radiômetro é dotado de um detector de GaAsP, para o intervalo de 400 a 700 nm e de um detector de Si, para o intervalo de 750 a 1050 nm, com um campo efetivo de visada de $5^{\circ}40'$.

Como referência para as medidas espectrais e para explicar possíveis mudanças na intensidade de iluminação, é necessária a utilização de uma placa-padrão de Sulfato de Bário ($BaSO_4$), conforme recomendações de Lee et alii (1975).

Maiores detalhes e informações sobre o referido radiômetro podem ser obtidas no trabalho de Emori et alii (1972).

3.7.2 - PARA AS MEDIDAS DE LABORATÓRIO

Na fase de obtenção de medidas espectrais em condições de laboratório foi utilizado o protótipo de um espectrorradiômetro desenvolvido no Instituto de Pesquisas Espaciais, sendo as suas especificações técnicas apresentadas a seguir:

- intervalo espectral: 400 a 1100 nm;
- resolução espectral: 8 nm;
- aberturas angulares possíveis: 3°, 1°, 20' e 6'.

Este equipamento é constituído dos seguintes elementos:

- a) um telescópio de alta eficiência e precisão radiométrica, modelo 2020-31, da Gamma Scientific, Incorporated;
- b) um monocromador, modelo NM-3/5, da Gamma Scientific, Incorporated;
- c) um detector de silício, desenvolvido também pelos técnicos do Instituto de Pesquisas Espaciais;
- d) um registrador, modelo RB 102, ECB-Equipamentos Científicos do Brasil Ltda;
- e) um multímetro digital, modelo 3466A da Hewlett-Packard.

Maiores detalhes deste equipamento podem ser obtidos no trabalho de Bandonés (1982).

3.8 - OUTROS EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

Além dos descritos até aqui, foram também empregados outros equipamentos e materiais de utilização generalizada em trabalhos com aereo fotografias, dados multiespectrais e em pedologia, tais como: umidímetro de campo, estereoscópio etc.

3.9 - SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Para a execução deste trabalho foi selecionada uma área de 72000 ha na região de Leme, no Estado de São Paulo (Figura 3.1).

A seleção desta área de estudo foi baseada nos seguintes fatores:

- a) presença conjunta dos solos Latossol Vermelho Escuro, Latossol Vermelho-Amarelo, Latossol Roxo e Podzólico Vermelho-Amarelo, que se incluem entre os principais solos do Estado de São Paulo, conforme é mostrado na Tabela 3.1. Além da importância devida à grande extensão areal de ocorrência destes solos, é necessário considerar a importância da produção agrícola proporcionada por eles neste Estado;
- b) existência de um mapa de solos a nível de semidetalhe, realizado por Oliveira et alii (1981), o qual serviu também como verdade terrestre em termos de solos e, portanto, de base pedológica para a execução do presente trabalho;
- c) existência de fotografias aéreas pancromáticas, na escala aproximada de 1:35000, obtidas em julho/agosto de 1978, portanto, tratando com maior resolução do que os dados MSS/LANDSAT as condições superficiais da área de estudo, num período praticamente simultâneo ao da passagem do satélite utilizada;
- d) existência de uma evidente correlação visual da distribuição espectral/tonal, principalmente do Latossol Roxo e do Latossol Vermelho Escuro, entre as imagens MSS/LANDSAT e o mapa de solos utilizado (Oliveira et alii, 1981), na região de Leme-SP;
- e) presença de solos expostos, numa quantidade significativa, na data da passagem do satélite, fator fundamental para os trabalhos no Image-100.

TABELA 3.1

IMPORTÂNCIA DOS SOLOS ESTUDADOS, EM RELAÇÃO AO ESTADO
DE SÃO PAULO, EM EXTENSÃO AREAL

| SOLOS | ÁREA(km ²) | % DO ESTADO | MUNICÍPIOS |
|-------|------------------------|-------------|------------|
| LE | 58 565 | 24,1 | 200 |
| LV | 31 142 | 12,7 | 226 |
| PV | 16 306 | 6,6 | 138 |
| LR | 2 644 | 1,1 | 36 |

FONTE: Comissão de Solos (1960a), pp. 82, 249, 297 e 334.

3.10 - OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS ESPECTRAIS DIGITAIS

Entre as melhores formas de otimizar o aproveitamento das propriedades espectrais de mais de uma banda, simultaneamente, está a obtenção de composições coloridas simuladas infravermelhas ou normais, através do Image-100 (Taranik, 1978).

Assim, inicialmente obteve-se uma composição simulada infravermelha falsa-cor pela combinação dos seguintes canais e filtros: canal 4 com filtro azul; canal 5 com filtro verde e canal 7 com filtro vermelho.

Na escala aproximada de 1:100.000 existe uma correlação biunívoca entre os "pixels" dos dados MSS/LANDSAT e os elementos de resolução do vídeo do Image-100. Assim, e também pelo fato de que nesta escala a área de estudo cabe inteiramente no vídeo do Image-100, foi usada aquela escala para a seleção das amostras de níveis de cinza dos solos. Além disso, o mapa de solos (Oliveira et alii, 1981) também está nesta escala.

A seleção dos locais das amostras de níveis de cinza foi feita considerando os seguintes fatores:

- a) áreas de solos expostos, correspondentes a tons verdes no vídeo do Image-100, quando neste estava sendo mostrada uma composição simulada infravermelha falsa-cor, na escala de 1:100.000;
- b) classes de solos, mostradas pelo mapa utilizado (Oliveira et alii, 1981); sendo que só foram considerados os quatro Grandes Grupos de solos já anteriormente citados e não as subdivisões de Grandes Grupos.

Nesta etapa foi indispensável a utilização das aerofotografias pancromáticas, de escala bem maior, para a confirmação das condições de solos expostos, para a documentação dos locais das amostras de níveis de cinza selecionadas e também para a localização mais precisa destas amostras dentro das áreas de ocorrência dos solos.

Procurou-se obter o maior número possível de amostras, tendo-se conseguido fazer a aquisição de 63 amostras, contendo 36 "pixels" cada uma, conforme é mostrado na Tabela 3.2.

TABELA 3.2

DISTRIBUIÇÃO DAS AMOSTRAS DE NÍVEIS DE CINZA POR GRANDE GRUPO DE SOLO, OBTIDAS NO IMAGE-100

| SOLOS | Nº AMOSTRAS | Nº "PIXELS" | ÁREA APROX.(ha) |
|--------|-------------|-------------|-----------------|
| LV | 19 | 684 | 307,8 |
| LR | 26 | 936 | 421,2 |
| LE | 07 | 252 | 113,4 |
| PV | 11 | 396 | 178,2 |
| TOTAIS | 63 | 2268 | 1020,6 |

Para a aquisição das amostras espectrais digitais, foi utilizada a fase de "Aquisição de Amostras" do algoritmo MAXVER (Velasco et alii, 1978). Para cada amostra é fornecida a média dos níveis de cinza dos "pixels" correspondentes a cada classe de solo analisada, para os canais 4, 5, 6 e 7.

3.11 - OBTENÇÃO DOS DADOS DE ESPECTROMETRIA DE CAMPO

Para a concretização desta fase foi realizado um trabalho de campo na área de estudo, no período de 23 a 28 de agosto de 1982. Foi escolhido este período em virtude de, nesta época do ano, haver uma grande quantidade de solos expostos devido ao preparo para o próximo plantio, condição esta que facilita a aquisição de dados de espectrometria de campo.

Os espectros de reflectância dos solos foram obtidos utilizando um radiômetro portátil ABBE SEKKEJ, modelo 2701, nos seguintes comprimentos de onda: 450, 500, 550, 600, 650, 750, 850 e 1050 nm, que eram os disponíveis no instrumento na ocasião; com uma abertura angular de $5^{\circ}40'$, o que permitia que se visse uma área superficial dos solos de aproximadamente 20 cm de diâmetro.

As medidas foram realizadas sempre pelo mesmo operador, a fim de não introduzir erros metodológicos e sempre considerando um ângulo azimutal solar aproximado de 180° , conforme é mostrado esquematicamente na Figura 3.3.

Este ângulo azimutal de 180° foi fixado com a finalidade de evitar que mudanças do ângulo de medidas fossem fator de variações nos valores de reflectância obtidos e também porque a reflectância é máxima nesta direção, conforme as conclusões de Egbert e Ulaby (1972).

Foram efetuadas cinco medições em cada ponto, tendo sido uma medida na placa-padrão branca de Sulfato de Bário, três medidas no solo e novamente uma medida na placa-padrão.

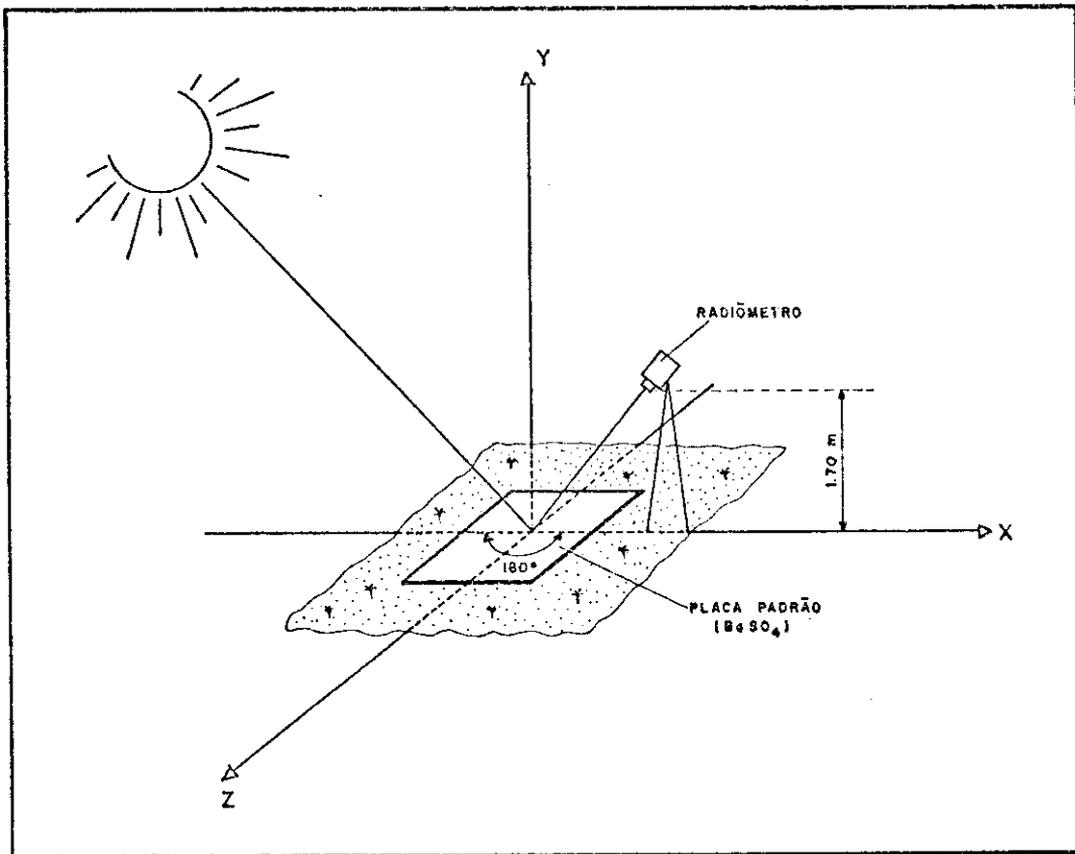


Fig. 3.3 - Esquema utilizado para a obtenção de medidas espectrais no campo.

Esses valores medidos serviram posteriormente como entrada para o cálculo da reflectância, conforme Emori et alii (1972), através da seguinte fórmula:

$$R(\%) = 10 \frac{-(\bar{P} - \bar{S})}{\bar{S}} \cdot 100,$$

onde:

- $R(\%)$ = fator de reflectância, em porcentagem;
- \bar{P} = média das duas medidas na placa-padrão;
- \bar{S} = média das três medidas no solo.

A fim de documentar as condições de superfície dos solos em que foram feitas as medidas espectrais, foram tiradas fotografias co

loridas com câmara manual. Isto foi útil para que se pudessem comparar apenas os espectros obtidos nos solos sob condições semelhantes.

Obtiveram-se ainda as cores úmida e seca, segundo a classificação de Munsell (1947); e a umidade em porcentagem foi medida através de umidímetro de campo, já que estes parâmetros influenciam significativamente a resposta espectral dos solos.

Foram também coletadas amostras do horizonte superficial dos solos para posteriores análises físicas e químicas, através das quais foram determinados os teores de matéria orgânica e de óxidos de ferro, a capacidade de troca catiônica (CTC) e a composição granulométrica, conforme descrição no item 3.13; dados estes utilizados para correlações com os espectros de reflectância obtidos.

3.12 - OBTENÇÃO DOS DADOS DE ESPECTROMETRIA DE LABORATÓRIO

A terceira grande etapa do trabalho consistiu na obtenção de medidas de reflectância espectral de 17 amostras de solos da área de estudo, em condições de laboratório; a qual constou das fases descritas a seguir.

3.12.1 - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Como a umidade é um dos principais fatores influenciadores na reflectância dos solos, as 17 amostras de solos foram secas ao ar livre por 24 horas, tornando-se praticamente iguais quanto às condições de umidade.

Para acondicionar as amostras foram confeccionados recipientes redondos de PVC - semelhantes às placas de Petri, utilizadas em laboratórios químicos - os quais foram pintados com tinta preta fosca, para evitar reflexão de fundo durante as medidas espectrorradiométricas interferindo nos valores obtidos.

Os agregados das amostras foram desfeitos, tornando-se as mesmas granulometricamente semelhantes. Em seguida, elas foram acondicionadas nos recipientes pretos de PVC.

3.12.2 - OBTENÇÃO DAS MEDIDAS ESPECTRAIS

Para a execução das medidas espectrais em condições de laboratório, foi utilizado o espectrorradiômetro descrito no item 3.7.2.

Como fonte de radiação foi utilizado um Simulador Solar produzido pela Oriel Corporation Ltd., de Stanford (EUA), o qual emite energia de composição semelhante à luz solar natural.

O esquema de dispositivos montado para esta fase é mostrado na Figura 3.4.

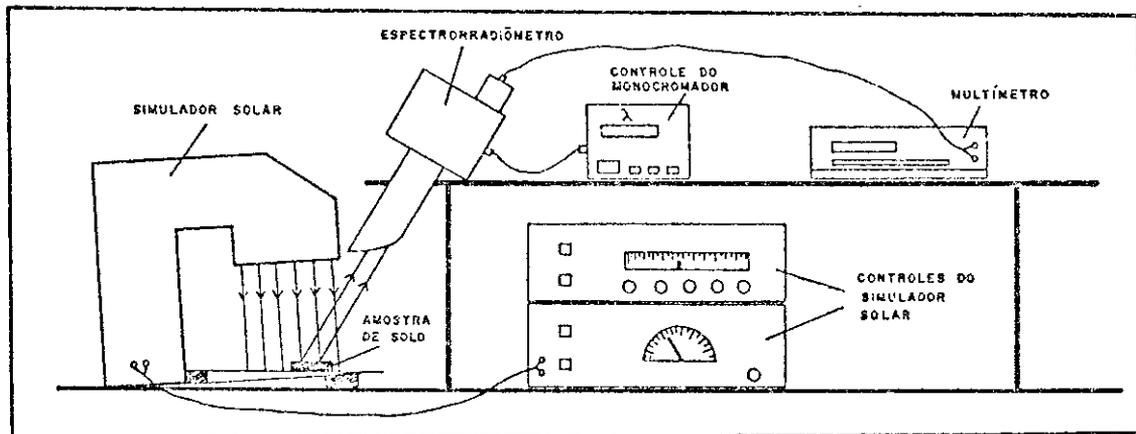


Fig. 3.4 - Configuração do sistema de equipamentos montado para a obtenção das medidas espectrorradiométricas das amostras de solos em laboratório.

O caminho percorrido pela radiação foi tornado o mais curto possível, a fim de evitar dispersão da luz colimada oriunda da fonte.

O ângulo de incidência (θ) da radiação sobre as amostras e o ângulo de visada (ϕ) do radiômetro com a normal ao plano das amostras foram de aproximadamente $5,7^\circ$. Os ângulos θ e ϕ foram feitos os mais próximos e menores que a montagem do equipamento permitiu.

A abertura angular do telescópio foi de 3° , estando este distante cerca de 60 cm das amostras-alvo. Desta forma o telescópio cobria um campo circular na superfície das amostras, cujo diâmetro era de aproximadamente 3 cm, sendo que o diâmetro dos recipientes que continham as amostras era de 18 cm.

Como referência foi utilizada uma placa-padrão de cartolina branca, sobre a qual foi depositada uma camada de Óxido de Magnésio (MgO), a qual é considerada perfeitamente difusora da energia eletromagnética natural.

Para cada cinco leituras nas amostras de solos, em cada comprimento de onda, foi realizada uma leitura da resposta espectral da placa-padrão branca, sendo que foram realizadas leituras desde 400 até 1100 nm, a intervalos de 50 nm.

A razão entre os valores espectrais das amostras e os respectivos valores da placa-padrão, lidos no multímetro, forneceu os valores de fator de reflectância para cada comprimento de onda utilizado.

3.13 - OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS

Os parâmetros físicos e químicos de interesse foram os teores de matéria orgânica e de ferro, a capacidade de troca catiônica (CTC) e a composição granulométrica, os quais foram referidos na literatura como as variáveis que mais influenciam o comportamento espectral dos solos.

As análises físicas e químicas foram realizadas pelo laboratório da Seção de Pedologia, do Instituto Agronômico de Campinas (IAC), e utilizados os seguintes métodos, descritos em Oliveira et alii (1982).

3.13.1 - TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA

Inicialmente é obtido o teor de carbono orgânico (C) pela oxidação da matéria orgânica com solução 1N de bicromato de potássio em meio ácido e titulação do excesso de bicromato com solução de sulfato ferroso-amoniacoal 0,5N, usando difenilamina como indicador, segundo Vet tori (1969).

O teor de matéria orgânica, em porcentagem, é então obtido através da seguinte fórmula, adotada por Mello et alii (s.d.):

$$M.O.(%) = C(%) \cdot 1,72,$$

onde:

M.O.(%) = teor de matéria orgânica, em porcentagem;

C(%) = teor de carbono orgânico, em porcentagem.

3.13.2 - TEOR DE Fe₂O₃

Os teores de ferro foram obtidos em conjunto com a determinação do complexo de óxidos (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e TiO₂), através da digestão com H₂SO₄ d = 1,47; separação do SiO₂ por filtração; solubilização de SiO₂ dos silicatos com solução de NaOH a 30% a quente, dosagem colorimétrica de SiO₂ em solução sulfomolibdica em presença de solução de ácido tartárico e ácido ascórbico. Em alíquotas do filtrado do extrato sulfúrico, determinaram-se colorimetricamente: Al₂O₃ com aluminon; Fe₂O₃ com 1,10 fenantrolina e TiO₂ com água oxigenada em presença de ácido fosfórico.

3.13.3 - CAPACIDADE DE TROCA CATIONICA (CTC)

Os valores de CTC foram obtidos pela operação de adição entre a Soma de Bases Trocáveis (S) e a Acidez Titulável (H⁺ + Al³⁺), sendo que estes parâmetros foram obtidos conforme Oliveira et alii (1982), da forma descrita a seguir:

- 1) Bases Trocáveis: extração por agitação de 10g de TFSA com 100 ml de HNO_3 0,05N. O cálcio e o magnésio foram determinados no extrato por espectrofotometria de absorção atômica, utilizando solução de óxido de lantânio a 0,2% para eliminar a interferência do alumínio e fósforo (Slavin, 1968). O potássio foi determinado por fotometria de chama, segundo Catani e Paiva Neto (1949).
- 2) Acidez titulável ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$): extração por agitação de 5g de TFSA com 100 ml de acetato de cálcio 1N a pH 7 e titulação com NaOH 0,1N, usando fenolftaleína como indicador.

3.13.4 - COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Segundo Oliveira et alii (1982), a composição granulométrica das amostras foi obtida pelo método da pipeta e dispersão com hexametáfosfato de sódio e NaOH , conforme Grohmann e Van Raij (1974).

A classificação textural foi a preconizada por Medina e Grohmann (1962) e a escala textural empregada foi a de Atterberg:

- 2 - 0,2 mm = areia grossa
- 0,2 - 0,02 mm = areia fina
- 0,02 - 0,002 mm = silte
- < 0,002 mm = argila

3.14 - ANÁLISES QUANTITATIVAS DOS DADOS

De posse de todos os dados cuja obtenção foi descrita até aqui, ou seja, os dados digitais MSS, os de espectrometria de campo e os de espectrometria de laboratório, procedeu-se às análises numéricas descritas a seguir.

Inicialmente foram traçadas as curvas espectrais das 17 medições de laboratório, das 42 medições de campo e das 63 amostras de níveis de cinza do MSS/LANDSAT, a fim de que se pudesse caracterizar e com

parar as tendências e o comportamento espectral dos quatro solos em questão, nos três níveis de coleta utilizados.

Para os dados digitais MSS/LANDSAT, foram também efetuados os cálculos e as análises dos índices: a) relação canal 5/canal 7 e, b) magnitude (ou reflectância relativa total); os quais, segundo Landgrebe et alii (1977), são muito úteis quando se pretende discriminar classes espectrais de solos.

Em seguida, procedeu-se ao ajustamento das melhores curvas possíveis aos pontos de medidas espectrais disponíveis, tanto para os dados de campo como para os de laboratório, através do método denominado "Spline Function" (Forsythe et alii, 1977). Estas curvas assim ajustadas foram também integradas através de procedimentos computacionais, considerando os intervalos correspondentes às quatro bandas do sensor MSS/LANDSAT.

Este procedimento foi útil para que se pudesse realizar análises estatísticas quanto à separabilidade espectral dos solos, através dos valores obtidos por espectrometria de campo e de laboratório.

Desta forma, com os dados fornecidos pela integração das curvas, executou-se uma Análise Discriminante Linear, utilizando os procedimentos computacionais descritos em Davis (1973), tanto para as condições de campo, como para as de laboratório.

A técnica de Análise Discriminante Linear vem sendo utilizada como importante forma de verificação da separabilidade espectral de alvos naturais. Mattos e Vitorello (1982) utilizaram-na para quantificar a separabilidade entre calcários e quartzitos em imagens MSS/LANDSAT. Connel et alii (1978) utilizaram-na para verificar quantitativamente a separabilidade de rochas epitermais alteradas, hidrotermais alteradas e rochas não-alteradas, através de valores espectrais obtidos em campo, para estudos de ocorrência de urânio.

Para a verificação da separabilidade dos dados digitais MSS/LANDSAT foi utilizada a medida de distância JM (Jeffreys-Matusita), descrita por Swain e King (1973). A distância JM é dada pela fórmula:

$$JM = 2(1 - e^{-\alpha}),$$

onde:

$$\alpha = 1/8 (U_1 - U_2)^T \Sigma^{-1} (U_1 - U_2) + 1/2 \log_e \left| \frac{\det \Sigma}{\sqrt{\det \Sigma_1 \cdot \det \Sigma_2}} \right|,$$

e

U_1 = matriz das médias da classe 1;

U_2 = matriz das médias da classe 2;

$()^T$ = matriz transposta;

$()^{-1}$ = matriz inversa;

$$\Sigma = 1/2 \left| \Sigma_1 + \Sigma_2 \right|;$$

Σ_1 = matriz de covariância da classe 1;

Σ_2 = matriz de covariância da classe 2;

$\det \Sigma_1$ = determinante da matriz de covariância da classe 1;

$\det \Sigma_2$ = determinante da matriz de covariância da classe 2.

A distância JM entre duas classes, obtida por intermédio desta fórmula, varia de 0,00 a 2,00 (quanto maior for o valor, maior será a separabilidade entre as classes). Estes valores, por sua vez, foram correlacionados por Swain e King (1973), com valores de probabilidade de classificação correta, conforme apresentado na Figura 3.5.

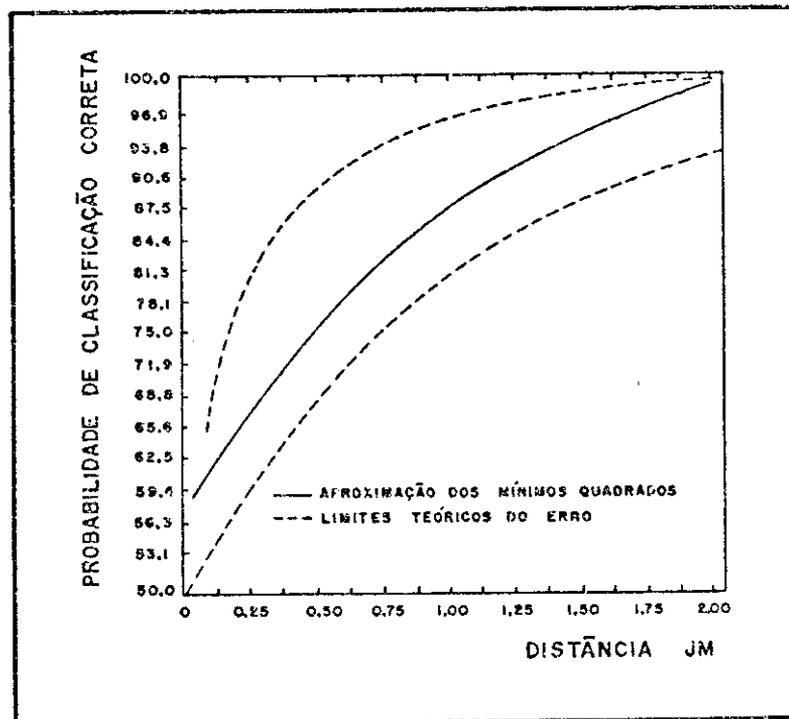
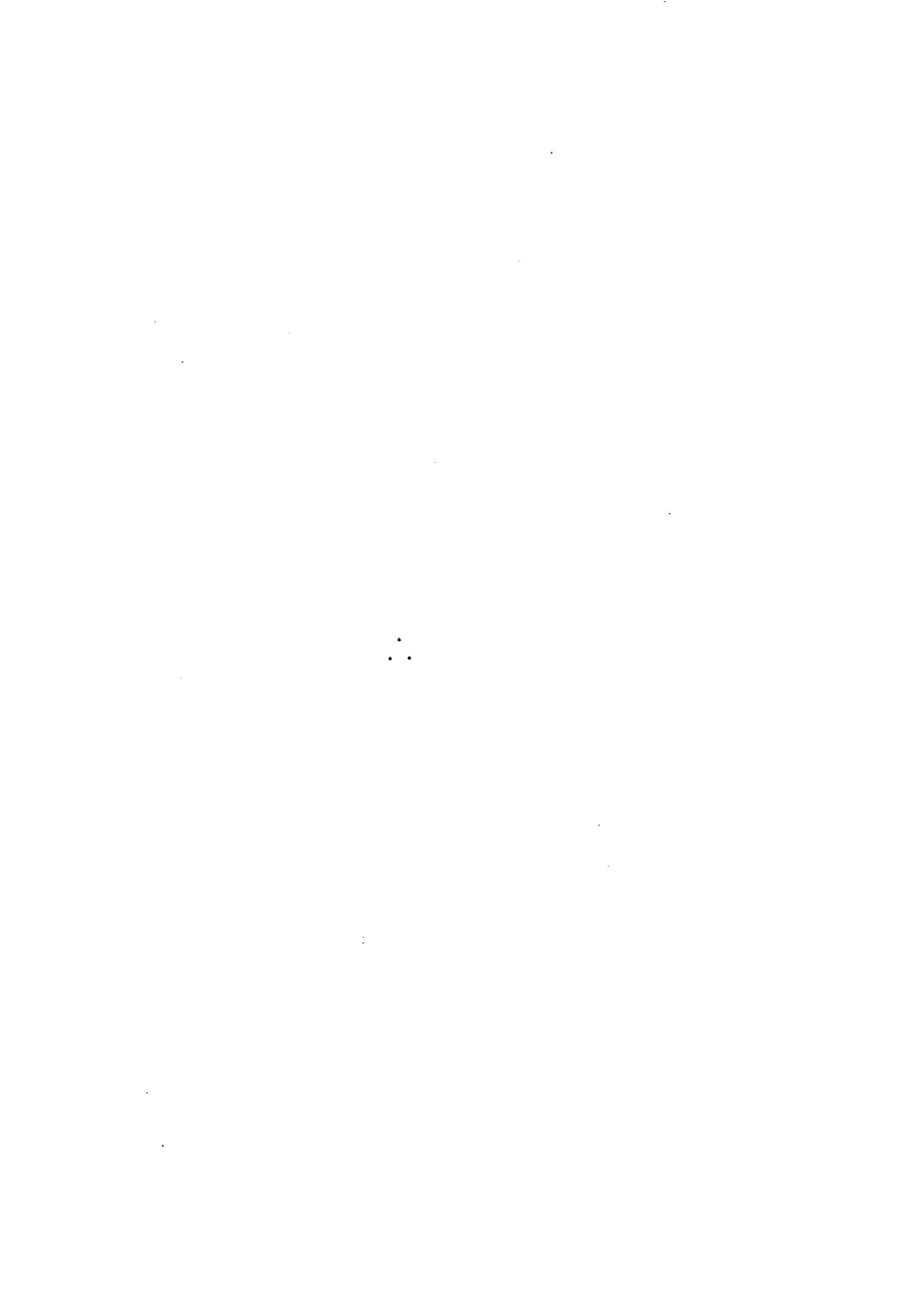


Fig. 3.5 - Gráfico ilustrativo da probabilidade de classificação correta, em função da distância JM.

FONTE: Swain e King (1973), p. 4.

Com o objetivo de garantir uma alta precisão de classificação, Aoki e Santos (1980) assumiram o valor de JM igual a 1,50, para o qual equivale uma probabilidade de classificação correta de 95%. Hernandez Filho e Shimabukuro (1978) consideraram que duas classes são separáveis quando o valor JM entre elas for maior ou igual a 1,00, o qual corresponde a uma probabilidade de classificação correta maior ou igual a 85% (Figura 3.5).

Finalmente, foi feita também uma correlação entre os dados espectrais de campo e de laboratório, para o que se utilizou o algoritmo BASIS (Burroughs Advanced Statistical Inquiry System), que está descrito em Burroughs (1975).



CAPITULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados espectrais que serviram de base para o presente trabalho, obtidos nos níveis de laboratório, de campo e de satélite, se não apresentados e discutidos a seguir.

4.1 - COMPORTAMENTOS ESPECTRAIS DOS QUATRO SOLOS

4.1.1 - DADOS DE LABORATÓRIO

Com amostras de solo coletadas durante a realização do trabalho de campo foram obtidos 17 espectros em condições de laboratório, para o que foi utilizado o protótipo de um espectrorradiômetro desenvolvido no INPE (Bandonés, 1982), conforme está descrito no item 3.12. Estes dados são apresentados na Tabela 4.1.

Para visualizar melhor os aspectos de comportamento espectral dos quatro solos em estudo, foi executada a representação gráfica das médias destes valores espectrais, obtendo-se as curvas mostradas na Figura 4.1, que representam os comportamentos espectrais médios dos quatro solos, em condições de laboratório.

TABELA 4.1

VALORES ESPECTRAIS DE 17 AMOSTRAS DOS QUATRO SOLOS, OBTIDOS
EM LABORATÓRIO

| Anos trás λ | LR | | | | | MEDIA LR | LV | | | | MEDIA LV |
|---------------------------|---------|---------|-------------|---------|---------|-------------|---------|---------|---------|-------------|-------------|
| | P.05-LR | P.06-LR | P.19-LR | P.50-LR | P.51-LR | | P.16-LV | P.23-LV | P.40-LV | P.43-LV | |
| 400 | 1,97 | 1,97 | 1,66 | 4,90 | 5,20 | 3,14 | 7,30 | 4,26 | 8,07 | 8,07 | 6,92 |
| 450 | 1,57 | 1,97 | 1,66 | 2,80 | 3,20 | 2,32 | 5,30 | 4,26 | 4,34 | 4,45 | 4,59 |
| 500 | 3,18 | 3,18 | 2,82 | 4,00 | 4,50 | 3,54 | 7,30 | 5,85 | 5,61 | 6,03 | 6,20 |
| 550 | 5,63 | 5,62 | 4,93 | 6,10 | 6,90 | 5,84 | 10,50 | 9,68 | 7,74 | 8,94 | 9,21 |
| 600 | 10,87 | 11,14 | 10,39 | 12,10 | 12,70 | 11,44 | 15,00 | 12,97 | 13,53 | 16,01 | 14,33 |
| 650 | 13,14 | 15,04 | 13,39 | 15,40 | 15,90 | 14,57 | 16,90 | 16,12 | 16,85 | 18,19 | 17,01 |
| 700 | 15,26 | 16,25 | 16,25 | 16,90 | 18,00 | 16,53 | 21,40 | 18,77 | 19,15 | 19,81 | 19,78 |
| 750 | 16,08 | 18,49 | 17,24 | 18,40 | 19,90 | 18,02 | 23,00 | 20,90 | 21,60 | 21,71 | 21,80 |
| 800 | 16,89 | 18,57 | 16,75 | 19,50 | 19,90 | 18,32 | 25,20 | 22,34 | 22,61 | 22,17 | 23,08 |
| 850 | 17,32 | 18,64 | 17,17 | 18,10 | 19,40 | 18,13 | 23,40 | 23,05 | 22,80 | 23,55 | 23,20 |
| 900 | 18,27 | 19,77 | 17,66 | 18,40 | 19,90 | 18,80 | 26,40 | 24,44 | 26,17 | 24,94 | 25,49 |
| 950 | 18,13 | 19,44 | 17,90 | 20,50 | 20,60 | 19,11 | 25,70 | 24,50 | 27,64 | 23,80 | 25,41 |
| 1000 | 19,20 | 20,30 | 17,76 | 19,40 | 21,70 | 19,67 | 25,50 | 25,17 | 28,45 | 28,80 | 26,98 |
| 1050 | 17,48 | 18,80 | 17,85 | 17,90 | 20,80 | 18,57 | 25,70 | 25,09 | 27,20 | 23,46 | 25,86 |
| 1100 | 20,04 | 21,83 | 19,82 | 20,40 | 21,30 | 20,68 | 29,30 | 27,84 | 28,66 | 28,66 | 28,61 |
| Anos trás λ | LE | | MEDIA LE | PV | | | PV | | | MEDIA PV | - o - |
| | P.18-LE | P.93-LE | | P.26-PV | P.53-PV | P.55-PV | P.61-PV | P.64-PV | P.67-PV | | |
| 400 | 1,83 | 5,20 | 3,51 | 7,43 | 6,69 | 7,37 | 7,10 | 6,50 | 5,60 | 6,78 | - o - |
| 450 | 1,83 | 2,90 | 2,36 | 4,71 | 3,92 | 4,24 | 4,50 | 4,20 | 3,10 | 4,21 | - o - |
| 500 | 2,74 | 3,80 | 3,27 | 5,91 | 4,97 | 5,66 | 6,10 | 6,20 | 4,50 | 5,56 | - o - |
| 550 | 4,51 | 5,50 | 5,00 | 8,97 | 8,15 | 9,14 | 9,70 | 9,60 | 7,00 | 8,76 | - o - |
| 600 | 9,74 | 11,10 | 10,42 | 13,54 | 14,78 | 16,61 | 15,90 | 15,40 | 14,90 | 15,19 | - o - |
| 650 | 12,31 | 13,70 | 13,00 | 15,96 | 17,86 | 19,35 | 18,80 | 17,20 | 19,40 | 18,09 | - o - |
| 700 | 14,09 | 15,40 | 14,74 | 18,66 | 20,20 | 22,37 | 20,40 | 18,30 | 22,10 | 20,34 | - o - |
| 750 | 15,98 | 16,40 | 16,19 | 20,10 | 21,42 | 23,87 | 21,90 | 21,00 | 22,70 | 21,83 | - o - |
| 800 | 15,07 | 17,40 | 16,23 | 20,17 | 21,49 | 24,23 | 23,70 | 21,20 | 24,00 | 22,46 | - o - |
| 850 | 15,26 | 16,90 | 16,08 | 20,55 | 23,61 | 23,84 | 23,80 | 20,70 | 22,30 | 22,47 | - o - |
| 900 | 16,49 | 18,00 | 17,24 | 21,94 | 26,06 | 24,06 | 22,30 | 22,10 | 23,40 | 23,31 | - o - |
| 950 | 16,27 | 18,50 | 17,38 | 23,61 | 25,75 | 25,64 | 23,30 | 23,10 | 23,90 | 24,22 | - o - |
| 1000 | 16,77 | 18,90 | 17,83 | 24,71 | 24,83 | 27,21 | 25,20 | 23,90 | 25,10 | 25,16 | - o - |
| 1050 | 16,17 | 18,70 | 17,43 | 23,29 | 25,23 | 24,43 | 23,90 | 24,80 | 25,90 | 24,59 | - o - |
| 1100 | 18,48 | 19,50 | 18,99 | 24,06 | 26,71 | 27,59 | 25,10 | 23,90 | 26,70 | 25,68 | - o - |

λ - comprimentos de onda, em nanômetros.

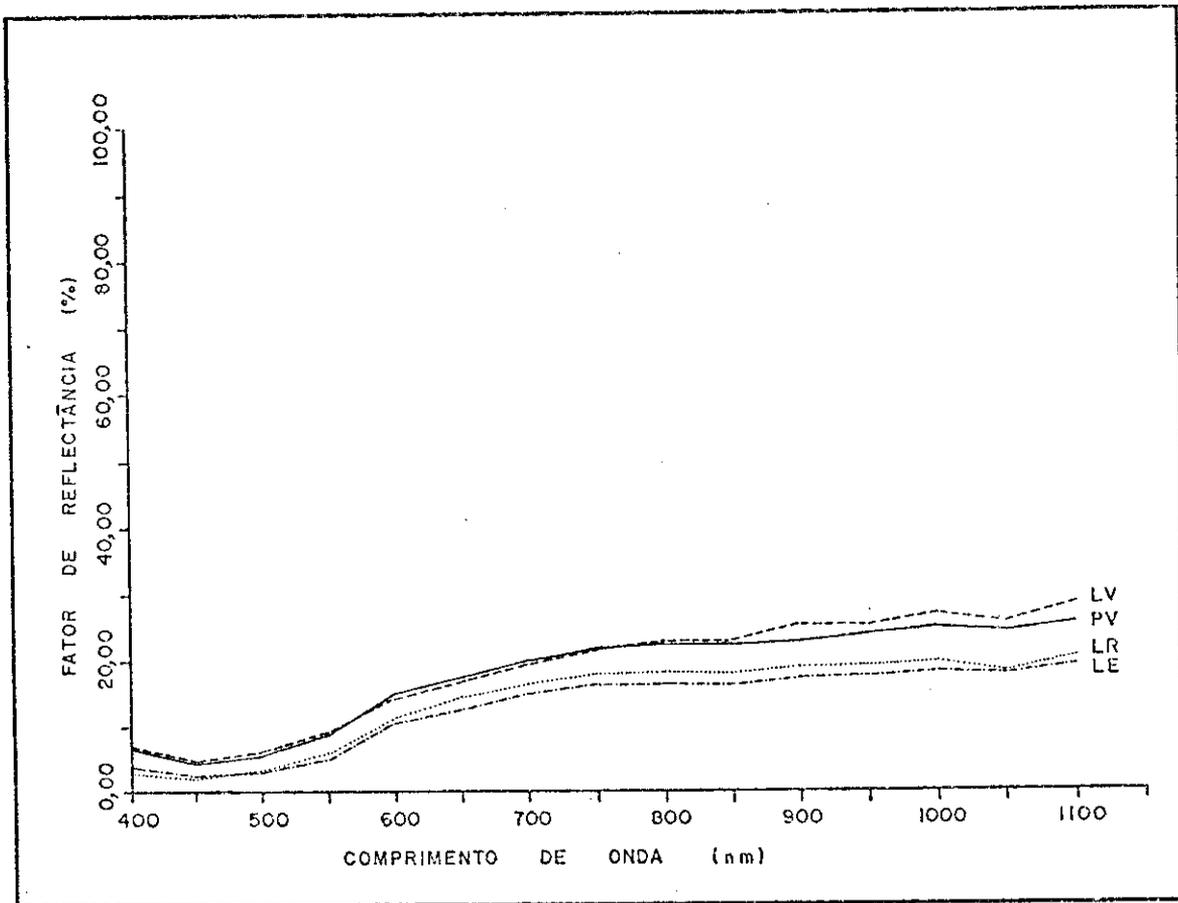


Fig. 4.1 - Curvas espectrais médias para os solos LE, LR, LV e PV, obtidas em condições de laboratório.

Pelo exame da Tabela 4.1 e, de forma ainda melhor, pela Figura 4.1, verifica-se que os solos LR e LE, bem como os solos LV e PV, apresentam comportamentos espectrais semelhantes entre si, dois a dois; e os dois primeiros apresentam valores menores de reflectância do que os dois últimos, em todo o intervalo de comprimentos de onda utilizado.

As curvas LV/PV apresentam uma declividade negativa no intervalo de 400 a 450 nm, onde esta passa a ser positiva. A partir deste ponto, a declividade é positiva e aumenta até as proximidades de 600 nm, onde ocorre um leve decréscimo desta tendência; porém ela continua suavemente positiva até os 1100 nm, com pequenas alternâncias, principalmente na curva dos LV, centradas em 850, 950 e 1050 nm.

As curvas LR/LE apresentam uma declividade praticamente igual a zero desde 400 até 500 nm e esta, a partir deste comprimento de onda, torna-se positiva até por volta de 750 nm. Deste ponto para frente, isto é, de 750 nm até 1100 nm, a declividade torna-se novamente nula ou negativa; o que pode ser considerado característico para estas curvas, pois no caso das curvas LV/PV, nesta faixa espectral, a tendência era sempre positiva, até os 1100 nm. Então, para as curvas LR/LE, a reflectância no infravermelho próximo é praticamente igual à reflectância na banda correspondente ao vermelho do espectro eletromagnético, como pode ser verificado na Figura 4.1.

Comparando as curvas obtidas neste estudo com os tipos de curvas caracterizados por Condit (1970) e revistos por Stoner e Baumgardner (1980), constata-se que as curvas LV/PV da Figura 4.1 são aproximadamente mais concordantes com as curvas do Tipo 2 (Figuras 2.5 e 2.6) e do Tipo 3 (Figura 2.7), propostas por aqueles autores.

Ségundo Stoner e Baumgardner (1980), os solos de curvas do Tipo 2 possuem boa drenagem e são relativamente pobres em conteúdo de matéria orgânica, podendo ser representados pelos "Ultisols". No caso dos PVs estudados no presente trabalho, estes também foram classificados como "Ultisols" por Oliveira et alii (1981), conforme consta na legenda anexa à Figura 3.2.

No tocante aos solos de curvas do Tipo 3, Stoner e Baumgardner (1980) os associam a conteúdos moderadamente altos de ferro; o que também ocorre com os PVs deste trabalho, porém não com os LVs. Estes últimos normalmente apresentam uma boa drenagem e, também, baixos conteúdos de matéria orgânica, o que, provavelmente, justifica o seu enquadramento dentro deste Tipo 2 de curvas espectrais de solos.

Considerando agora as curvas LR/LE, estas são idênticas às curvas do Tipo 5 de Stoner e Baumgardner (1980), a qual é representativa, no exemplo dado pelos autores, de solos classificados como "Typic Haplothox". A semelhança e concordância das curvas LR/LE com as curvas do Tipo 5 são ainda mais significativas quando se constata que os solos LR e

LE deste estudo são também, em grande parte, classificados como "Typic Haplorthox", de acordo com Oliveira et alii (1981).

De acordo com Stoner e Baumgardner (1980), os solos com curvas do Tipo 5 geralmente são muito ricos em ferro e pobres em matéria orgânica.

Observando o Apêndice A, que contém os principais parâmetros físicos e químicos dos quatro solos em foco, verifica-se que os solos LR e LE correspondem àquelas condições; pois também apresentam relativamente altos teores de ferro, embora não sejam tão pobres em matéria orgânica.

Quanto aos parâmetros capacidade de troca catiônica e granulometria, é sabido que eles são bastante correlacionados com o conteúdo de matéria orgânica e entre si também (Al-Abbas et alii, 1972; Montgomery, 1974). Portanto, como já foi afirmado por estes autores, aqui também se torna difícil fazer uma apreciação objetiva quanto à influência daqueles parâmetros na reflectância destes solos.

No presente caso, os solos LR e LE apresentam curvas com valores menores de reflectância do que os solos LV e PV, o que poderia ser atribuído às maiores quantidades que possuem de matéria orgânica, Fe_2O_3 , CTC e de argila (Apêndice A); o que estaria de acordo com Baumgardner et alii (1970), Al-Abbas et alii (1972), Stoner et alii (1980), Mathews et alii (1973) e Montgomery (1974). Porém, os PVs também possuem relativamente altos valores para matéria orgânica, CTC, Fe_2O_3 e argila e, no entanto, suas curvas assemelham-se mais, e com elas até se confundem, às curvas dos LVs. Isto poderia ser atribuído ao maior conteúdo de silte dos PVs, o que segundo Mathews et alii (1973) e Montgomery (1974), provoca um aumento da reflectância dos solos.

Estas constatações permitem afirmar que existem correlações entre as propriedades físicas e químicas destes solos com os seus espectros de reflectância. No entanto, tornam-se necessárias mais pesquisas suplementares no sentido de verificar como ocorrem estas correla

ções e de que forma elas poderiam ser mais bem utilizadas para aplicações em levantamentos de solos ou mesmo para outras aplicações pedológicas, como foi feito por Al-Abbas et alii (1972), Baumgardner et alii (1970), Mathews et alii (1973), Montgomery (1974) e Costa (1979).

4.1.2 - DADOS DE CAMPO

Estes valores foram obtidos sobre solos da região de Leme-SP, tendo sido utilizado um radiômetro portátil ABBE SEKKEJ, modelo 2701, em oito comprimentos de onda, como foi descrito no item 3.11. Na Tabela 4.2 são apresentados os espectros que foram obtidos sobre solos que possuem condições superficiais semelhantes no momento da aquisição dos dados, isto é, solos preparados para plantio e, portanto, gradeados e com superfícies relativamente uniformes.

TABELA 4.2

VALORES ESPECTRAIS DOS QUATRO SOLOS, OBTIDOS EM CONDIÇÕES DE CAMPO

| Anos tras λ | P.54-PV | P.57-PV | P.58-PV | P.62-PV | P.63-PV | P.64-PV | P.67-PV | P.68-PV | P.69-PV | P.53-PV | P.88-PV | P.89-PV | MEDIA PV |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------|-------------|
| | P.10-LE | P.11-LE | P.13-LE | P.18-LE | P.19-LE | P.32-LE | P.33-LE | P.81-LE | P.82-LE | P.91-LE | P.92-LE | MEDIA LE | |
| 450 | 6,61 | 5,37 | 6,03 | 6,03 | 4,27 | 7,08 | 5,25 | 5,62 | 5,01 | 5,01 | 8,91 | 8,91 | 6,17 |
| 500 | 5,89 | 6,31 | 6,76 | 7,08 | 6,17 | 7,41 | 5,37 | 5,37 | 5,01 | 5,62 | 9,33 | 10,23 | 6,71 |
| 550 | 8,51 | 7,41 | 9,55 | 8,32 | 6,46 | 9,55 | 7,24 | 7,76 | 6,92 | 7,94 | 11,75 | 12,30 | 8,64 |
| 600 | 12,88 | 13,18 | 15,14 | 12,02 | 11,48 | 13,80 | 14,45 | 12,88 | 12,02 | 12,88 | 17,38 | 14,12 | 13,52 |
| 650 | 14,12 | 15,14 | 15,85 | 16,22 | 11,48 | 16,59 | 17,38 | 15,85 | 13,80 | 16,22 | 20,89 | 18,62 | 16,01 |
| 750 | 22,39 | 23,99 | 25,12 | 23,99 | 23,99 | 24,55 | 26,91 | 26,30 | 23,99 | 25,70 | 26,30 | 23,99 | 24,77 |
| 850 | 33,11 | 28,84 | 30,90 | 31,62 | 28,18 | 34,67 | 34,67 | 32,36 | 30,90 | 31,62 | 35,48 | 32,36 | 32,06 |
| 1050 | 53,70 | 47,86 | 50,12 | 50,12 | 48,98 | 53,70 | 50,12 | 48,98 | 51,29 | 53,70 | 45,71 | 52,48 | 50,56 |
| Amos tras λ | P.10-LE | P.11-LE | P.13-LE | P.18-LE | P.19-LE | P.32-LE | P.33-LE | P.81-LE | P.82-LE | P.91-LE | P.92-LE | MEDIA LE | - 0 - |
| 450 | 3,63 | 4,67 | 4,36 | 3,47 | 4,47 | 5,49 | 5,01 | 4,57 | 3,89 | 3,23 | 3,80 | 4,23 | - 0 - |
| 500 | 2,95 | 4,36 | 4,79 | 3,16 | 4,07 | 6,61 | 5,01 | 4,47 | 3,71 | 3,80 | 2,30 | 4,11 | - 0 - |
| 550 | 4,37 | 7,24 | 5,49 | 4,79 | 5,62 | 7,59 | 6,61 | 6,46 | 5,37 | 5,62 | 5,01 | 5,83 | - 0 - |
| 600 | 6,76 | 8,32 | 8,51 | 8,32 | 8,32 | 10,00 | 10,71 | 11,48 | 8,71 | 8,51 | 7,76 | 8,85 | - 0 - |
| 650 | 8,51 | 8,91 | 8,51 | 11,22 | 10,00 | 12,02 | 12,30 | 12,02 | 11,22 | 12,88 | 9,77 | 10,67 | - 0 - |
| 750 | 10,47 | 13,18 | 12,59 | 14,79 | 14,12 | 17,38 | 19,95 | 18,20 | 15,59 | 16,98 | 16,59 | 15,44 | - 0 - |
| 850 | 19,95 | 18,62 | 17,78 | 19,95 | 18,62 | 26,91 | 23,99 | 22,33 | 21,88 | 19,95 | 16,98 | 20,64 | - 0 - |
| 1050 | 22,39 | 25,12 | 26,91 | 31,62 | 28,18 | 33,61 | 33,61 | 33,11 | 34,67 | 31,62 | 32,36 | 30,33 | - 0 - |

(continua)

Tabela 4.2 - Conclusão

| Anos tras λ | P.01-LR | P.02-LR | P.03-LR | P.04-LR | P.05-LR | P.06-LR | P.07-LR | P.09-LR | P.50-LR | P.84-LR | MEDIA LR |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------|---------|-------------|
| 450 | 3,02 | 5,37 | 4,63 | 6,16 | 4,07 | 4,95 | 5,61 | 3,98 | 3,80 | 3,89 | 4,54 |
| 500 | 2,75 | 4,47 | 4,26 | 4,26 | 3,71 | 4,79 | 5,61 | 3,98 | 3,16 | 3,23 | 4,02 |
| 550 | 4,07 | 5,75 | 5,37 | 4,69 | 5,49 | 5,49 | 5,37 | 5,37 | 3,98 | 4,07 | 4,96 |
| 600 | 7,24 | 8,91 | 8,51 | 7,41 | 8,13 | 8,60 | 9,55 | 9,12 | 6,76 | 7,08 | 7,39 |
| 650 | 9,33 | 11,48 | 10,71 | 8,32 | 9,55 | 12,02 | 12,02 | 11,75 | 8,91 | 9,12 | 10,32 |
| 750 | 12,59 | 15,13 | 15,49 | 11,48 | 11,93 | 17,38 | 17,38 | 17,78 | 15,13 | 13,18 | 14,75 |
| 850 | 16,98 | 21,38 | 21,88 | 17,38 | 21,38 | 22,17 | 23,44 | 19,95 | 20,42 | 18,20 | 20,32 |
| 1050 | 27,54 | 35,48 | 38,02 | 33,11 | 36,31 | 38,72 | 37,15 | 31,62 | 28,18 | 33,11 | 33,92 |
| Anos tras λ | P.16-LV | P.28-LV | P.31-LV | P.39-LV | P.40-LV | P.43-LV | P.44-LV | P.48-LV | MEDIA LV | - 0 - | - 0 - |
| 450 | 6,31 | 6,17 | 7,94 | 5,75 | 5,89 | 5,75 | 10,00 | 5,02 | 6,73 | - 0 - | - 0 - |
| 500 | 6,31 | 7,08 | 7,59 | 5,75 | 5,89 | 6,46 | 10,47 | 6,76 | 7,04 | - 0 - | - 0 - |
| 550 | 9,33 | 9,77 | 10,00 | 7,76 | 7,58 | 7,94 | 12,02 | 8,91 | 9,16 | - 0 - | - 0 - |
| 600 | 13,49 | 14,12 | 16,98 | 11,48 | 9,77 | 12,02 | 14,12 | 12,30 | 13,03 | - 0 - | - 0 - |
| 650 | 14,79 | 16,98 | 16,98 | 13,18 | 15,65 | 16,22 | 16,22 | 13,49 | 15,46 | - 0 - | - 0 - |
| 750 | 22,39 | 21,38 | 23,44 | 19,05 | 23,99 | 23,94 | 25,12 | 20,89 | 22,46 | - 0 - | - 0 - |
| 850 | 28,18 | 29,51 | 37,15 | 22,91 | 30,20 | 32,36 | 33,11 | 23,99 | 28,68 | - 0 - | - 0 - |
| 1050 | 44,67 | 39,81 | 44,67 | 35,48 | 44,67 | 50,16 | 45,71 | 35,88 | 42,38 | - 0 - | - 0 - |

λ - comprimentos de onda, em nanômetros.

Na Figura 4.2 foram representadas as curvas espectrais médias dos quatro solos, as quais ilustram melhor o seu padrão de comportamento espectral, com os dados obtidos em condições de campo.

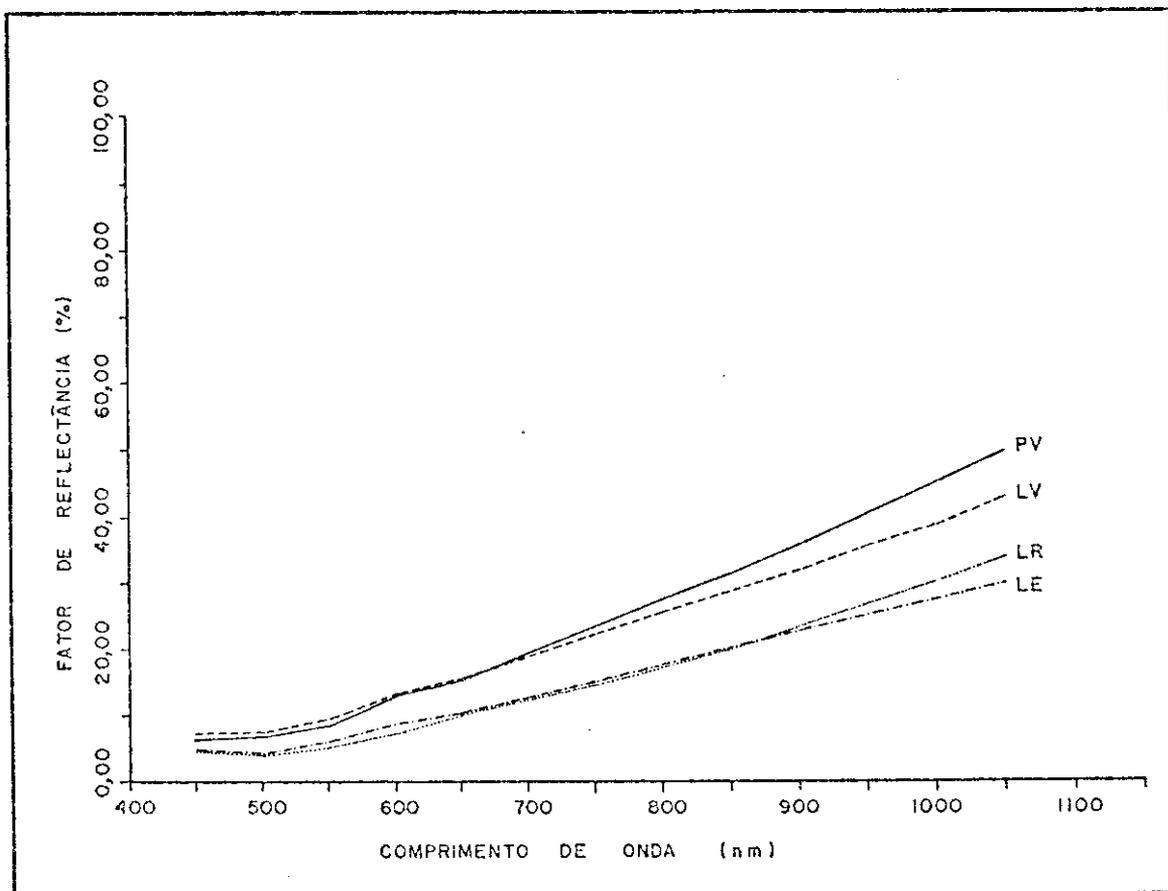


Fig. 4.2 - Curvas espectrais médias para os solos LE, LR, LV e PV, obtidas em condições de campo.

Da mesma forma que para o caso dos valores obtidos em condições de laboratório, os dados de campo também permitem agrupar os quatro solos dois a dois, pelas curvas que apresentam; sendo o primeiro grupo composto pelos solos LR e LE e o segundo, pelos solos LV e PV. O primeiro grupo apresenta valores menores de reflectância em relação ao segundo em todos os comprimentos de onda utilizados.

Muito provavelmente essa menor reflectância dos solos do primeiro grupo (LR/LE) seja devida a fatores intrínsecos a eles, principalmente a sua cor e os seus conteúdos de ferro e de matéria orgânica (Apêndice A).

De fato, os solos LR/LE apresentam cores variando desde 2,5YR 3/4 até 5YR 5/8, ao passo que as cores dos solos LV/PV variam desde 5YR 4/6 até 10YR 5/2; sendo, portanto, os solos LR/LE espectralmente "mais escuros" que os solos LV/PV, o que deve ter-lhes proporcionado uma reflectância menor, pelo menos nos comprimentos de onda correspondentes ao visível. Além disso, como se pode verificar no Apêndice A, os solos LR/LE possuem conteúdos médios de Fe_2O_3 (principalmente estes) e de matéria orgânica maiores que os solos LV/PV, o que deve causar maior absorção da radiação eletromagnética e, portanto, menor reflectância. Isto está de acordo com as conclusões de Bowers e Hanks (1965), de Baumgardner et alii (1970), de Al-Abbas et alii (1972), de Stoner et alii (1980), e de Mathews et alii (1973).

Quanto às curvas propriamente ditas, as do grupo LR/LE apresentam uma declividade praticamente igual a zero entre 450 e 500 nm, e esta, em seguida, passa a ser positiva e constante até 1050 nm. De 450 a 500 nm e de 850 a 1050 nm, a curva LR apresenta valores de reflectância maiores que a LE e de 500 a 850 nm a curva LE é a que apresenta valores maiores.

As curvas LV/PV também apresentam uma declividade nula entre 450 e 500 nm; de 500 a 1050 nm a declividade é positiva e praticamente constante. Entre 450 e 600 nm a curva PV é menor que a LV, a qual, em seguida, passa a ter valores inferiores.

Ao se comparar as curvas obtidas em laboratório (Figura 4.1) com as curvas obtidas em campo (Figura 4.2), pode-se constatar três pontos importantes:

- a) as curvas de campo apresentam semelhança de tendências com as curvas de laboratório, quanto à forma, até cerca de 750 nm, isto

é, praticamente na região do visível do espectro eletromagnético. Porém, deste ponto em diante, no infravermelho próximo, as curvas de campo continuam a subir sempre até os 1050 nm, ao passo que as curvas de laboratório apresentam sua declividade diminuindo e chegando a praticamente zero no caso das curvas LR/LE. Uma explicação para este comportamento diferenciado das curvas de campo na região do infravermelho próximo, em relação às curvas de laboratório, poderia ser atribuída a uma possível reflexão especular associada à geometria de coleta de dados no campo. Neste sentido, seria interessante pesquisar, num outro trabalho, até que ponto este fator interfere na resposta de reflectância espectral dos solos, quando se utiliza um espectrorradiômetro portátil em condições de campo;

- b) os valores espectrais das curvas de campo são sempre maiores que os valores das curvas de laboratório, nos intervalos de comprimentos de onda utilizados.

Sabe-se que vários fatores inerentes aos alvos e ao ambiente interferem nos seus respectivos espectros de reflectância, tais como a sua densidade, a sua temperatura, as suas propriedades físicas e químicas, o ângulo de iluminação, os efeitos atmosféricos (Hunt, 1980).

Com exceção das propriedades intrínsecas aos solos, pode-se afirmar que os outros fatores em jogo, como por exemplo, a densidade, a temperatura, os ângulos de iluminação e os efeitos atmosféricos sofreram alteração quando as medidas foram feitas nas condições de campo e depois nas de laboratório. Além destes fatores, devem ser acrescentados ainda os referentes às diferenças de fontes de iluminação, de equipamentos utilizados, de aberturas angulares e de condições experimentais, para ambos os casos.

Em virtude de todos estes fatores, tais diferenças já eram esperadas e, assim, as influências de cada um deles, ou de todos eles em conjunto, não serão objeto de discussão neste trabalho,

pois foge aos objetivos visados. O que de fato se pretendia era verificar como se comportam os quatro solos em condições de campo e de laboratório e, também, se a relatividade dos comportamentos espectrais seria mantida quando as medidas fossem efetuadas para as duas mencionadas situações. Esta relatividade, como se pode verificar pelas Figuras 4.1 e 4.2, foi plenamente ratificada;

- c) as curvas espectrais dos solos, obtidas em condições de campo, permitem agrupá-los dois a dois, a exemplo do que ocorreu para as curvas obtidas em laboratório, sendo o primeiro grupo representado pelas curvas LR/LE e o segundo, pelas curvas LV/PV.

É provável que, com maior controle e com maiores refinamentos de metodologias, as técnicas de espectrometria de laboratório e/ou de campo, venham a ser efetivamente utilizadas nos trabalhos de caracterização, mapeamento e classificação dos solos, como uma ferramenta fornecedora de dados quantitativos e, conseqüentemente, menos subjetivos do que as designações de cor atualmente utilizadas.

4.1.3 - DADOS DIGITAIS MSS/LANDSAT

Os dados digitais MSS/LANDSAT foram obtidos através do Analisador Automático de Imagens Multiespectrais Image-100, sobre as fitas CCT da órbita 178, ponto 27, passagem de 10/08/78. Foram adquiridas 63 amostras de níveis de cinza dos quatro solos, as quais são mostradas na Tabela 4.3.

Os valores da Tabela 4.3 foram representados no gráfico da Figura 4.3, o qual propicia uma interpretação mais clara destes dados, bem como uma visão do padrão de comportamento espectral dos quatro solos, da forma como são "vistos" pelo sensor MSS/LANDSAT.

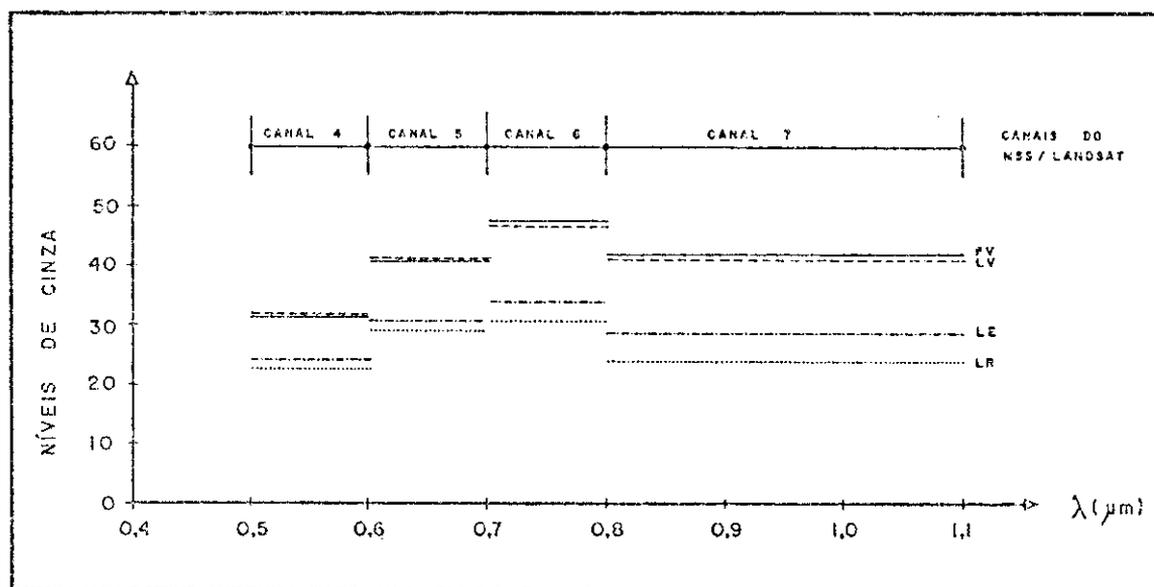


Fig. 4.3 - Valores digitais médios de 63 amostras de níveis de cinza do MSS/LANDSAT, dos quatro solos.

Para maior clareza e simplificação, as respostas dos solos nos quatro canais MSS/LANDSAT, representadas no gráfico da Figura 4.3, deste ponto para frente serão designadas apenas como "curvas".

Assim, pelo exame da Figura 4.3, verifica-se que as curvas LE/LR apresentam-se com valores menores do que as curvas LV/PV, em todos os quatro canais.

Pelo que foi discutido até aqui, pode-se afirmar que as tendências de comportamento espectral destes dados digitais são basicamente idênticas às tendências verificadas para os dados de laboratório (Figura 4.1 e de campo (Figura 4.2)). Esta constatação permite considerar que os

três níveis de coleta de dados utilizados ratificam-se mutuamente. Conseqüentemente, pode-se utilizar um ou outro nível de coleta de dados, conforme as respectivas metodologias, e de acordo com as necessidades e/ou possibilidades, para cada caso específico.

Ainda em relação à Figura 4.3, ao se comparar as respostas no canal 5 e no canal 7, verifica-se o seguinte:

- a) para as curvas LE/LR, os valores digitais do canal 5 são maiores que os do canal 7; portanto, se for feita uma relação do tipo canal 5/canal 7, para estes solos, normalmente ter-se-ão valores maiores que 1,00;
- b) para as curvas LV/PV, os valores digitais do canal 5 são praticamente iguais ou menores que os do canal 7; portanto, se for feita a mesma relação canal 5/canal 7, para este dois solos, normalmente ter-se-ão valores iguais ou menores que 1,00.

A Tabela 4.4 ilustra com valores numéricos o que foi afirmado acima. Nesta tabela, tem-se, no caso da relação canal 5/canal 7, valores maiores que 1,00 para os solos LR e LE, e, em geral, valores menores ou iguais a 1,00, para os solos LV e PV. Ainda nesta tabela, são apresentados também os valores de reflectância total relativa, ou magnitude (Landgrebe et alii, 1977), que é, da mesma forma que a relação canal 5/canal 7, muito importante para a discriminação espectral dos solos.

TABELA 4.4

VALORES DA RELAÇÃO CANAL 5/CANAL 7 E DA MAGNITUDE PARA AS 63
AMOSTRAS DE NÍVEIS DE CINZA PARA OS QUATRO SOLOS

| Solos Anos tras | LR | | LE | | LV | | PV | |
|-----------------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| | C.5/C.7 | MAGN. | C.5/C.7 | MAGN. | C.5/C.7 | MAGN. | C.5/C.7 | MAGN. |
| 01 | 1,20 | 110,47 | 1,11 | 125,39 | 0,98 | 144,86 | 0,99 | 158,72 |
| 02 | 1,25 | 107,02 | 1,14 | 128,59 | 0,98 | 148,37 | 1,04 | 156,98 |
| 03 | 1,19 | 116,10 | 1,14 | 105,95 | 1,06 | 160,08 | 1,05 | 145,89 |
| 04 | 1,25 | 101,06 | 1,26 | 114,00 | 1,08 | 168,73 | 0,75 | 166,20 |
| 05 | 1,26 | 116,47 | 1,29 | 109,31 | 1,04 | 143,19 | 1,00 | 160,37 |
| 06 | 1,21 | 116,14 | 1,22 | 119,05 | 0,98 | 195,13 | 0,95 | 155,17 |
| 07 | 1,12 | 105,53 | 0,76 | 126,11 | 0,92 | 162,36 | 1,04 | 169,19 |
| 08 | 1,10 | 106,94 | - 0 - | - 0 - | 1,06 | 152,72 | 1,00 | 162,22 |
| 09 | 1,13 | 119,57 | - 0 - | - 0 - | 1,04 | 158,06 | 1,00 | 183,47 |
| 10 | 1,24 | 111,29 | - 0 - | - 0 - | 0,98 | 169,73 | 1,01 | 191,03 |
| 11 | 1,17 | 113,44 | - 0 - | - 0 - | 0,99 | 171,61 | 0,91 | 162,89 |
| 12 | 1,12 | 115,64 | - 0 - | - 0 - | 1,05 | 144,56 | - 0 - | - 0 - |
| 13 | 1,26 | 104,20 | - 0 - | - 0 - | 0,99 | 156,33 | - 0 - | - 0 - |
| 14 | 1,22 | 101,92 | - 0 - | - 0 - | 0,93 | 146,98 | - 0 - | - 0 - |
| 15 | 1,13 | 108,53 | - 0 - | - 0 - | 1,02 | 179,38 | - 0 - | - 0 - |
| 16 | 1,19 | 105,53 | - 0 - | - 0 - | 0,99 | 178,75 | - 0 - | - 0 - |
| 17 | 1,21 | 111,70 | - 0 - | - 0 - | 0,99 | 177,45 | - 0 - | - 0 - |
| 18 | 1,20 | 113,61 | - 0 - | - 0 - | 1,08 | 151,86 | - 0 - | - 0 - |
| 19 | 1,29 | 107,78 | - 0 - | - 0 - | 1,08 | 174,47 | - 0 - | - 0 - |
| 20 | 1,15 | 102,04 | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - |
| 21 | 1,25 | 108,33 | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - |
| 22 | 1,27 | 104,36 | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - |
| 23 | 1,20 | 115,48 | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - |
| 24 | 1,10 | 103,03 | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - |
| 25 | 1,21 | 110,59 | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - |
| 26 | 1,10 | 111,46 | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - |
| MEDIA | 1,19 | 109,55 | 1,13 | 118,36 | 1,01 | 162,35 | 0,98 | 164,74 |

Pode-se verificar ainda que, mesmo empregando-se a relação canal 5/canal 7 e a magnitude, o solo LR é espectralmente indistinguível do LE, o mesmo ocorrendo com os solos LV e PV. Porém, estes índices poderiam ser usados como forma de realçar a compartimentação espectral automática de solos, ainda mais se, juntamente com estes índices, forem usados dados auxiliares tais como material de origem, localização, dados topográficos etc., como fez Kaminsky (1978).

4.2 - SEPARABILIDADE ESPECTRAL DOS SOLOS

Para o sensoriamento remoto é muito importante a capacidade de diferenciar qualitativa e quantitativamente os objetos e alvos da superfície terrestre através do seu comportamento espectral.

Assim, de posse dos dados obtidos nos três diferentes níveis, estes foram analisados quantitativamente a fim de verificar até que ponto os quatro solos de interesse são espectralmente distintos.

No caso dos valores de laboratório e de campo, inicialmente foi executada uma integração das curvas em intervalos correspondentes aos canais MSS/LANDSAT. Em seguida, foi aplicada a técnica estatística de Análise Discriminante Linear (Davis, 1973).

Para os dados digitais MSS/LANDSAT, foram obtidas as distâncias JM (Jeffreys-Matusita Distance), as quais fornecem a distância estatística entre duas classes, num espaço n-dimensional (Swain and King, 1973 e Ii, 1982).

Nas Tabelas 4.5 e 4.6 constam os resultados da execução da técnica de Análise Discriminante Linear, para os valores de campo e de laboratório, respectivamente, expressos em termos de índices discriminantes, distância de Mahalanobis e valores de teste de F para verificar a significância da separabilidade.

TABELA 4.5

VALORES DA ANÁLISE DISCRIMINANTE LINEAR PARA OS DADOS ESPECTRAIS DE LABORATÓRIO

| Índices Discrim. | LR X LE | | LR X LV | | LR X PV | | LE X LV | | LE X PV | | LV X PV | |
|--------------------|------------|---------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|----------|---------------|----------|------------|----------|
| | LR | LE | LR | LV | LR | PV | LE | LV | LE | PV | LV | PV |
| 01 | 37,2414 | 33,7155 | -108,5321 | -211,9587 | -99,3385 | -140,0582 | 100,3919 | 184,9484 | 173,8707 | 246,4501 | -69,7951 | -58,3508 |
| 02 | 37,4199 | 35,5949 | -123,3550 | -219,5061 | -109,4015 | -147,2706 | 122,8683 | 190,1466 | 189,6202 | 253,1010 | -73,5118 | -61,8020 |
| 03 | 39,7464 | - 0 - | -139,5476 | -208,9640 | -119,1916 | -153,7841 | - 0 - | 184,5028 | - 0 - | 258,1437 | -66,5233 | -66,4757 |
| 04 | 35,2288 | - 0 - | -133,5405 | -215,4868 | -107,5619 | -149,7298 | - 0 - | 193,2719 | - 0 - | 269,1295 | -73,1685 | -63,4173 |
| 05 | 39,6432 | - 0 - | -124,6432 | - 0 - | -109,8343 | -144,6337 | - 0 - | - 0 - | - 0 - | 250,6626 | - 0 - | -62,1345 |
| 06 | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - | - 0 - | -141,4549 | - 0 - | - 0 - | - 0 - | 251,8577 | - 0 - | -62,3227 |
| D _(i) | 37,8560 | 34,6552 | -125,9237 | -213,9794 | -109,0656 | -146,1569 | 111,6301 | 188,2175 | 181,7455 | 254,8208 | -70,7497 | -62,4183 |
| D _c | 36,2556 | | -169,9515 | | -127,6112 | | 149,9238 | | 218,3181 | | -66,5843 | |
| D ₂ | 3,20 | | 88,06 | | 37,09 | | 76,59 | | 73,15 | | 8,33 | |
| F _{calc.} | 0,46 | | 27,95 | | 16,86 | | 6,38 | | 13,71 | | 3,12 | |
| F _{tab.} | 10% = 9,24 | | 10% = 4,11(*) | | 10% = 3,18(*) | | 10% = 3,18(*) | | 10% = 5,34(*) | | 10% = 3,52 | |
| | 5% = 9,12 | | 5% = 6,39(*) | | 5% = 4,53(*) | | 5% = 4,53(*) | | 5% = 9,12(*) | | 5% = 5,19 | |
| | 1% = 99,25 | | 1% = 15,98(*) | | 1% = 9,15(*) | | 1% = 9,15 | | 1% = 20,71 | | 1% = 11,39 | |

(*) Significativo ao respectivo nível de significância.

TABELA 4.6

VALORES DA ANÁLISE DISCRIMINANTE LINEAR PARA OS DADOS ESPECTRAIS DE CAMPO

| Solos Índices Discrim. | LR X LE | | LR X LV | | LR X PV | | LE X LV | | LE X PV | | LV X PV | |
|------------------------------|--------------------------------------|---------|---|----------|---|-----------|---|----------|---|----------|--------------------------------------|----------|
| | LR | LE | LR | LV | LR | PV | LE | LV | LE | PV | LV | PV |
| 01 | 0,0220 | -1,0731 | -24,5180 | -46,6949 | -70,5943 | -134,6435 | -27,6142 | -34,5144 | -47,1632 | -75,1983 | -18,1186 | -17,5628 |
| 02 | 1,0539 | 0,3515 | -25,3718 | -58,1881 | -73,0952 | -138,4318 | -22,1035 | -41,1838 | -49,5041 | -77,1503 | -17,3953 | -17,1893 |
| 03 | 0,2727 | 1,2282 | -25,8345 | -47,1293 | -64,6822 | -143,2028 | -17,1101 | -35,2002 | -38,6304 | -77,2663 | -17,5170 | -16,8195 |
| 04 | 1,1789 | -1,5422 | -25,5578 | -49,2881 | -84,6497 | -144,7839 | -29,1411 | -35,8243 | -59,1503 | -80,2529 | -15,2388 | -18,0432 |
| 05 | -1,4376 | -0,9801 | -36,1175 | -51,9319 | -87,1653 | -137,5157 | -27,4131 | -38,6655 | -60,9630 | -78,9354 | -14,2375 | -19,3255 |
| 06 | -0,2748 | -3,4320 | -32,6653 | -52,7789 | -83,7318 | -138,8576 | -22,5106 | -39,2034 | -43,5262 | -73,7063 | -16,2529 | -17,5318 |
| 07 | 0,5610 | -2,0559 | -30,9114 | -43,1749 | -89,1143 | -138,2593 | -20,7001 | -31,5849 | -40,5322 | -75,6575 | -12,5880 | -16,9710 |
| 08 | 1,1407 | 0,3505 | -25,8251 | -47,9029 | -77,8813 | -138,3557 | -23,4466 | -34,3268 | -44,4435 | -77,4155 | -13,4937 | -18,6693 |
| 09 | 0,1822 | -1,5915 | -34,6158 | - | -93,6215 | -138,4774 | -22,9410 | - | -43,6444 | -74,8563 | - | -17,0462 |
| 10 | -0,0287 | -2,4808 | -35,1067 | - | -94,1832 | -126,1968 | -28,6552 | - | -51,8214 | -79,0192 | - | -16,7012 |
| 11 | 1,2452 | 0,3728 | -28,2722 | - | -87,9583 | -135,5532 | -23,9947 | - | -49,3535 | -75,1079 | - | -17,8906 |
| 12 | - | - | - | - | - | -140,8996 | - | - | - | -78,2026 | - | -19,0722 |
| D(1) | 0,3558 | -1,9784 | -29,5178 | -49,6362 | -82,3970 | -137,9137 | -24,1482 | -26,3129 | -48,0120 | -76,2282 | -15,6053 | -17,7259 |
| D ₀ | -0,3113 | | -39,6270 | | -110,1554 | | -30,2305 | | -62,1201 | | -16,5651 | |
| D ₂ | 1,33 | | 20,02 | | 55,52 | | 12,16 | | 23,22 | | 2,12 | |
| F _{calc.} | 1,55 | | 19,09 | | 63,27 | | 11,60 | | 34,70 | | 2,12 | |
| F _{tab.} | 10% = 2,31 5% = 2,96 1% = 4,67 | | 10% = 2,39(*) 5% = 3,11(*) 1% = 5,04(*) | | 10% = 2,29(*) 5% = 2,93(*) 1% = 4,58(*) | | 10% = 2,39(*) 5% = 3,11(*) 1% = 5,04(*) | | 10% = 2,29(*) 5% = 2,93(*) 1% = 4,58(*) | | 10% = 2,35 5% = 3,04 1% = 4,69 | |

(*) Significativo ao respectivo nível de significância.

Nas Tabelas 4.5 e 4.6, a legenda é a seguinte:

- $D_{(i)}$ = projeção dos valores centrais das médias das classes i de solos;
- D_0 = índice discriminante entre duas classes;
- D^2 = distância de Mahalanobis;
- $F_{calc.}$ = valor calculado do teste de F;
- $F_{tab.}$ = valor tabelado do teste de F, para os níveis de 10, 5 e 1% de significância.

Nas Figuras 4.4 e 4.5 estão representadas as projeções gráficas das funções discriminantes para os dados de laboratório e de campo, respectivamente.

Embora estes gráficos estejam desenhados em escalas diferentes, pode-se constatar o seguinte:

- a) as combinações de solos LR x LE e LV x PV são as que apresentam as menores separabilidades numéricas, representadas pelas menores distâncias D^2 , tanto para os dados de laboratório como para os dados de campo. Existem pontos amostrais pertencentes ao LR, em ambas as figuras, que estão do lado pertencente ao LE, em relação ao D_0 , e vice-versa. Com os solos LV e PV ocorre o mesmo;
- b) ainda que o número de amostras seja pequeno, é possível verificar que os solos que apresentam uma baixa separabilidade (valores D^2 pequenos) também se encontram relativamente dispersos; ao passo que para os solos em que há separabilidades relativamente médias e altas (casos das combinações de solos LR x PV, LE x PV, LE x LV, LR x LV), a tendência mostrada é de que as amostras estejam bem próximas dos pontos centrais de classe (= valores D_i), havendo, então, maior certeza quanto à discriminação destes quando eles ocorrerem contíguos.

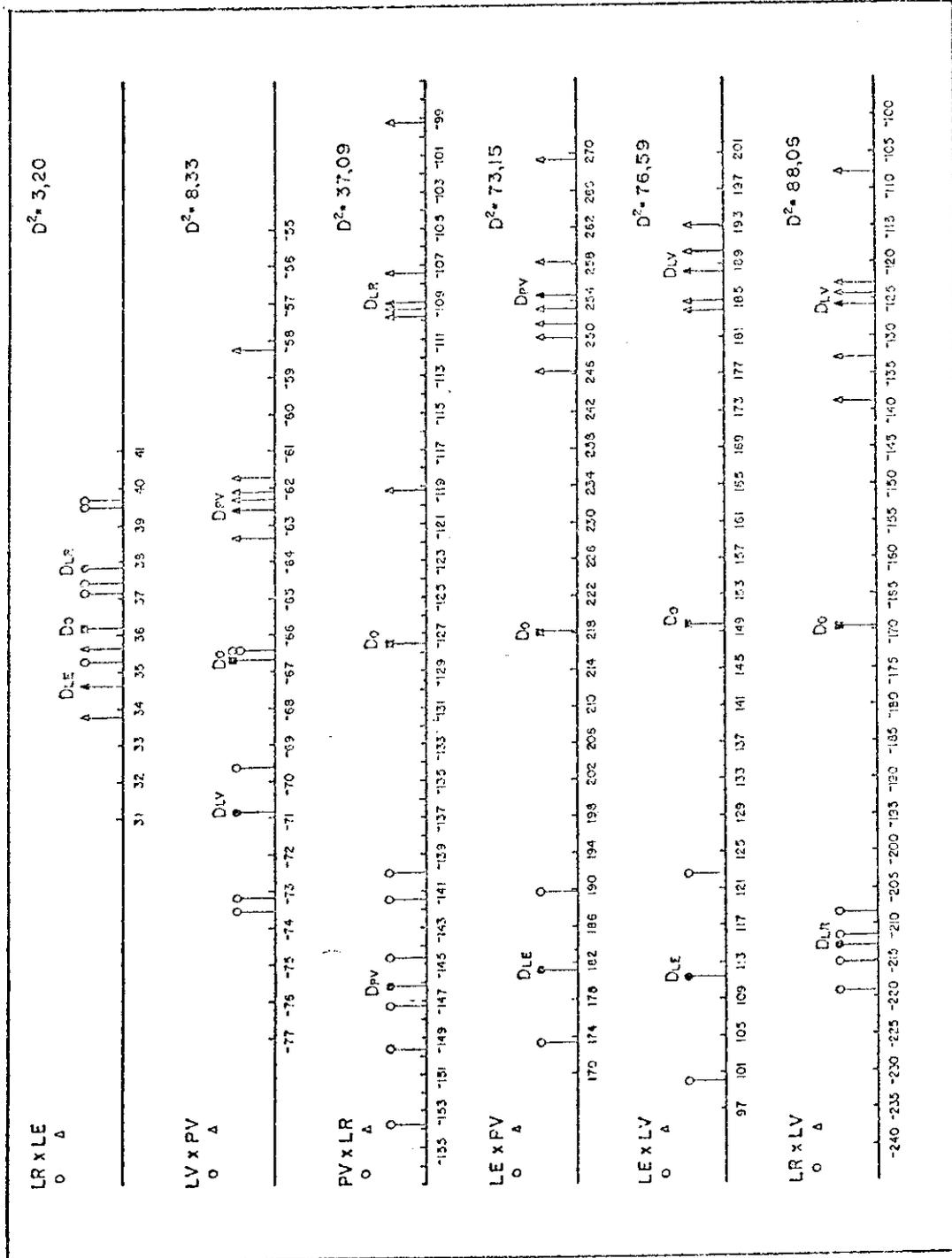


Fig. 4.4 - Projeção dos índices discriminantes sobre os eixos das funções discriminantes, para os dados de laboratório, com os quatro solos combinados dois a dois.

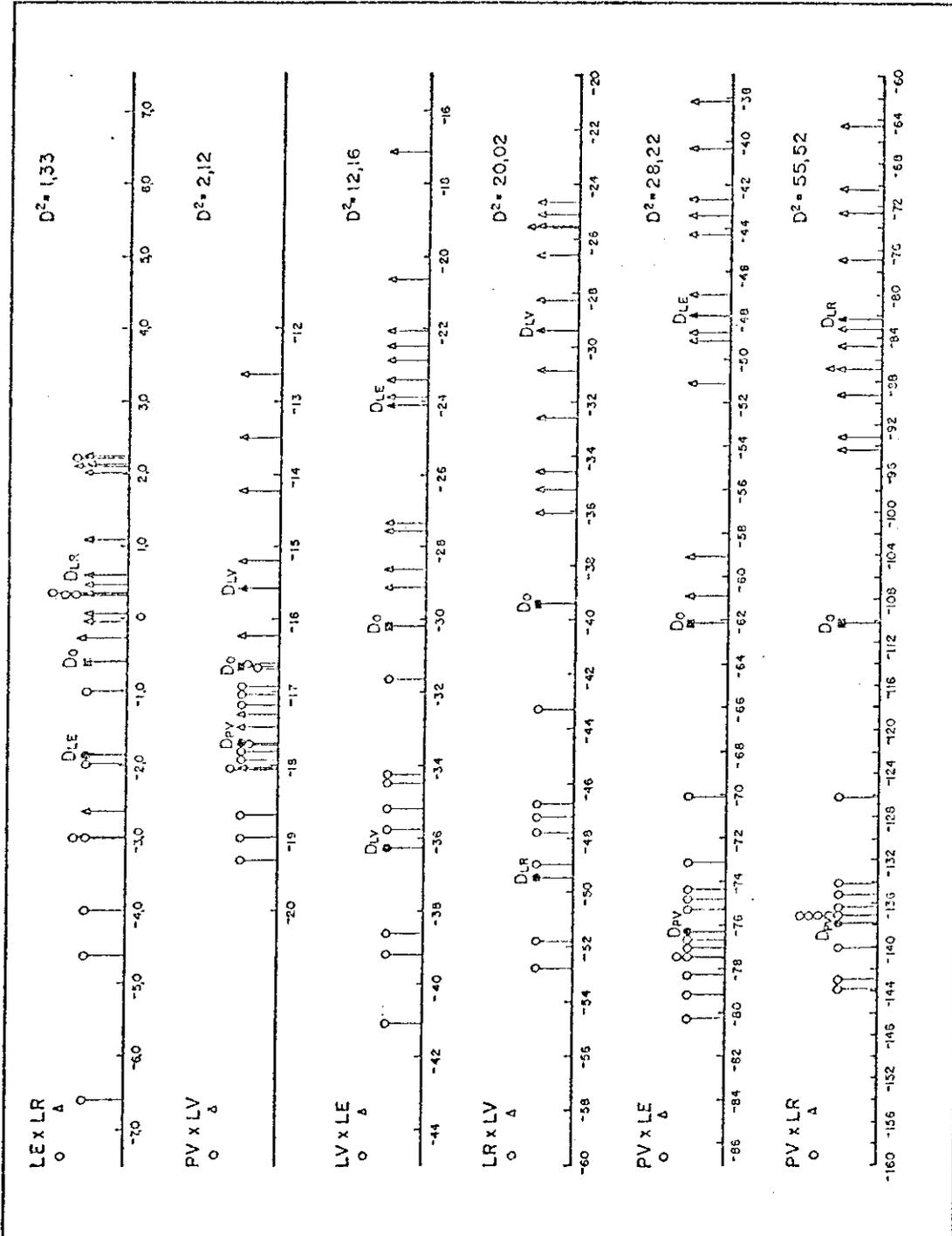


Fig. 4.5 - Projeção dos Índices discriminantes sobre os eixos das funções discriminantes, para os dados de campo, com os quatro solos combinados dois a dois.

Face ao exposto sobre a separabilidade espectral dos solos, a aplicação das técnicas de Análise Discriminante Linear foi bastante eficiente quanto à sua capacidade de mostrar quão bem duas classes de solos são espectralmente discrimináveis entre si. Isto é importante no sentido de que, para a classificação automática de padrões, através do algoritmo MAXVER (Velasco et alii, 1978), utiliza-se uma função discriminante cujo critério é a Distância de Mahalanobis (D^2), como ocorre também com a Análise Discriminante Linear.

Este fato reforça a idéia de que, com a disponibilidade de dados auxiliares, tais como: material de origem, topografia, localização etc., apresenta-se como promissora a possibilidade de obtenção de mapas espectrais automáticos de solos, através de uma metodologia especificamente desenvolvida para isso, como já fora realizado por Kaminsky (1978). Estes produtos poderiam facilitar bastante os trabalhos de levantamento de solos.

No caso dos dados digitais MSS/LANDSAT, o critério utilizado para a verificação da separabilidade dos solos foi a Distância JM, que já fora utilizado com bons resultados por Hernandez Filho e Shimabukuro (1978) e Aoki e Santos (1980). Foram obtidos os valores mostrados nas Tabelas 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10.

TABELA 4.7

VALORES DE DISTÂNCIA JM PARA A COMBINAÇÃO DOS
QUATRO CANAIS MSS/LANDSAT

| JM N.S. | LR | LE | LV | PV |
|------------|----|------|------|------|
| LR | | 0,41 | 1,84 | 1,90 |
| LE | ns | | 1,59 | 1,69 |
| LV | * | * | | 0,14 |
| PV | * | * | ns | |

* - Classes que apresentam separabilidade ao nível de probabilidade de classificação correta de 95% ($JM \geq 1,50$);

N.S. - Nível de Significância;

ns - Valor não significativo.

TABELA 4.8

VALORES MÁXIMOS DE DISTÂNCIA JM PARA COMBINAÇÕES
DE TRÊS CANAIS MSS/LANDSAT

| JM N.S. | LR | LE | LV | PV |
|------------|----------------------------------|----------------------|-----------------------|------|
| LR | | 0,40 | 1,83 | 1,89 |
| LE | (5-6-7) (4-5-7) ^{ns} | | 1,57 | 1,67 |
| LV | (4-5-7)* (4-6-7)* | (4-5-7)* (4-6-7)* | | 0,12 |
| PV | (4-5-7)* (4-6-7)* | (4-5-7)* (4-6-7)* | (4-5-7) ^{ns} | |

* - Combinação de três canais que apresenta a maior distância JM com valor significativo ao nível de 95% de probabilidade de classificação correta;

N.S. - Nível de Significância;

ns - Valor não significativo.

TABELA 4.9

VALORES MÁXIMOS DE DISTÂNCIA JM PARA COMBINAÇÕES
DE DOIS CANAIS MSS/LANDSAT

| JM N.S. | LR | LE | LV | PV |
|------------|---------|--------|---------|------|
| LR | | 0,37 | 1,82 | 1,88 |
| LE | (5-7)ns | | 1,51 | 1,64 |
| LV | (4-7)* | (4-6)* | | 0,08 |
| PV | (4-7)* | (4-7)* | (4-7)ns | |

* - Combinação de dois canais que apresenta a maior distância JM com valor significativo ao nível de 95% de probabilidade de classificação correta;

N.S. - Nível de Significância;

ns - Valor não significativo.

TABELA 4.10

VALORES MÁXIMOS DE DISTÂNCIA JM E RESPECTIVOS
CANAIS MSS/LANDSAT

| JM N.S. | LR | LE | LV | PV |
|------------|-------|-------|-------|------|
| LR | | 0,29 | 1,72 | 1,74 |
| LE | (7)ns | | 1,32 | 1,54 |
| LV | (7)* | (4)ns | | 0,33 |
| PV | (4)* | (4)* | (4)ns | |

* - Canal que apresenta maior distância JM, com valor significativo ao nível de 95% de probabilidade de classificação correta;

N.S. - Nível de Significância;

ns - Valor não significativo.

Analisando os resultados apresentados nestas tabelas, quanto aos canais ou combinações de canais que melhor expressam a separabilidade entre as classes de solos em nível de desempenho superior a 95%, as classes LR x LE e LV x PV não mostraram valores significativos de Distância JM em nenhum caso, confirmando o que já fora encontrado nos níveis de laboratório e de campo.

Os maiores valores de Distância JM foram obtidos para a utilização conjunta dos quatro canais MSS/LANDSAT, para a qual, com exceção das classes LR x LE e LV x PV, em todos os outros casos a certeza de classificação automática correta seria acima de 95%.

4.3 - INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS

Os espectros que serviram para o cálculo das médias apresentadas nas Figuras 4.1 e 4.2 estão incluídos no Apêndice B. São fornecidas também as seguintes informações para os dados de campo:

- cores úmida e seca (designação de Munsell);
- condições superficiais no momento da obtenção das medidas espectrais;
- porcentagem de umidade da camada superficial.

No Apêndice B, em cada gráfico (dados de campo) são indicados também os fatores que presumivelmente foram introdutórios de modificações das curvas espectrais em relação à média.

Analisando estes espectros, de modo geral e com os dados disponíveis, pode-se dizer que a reflectância dos solos, obtida em condições de campo, é influenciada principalmente pelos fatores: cor, condições superficiais e conteúdo de umidade. Estas observações concordam com aquelas feitas anteriormente por Crown e Pawluk (1974) e por Stoner e Horvath (1978). Os três fatores acima citados são considerados como fatores físicos; porém, sabe-se que as características químicas dos solos também desempenham papel muito importante, embora não tenha sido feito este tipo de correlação para os dados de campo.

Ainda que não tenha sido possível analisar em separado a contribuição específica de cada um dos citados fatores para os espectros de reflectância obtidos em condições de campo, há neles influência conjunta e simultânea. O que pode ocorrer é que, em alguns casos, um fator sobrepuje quantitativamente o outro; conseqüentemente aparecendo com maior peso no balanço final do espectro refletido e captado ou medido.

No presente caso, pode-se verificar, conforme os exemplos mostrados no Apêndice B, que a umidade só começa a ser importante, para as medidas em condições de campo, se ela estiver presente em porcentagens relativamente elevadas, em geral acima de 15%. Ainda assim, é necessário que esta umidade tenha incidido no solo pouco tempo antes da medição espectral radiométrica. Caso contrário, um solo arenoso com menor capacidade de retenção de água, secará mais rapidamente; enquanto um solo argiloso, com maior capacidade de retenção de água, permanecerá úmido por mais tempo. Além disso, conforme observaram Hoffer e Johannsen (1972), desde que o solo tende a secar na superfície, formando uma crosta muito fina, medidas de reflectância podem indicar que um solo é seco, ainda que esteja bem úmido alguns centímetros abaixo da superfície. Neste sentido, Crown e Pawluk (1974) sugerem a realização de medidas simultâneas de comprimentos de onda emissivos juntamente com dados de reflectância, afirmando que estes procedimentos propiciariam melhor discriminação dentro dos grupos de solos.

Quanto às condições superficiais, na área de estudo foram encontradas e consideradas principalmente as seguintes: solos gradeados há mais de cinco dias antes da realização das medidas, com a superfície bastante uniforme, tendo-se formado uma fina crosta superficial; solos gradeados momentos antes da realização das medidas, com a superfície uniforme; solos gradeados e deixados em pousio; solos com soca de cana em rebrota, tendo sido efetuada subsolagem nas entrelinhas; solos arados com terrões grandes na superfície; solos com restos de cultura (palhaça, principalmente) na superfície.

Considerando os gráficos de campo do Apêndice B, verifica-se que, à medida que aumenta a desuniformidade das condições superficiais, isto é, à proporção que os agregados e torrões forem maiores, menor será a reflectância. Tendo em mente a geometria de tomada de medidas utilizada, isto é, num azimute de 180° (Figura 3.3), pode-se afirmar que com torrões grandes havia uma área sombreada maior dentro do elemento de resolução definido pela parte óptica do radiômetro na superfície do terreno, provocando assim uma diminuição da reflectância.

À medida que os solos tinham sido gradeados há mais tempo, houve formação de um leve encrostamento superficial, que tornou mais claro o solo. Este fator provocou, em geral, um aumento na reflectância. Provavelmente isto poderia ser atribuído ao fato de que este encrostamento é mais seco e formado por partículas mais finas, tornando-se mais reflexivo. Este fato já fora constatado por Cipra et alii (1971), os quais afirmaram que os solos revolvidos, ou seja, nos quais as crostas foram desfeitas artificialmente, apresentavam uma diminuição na reflectância em relação às condições anteriores. Presumivelmente a maior rugosidade superficial dos solos com crostas quebradas deve ter causado algum espalhamento da luz e teve um efeito de sombreamento. Cada um destes fatores, ou ambos, poderia ter causado menor reflectância para os solos com as crostas desfeitas.

Nos casos em que havia algum tipo de vegetação como, por exemplo, rebrota de cana ou ervas daninhas nos solos em pousio, a resposta captada pelo radiômetro mostra claramente uma mistura de padrões espectrais característicos de solo e de vegetação, como é mostrado pelo gráfico P. 59, página B.12 do Apêndice B, o que está de acordo com as afirmações de Stoner e Horvath (1978).

Em relação às constatações de Crown e Pawluk (1974) de que o parâmetro cor influencia mais a reflectância dos solos no visível, e de que os parâmetros conteúdo de umidade e rugosidade superficial atuam mais na região do infravermelho do espectro, estas também foram verificadas, em certa medida, no presente estudo, conforme mostram os exemplos do Apêndice B. Porém, são necessários mais dados e pesquisas mais detalhadas para conclusões mais fundamentadas.

4.4 - CORRELAÇÕES ENTRE OS DADOS ESPECTRAIS DE CAMPO E DE LABORATÓRIO

Para os pontos em que se dispunha de dados espectrais de campo em conjunto com os de laboratório, foi executada uma correlação linear simples a fim de conhecer quão ajustados entre si eram estes dados.

Para tanto, foram utilizados os valores resultantes das integrações das curvas espectrais, de campo e de laboratório, nos intervalos correspondentes aos canais MSS/LANDSAT, cuja forma de obtenção foi explicada na seção 3.14.

Os valores dos coeficientes de correlação (r^2) entre os dados de campo e os de laboratório são apresentados na Tabela 4.11.

TABELA 4.11

VALORES DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO LINEAR SIMPLES (r^2) ENTRE OS DADOS DE CAMPO (CCH) E OS DADOS DE LABORATÓRIO (LCH)

| CANAIS SIMULADOS | r^2 |
|------------------|--------|
| LCH4 x CCH4 | 0,9036 |
| LCH5 x CCH5 | 0,8747 |
| LCH6 x CCH6 | 0,8813 |
| LCH7 x CCH7 | 0,6876 |

Estes coeficientes de correlação podem ser considerados bastante satisfatórios, indicando que existe um alto grau de ajuste e de relacionamento entre os dados de campo e de laboratório.

Isto acontece mesmo considerando que as condições de obtenção de um e de outro tipo de dados foram bastante diferentes tanto com relação aos instrumentos sensores, quanto às fontes de energia eletromagnética e às condições dos solos-alvos. Ainda assim, verificam-se valores relativamente altos de r^2 para os canais simulados 4, 5 e 6. Somente pa

ra o canal 7 este valor cai significativamente. Como possíveis causas para esta baixa correlação entre os canais simulados LCH7 e CCH7 podem ser apontadas: a reflexão especular nos comprimentos de onda do infravermelho próximo para os dados de campo, o que já foi anteriormente discutido; ou ainda, o fato de que os dados de campo foram obtidos entre 800 e 1050 nm, ao passo que os de laboratório foram entre 800 e 1100 nm, havendo portanto uma diferença de amplitude das respectivas faixas espectrais.

A importância dos altos correlacionamentos entre dados de campo e dados de laboratório reside no seguinte fato: no caso de se vir a utilizar efetivamente as técnicas espectrorradiométricas para a caracterização mais precisa e quantitativa das propriedades dos solos, como é proposto por Costa (1979), estas medidas poderiam ser realizadas tanto numa quanto em outra condição, de acordo com as possibilidades e disponibilidades técnicas e instrumentais existentes.

Além disso, conforme comentam Stoner et alii (1979), a habilidade de estender espectros de solos medidos em laboratório para as condições de campo tem importantes implicações no emprego das técnicas de sensoriamento remoto para os levantamentos de solos, em estudos de degradação dos solos e em inventários agrícolas. Ao se levar amostras de solos para dentro de um ambiente controlado de laboratório, é possível estudar as propriedades espectrais de um grande número de solos, provenientes de diversas regiões climáticas e geográficas, sem ser necessário transportar um espectrorradiômetro para locais de campo esparsos.

Por fim, considerando tudo o que foi discutido até aqui, pode-se afirmar que as técnicas de espectrometria para estudos e caracterização dos solos são de grande importância, embora ainda pouco conhecidas no Brasil. Estas técnicas apresentam-se altamente promissoras, mediante um maior número de pesquisas e trabalhos visando aumentar conhecimentos, bem como aprimorar metodologias nesta área.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 - CONCLUSÕES

Em função dos materiais e métodos empregados, dos dados obtidos, analisados e discutidos, foi possível chegar às conclusões indicadas a seguir.

Os quatro solos estudados apresentam dois tipos de curvas espectrais, no intervalo de comprimentos de onda de 400 a 1100 nm; sendo o primeiro tipo representado pelos solos LR e LE e o segundo pelos solos LV e PV.

Os três níveis utilizados de coleta de dados espectrais de solos (laboratório, campo e satélite) ratificaram-se uns aos outros, guardando as curvas dos quatro solos um comportamento relativo que praticamente repetiu-se para os três casos.

Dentre os parâmetros influenciadores da reflectância dos solos estudados, destacaram-se o conteúdo de ferro, o conteúdo de matéria orgânica, a cor, a umidade e as condições superficiais, tendo sido estes três últimos os mais importantes para as condições de campo.

Os solos LR e LE são espectralmente separáveis dos solos LV e PV, nos três níveis de coleta de dados utilizados; porém o LR não é separável do LE, assim como o LV não o é do PV, no intervalo considerado.

Os índices relação canal 5/canal 7 e magnitude de reflectância espectral relativa, para os dados digitais MSS/LANDSAT, mostraram-se altamente favoráveis para o realçamento da discriminação espectral automática dos solos.

As técnicas de Análise Discriminante Linear e de Distância JM foram bastante eficientes para quantificar a separabilidade entre as classes espectrais de solos.

A utilização das técnicas espectrorradiométricas para auxiliar nos trabalhos de levantamentos de solos com dados quantitativos, mais precisos e menos subjetivos, em relação aos atuais métodos de obtenção das cores de solos, mostra-se altamente promissora.

5.2 - RECOMENDAÇÕES

Com a experiência adquirida através da realização do presente trabalho, sugere-se a continuação deste tipo de estudos, considerando algumas recomendações indicadas a seguir:

- 1) estender os estudos espectrais para outros solos, além dos aqui considerados;
- 2) realizar medições de espectro contínuo com a finalidade de detectar e estudar importantes bandas de absorção, como as atribuídas aos óxidos de ferro, por exemplo, que desempenham importante papel em relação aos solos tropicais, altamente intemperizados;
- 3) realizar estudos quanto à repetitividade de obtenção das assinaturas espectrais dos solos em condições controladas de laboratório, visando a aquisição de metodologias para tornar as técnicas multiespectrais como valiosas ferramentas para a caracterização, o delineamento e a quantificação de diferenças entre os solos brasileiros;
- 4) realizar medições espectrorradiométricas até comprimentos de onda maiores que os aqui utilizados, por exemplo, 2500 nm, pois é na faixa do infravermelho próximo que parece haver maiores diferenças entre os solos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-ABBAS, A.H.; SWAIN, P.H.; BAUMGARDNER, M.F. Relating organic matter and clay content to multispectral radiance of soils. *Soil Science*, 114(6):477-485, 1972.
- ALMEIDA, F.F.M. Fundamentos geológicos do relevo paulista. In: INSTITUTO GEOGRÁFICO E GEOLÓGICO. *Geologia do Estado de São Paulo*. São Paulo, 1974. p. 169-262. (Boletim 141).
- AMARAL, G. *Sensores remotos - aplicações em geociências*. São Paulo, Instituto de Geociências. USP, 1975. 114 p.
- AOKI, H.; SANTOS, J.R. *Estudo da vegetação de cerrado na área do Distrito Federal, a partir de dados orbitais*. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto. São José dos Campos, INPE, maio 1980. (INPE-1730-TDL/026).
- BANDONES, R. *Estudo da determinação de bandas para análise de anomalia geobotânica*. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2., Brasília-DF, maio, 10 a 14, 1982.
- BAUER, M.E. The role of remote sensing in determining the distribution and yield of crops. *Advances in Agronomy*, 27:271-304, 1975.
- BAUMGARDNER, M.F.; KRISTOF, S.J.; JOHANNSEN, C.J.; ZACHARY, A.L. Effects of organic matter on the multispectral properties of soils. *Proceedings of Indiana Academy of Science*, 79:413-422, 1970.
- BECK, R.H.; ROBINSON, B.F.; MCFEE, W.H.; PETERSON, J.B. *Spectral characteristics of soils related to the interaction of soil moisture, organic carbon and clay content*. West Lafayette, IN, Purdue University, LARS, 1976. (LARS Information Note 081176).
- BOWERS, S.A.; HANKS, R.J. Reflectance of radiant energy from soils. *Soil Science*, 100(2):130-138, 1965.
- BURROUGHS. *Advanced statistical inquiry system (BASIS); User's Manual*. Detroit, MI, 1975.

- CATANI, R.A.; PAIVA NETO, J.E. Dosagem de potássio e sódio pelo fotômetro de chama, sua aplicação em análise de solo. *Bragantia*, 9: 175-183, 1949.
- CIPRA, J.E.; BAUMGARDNER, M.F.; STONER, E.R.; MACDONALD, R.B. Measuring radiance characteristics of soil with a field spectroradiometer. *Soil Science Society of America Proceedings*, 35:1014-1017, 1971.
- CIPRA, J.E.; SWAIN, P.H.; GILL, J.H.; BAUMGARDNER, M.F.; KRISTOF, S.J. *Definition of spectrally separable classes for soil survey research*. West Lafayette, IN, Purdue University, LARS, 1972. (LARS Technical Report 100372).
- COLWELL, R.N. Uses and limitations of multispectral remote sensing. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 4., Ann Arbor, MI, 1966. *Proceedings*, Ann Arbor, MI, University of Michigan, 1966, v. 1, p. 71-100.
- COMISSÃO DE SOLOS DO C.N.E.P.A. *Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo*. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas, 1960a, 634 p.
- *Carta de solos do Estado de São Paulo*. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas, 1960b.
- CONDIT, H.R. The spectral reflectance of American soils. *Photogrammetric Engineering*, 36:955-966, 1970.
- CONEL, J.E.; ABRAMS, M.J.; GOETZ, A.F.H. *A study of alteration associated with uranium occurrences in sandstone and its detection by remote sensing methods*. Pasadena, CA. Jet Propulsion Laboratory, 1978, v. 1. (JPL Publication 78-66).
- COSTA, L.M. *Surface soil color and reflectance as related to physicochemical and mineralogical soil properties*. Ph.D. Thesis. University of Missouri, Columbia, Sept. 1979. 154 p.
- CROWN, P.H.; PAWLUK, S. Spectral signatures from selected soils in the Edmonton-Vegreville area. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 2., Ottawa, ON, 1974. *Proceedings*, Ottawa, University of Guelph, 1974, v. 1, p. 450-462.

- DAVIS, J.C. *Statistics and data analysis in geology*. New York, John Wiley & Sons, 1973.
- EGBERT, D.D.; ULABY, F.T. Effect of angles on reflectivity. *Photogrammetric Engineering*, 38(6):556-564, jun. 1972.
- EMORI, Y.; YASUDA, Y.; FUKUHARA, M.; HIRATA, K. Trial production of a portable spectroradiometer. *Proceedings of Japan Society of Photogrammetry*, sv(sf):19-22, 1972.
- FORSYTHE, G.E.; MALCOLM, M.A.; MOLER, C.B. *Computer methods for mathematical computations*. New Jersey, Prentice-Hall, 1977.
- GENERAL ELECTRIC COMPANY. *Image-100 - interactive multispectral image analysis system*. User Manual, Daytona, 1975.
- GROHMANN, F.; VAN RAIJ, B. Influência do método de agitação na dispersão de argila do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 14., Santa Maria, RS, 1974, p. 123-132.
- HERNANDEZ FILHO, P.; SHIMABUKURO, Y.E. *Estabelecimento de metodologia para avaliação de povoamentos florestais artificiais, utilizando-se dados do LANDSAT*. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações. São José dos Campos, INPE, 1978. (INPE-1271-IPT/089).
- HINZEL, E.J.; WEISMILLER, R.A.; FRANZMEIER, D.P. *Correlation of spectral classes derived from LANDSAT MSS data to soil series and soil conditions for Jasper County, Indiana*. West Lafayette, IN, Purdue University, LARS, 1980. 130 p. (LARS Technical Report 080979).
- HOFFER, R.M. *Interpretation of remote multispectral imagery of agricultural crops*. West Lafayette, IN, Purdue University. Agricultural Experiment Station Research Bulletin 831, p. 18-30, 1967.
- HOFFER, R.M. *Automatic data processing of multispectral scanner data, for land use mapping*. West Lafayette, IN, Purdue University, 1972. 25 p.
- HOFFER, R.M.; ANUTA, P.E.; PHILLIPS, T.L. Automatic data processing, multiband and multiemulsion digitalized photos. *Photogrammetric Engineering*, 38(10):989-1001, 1972.

- HOFFER, R.M.; JOHANNSEN, C.J. Ecological potentials in spectral signature analysis. In: PURDUE UNIVERSITY, LARS. *Remote sensing technology and applications*. Lafayette, IN, 1972. p. 1-26 (LARS Print 011069-R).
- HUNT, G.R. Eletromagnetic radiation: the communication link in remote sensing. In: SIEGAL, B.S.; GILLESPIE, A.R. *Remote sensing in geology*. New York, John Wiley & Sons, 1980, p. 5-45.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Carta do Brasil. Folha SF-23-Y-II-1 (Leme-SP), Escala de 1:50.000*. Rio de Janeiro, 1975a.
- *Carta do Brasil. Folha SF-23-Y-A-II-2 (Rio Capetinga-SP), Escala de 1:50.000*. Rio de Janeiro, 1975b.
- *Carta do Brasil. Folha SF-23-Y-A-II-4 (Conchas-SP), Escala de 1:50.000*. Rio de Janeiro, 1975c.
- *Carta do Brasil. Folha SF-23-M-A-II-3 (Araras-SP), Escala de 1:50.000*. Rio de Janeiro, 1975d.
- Ii, F.A.M. *Seleção de atributos aplicada a imagens multiespectrais*. São José dos Campos, INPE, 1982. (INPE-2303-TDL/072).
- KAMINSKY, S.A. *An investigation of analyses techniques of LANDSAT MSS data designed to aid the soil survey*. M.S. Thesis, West Lafayette, Purdue University, IN, 1978.
- KARMANOV, I.I.; BOZHKOVA, V.A. Experimental determination of quantitative relationships between color characteristics of soils and soil constituents. *Soviet Soil Science*, 4:666-677, 1972.
- KIRSCHNER, F.R.; KAMINSKY, S.A.; WEISMILLER, R.A.; SINCLAIR, H.R.; HINZEL, E.J. Map unit composition assessment using drainage classes defined by LANDSAT data. *Soil Science Society of America Journal*, 42:768-771, 1978.
- KOFFLER, N.F. *Identificação da cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) através de fotografias aéreas infravermelhas coloridas e dos multiespectrais do satélite LANDSAT*. Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas. Piracicaba, ESALQ/USP, 1982.

- KRISTOF, S.J. Preliminary multispectral studies of soils. *Journal of Soil and Water Conservation*, 26(1):15-18, 1971.
- KRISTOF, S.J.; ZACHARY, A.L. Mapping soil features from multispectral scanner data. *Photogrammetric Engineering*, 40(12):1427-1434, 1971.
- LANDGREBE, D.A. Machine processing of remotely acquired data. In: *Remote sensing of environment*. Reading, MA, Addison-Wesley, 1976, p. 349-373.
- LANDGREBE, D.A.; BAUER, M.E.; SILVA, L.F.; HOFFER, R.M.; BAUMGARDNER, M.F. *Agricultural Scene Understanding*. West Lafayette, IN, Purdue University, LARS. 1977. (LARS Contract Report 112677).
- LEE, K.; HULSTROM, R.L.; OLSON JR., C.E.; QUADE, J.G.; REEVES, R.G. Ground investigations in support of remote sensing. In: AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. *Manual of remote sensing*. Falls Church, VA, 1975, v. 1, p. 805-868.
- LOWE, D.S.; KELLY, B.O.; MACDEVITT, H.I.; ORR, G.T.; YATES, H.W. Imaging and non-imaging sensors. In: AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. *Manual of remote sensing*. Falls Church, VA, 1975, v. 1, p. 367-397.
- MATHEWS, H.L.; CUNNINGHAM, R.L.; CIPRA, J.E.; WEST, T.R. Application of multispectral remote sensing to soil survey in Southeastern Pennsylvania. *Soil Science Society of America Proceedings*, 37(1): 88-93, Jan./Feb. 1973.
- MATTOS, J.T.; VITORELLO, I. *Aplicação de funções discriminantes na distinção de assinaturas espectrais de calcários e quartzitos em imagens MSS/LANDSAT*. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2., Brasília-DF, Maio, 10 a 14, 1982.
- MEDINA, H.P.; GROHMANN, F. Contribuição ao estudo da análise granulométrica do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 6., Salvador, BA, 1957. *Anais*. Rio de Janeiro, 1962. p. 29-38.
- MELLO, F.A.F.; BRASIL SOBRINHO, M.O.C.; ARZOLLA, S.; COBRA NETTO, A.; SILVEIRA, R.I. *Fertilidade, fertilizantes e fertilização do solo*; apostila da disciplina "Fertilidade do Solo", curso de Agronomia da ESALQ/USP. Piracicaba, s.d., 274 p. mimeografado.

- MONTGOMERY, O.L. *The effects of the physical and chemical properties of soil on the spectral reflectance of soils*. M.S. Thesis. West Lafayette, IN, Purdue University, LARS, 1974.
- MUNSELL, A.H. *A color notation*. 10. ed. Baltimore, Munsell Color Company, 1947.
- MYERS, V.I.; ALLEN, W.A. Electrooptical remote sensing methods as non-destructive testing and measuring techniques in agriculture. *Applied Optics*, 7(9):1819-1838, 1968.
- NASA. *Data users handbook - ERTS*. Greenbelt, MD, Goddard Space Flight Center, 1972.
- OBUKHOV, A.E.; ORLOV, O.S. Spectral reflectivity of the Major Soil Groups and possibility of using diffuse reflections in soil investigation. *Soviet Soil Science*, 1:174-184, 1964.
- OLIVEIRA, J.B.; MENK, J.R.F.; BARBIERI, J.L.; ROTTA, E.L.; TREMOCOLDI, W. *Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo*. Campinas, EMBRAPA/SECRETARIA DA AGRICULTURA E ABASTECIMENTO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1981. Folha SF-23-Y-A-II, Quadrícula de Araras, Escala de 1:100.000.
- OLIVEIRA, J.B.; MENK, J.R.F.; BARBIERI, J.L.; ROTTA, C.L.; TREMOCOLDI, W. *Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo*. Quadrícula de Araras. *Boletim Técnico do Instituto Agronômico de Campinas*, nº 71, 1982, 180 p.
- RIBEIRO, E.A.; Ii, F.A.M.; MOREIRA, J.C.; DUTRA, L.V. *Manual de usuário dos sistemas de tratamento de imagens digitais*. São José dos Campos, INPE, 1982. 158 p.
- SÃO PAULO. Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo - escala 1:500.000*. São Paulo, v. 1, 1981.
- SETZER, J. *Atlas climático e ecológico do Estado de São Paulo*. São Paulo, Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguaí, 1966, 61 p.
- SLAVIN, W. *Atomic absorption spectroscopy*. New York, Interscience, 1968. 307 p.

- STONER, E.R.; BAUMGARDNER, M.F. *Physicochemical, site, and bidirectional reflectance factor characteristics of uniformly moist soils*. West Lafayette, IN, Purdue University, LARS (Technical Report 111679), 94 p., 1980.
- STONER, E.R.; BAUMGARDNER, M.F.; WEISMILLER, R.A.; BIEHL, L.L.; ROBINSON, B.F. Extension of laboratory-measured soil spectra to field conditions. In: MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA, West Lafayette, IN, 1969. *Proceedings*. p. 253-262.
- STONER, E.R.; BAUMGARDNER, M.F.; BIEHL, L.L.; ROBINSON, B.F. *Atlas of soil reflectance properties*. West Lafayette, IN, Purdue University, May, 1980.
- STONER, E.R.; HORVATH, E.H. *The effect of cultural practices on multispectral response from surface soil*. West Lafayette, IN, Purdue University, LARS, 1978. (LARS Technical Report 022278).
- SWAIN, P.H.; KING, R.C. *Two effective feature selection criteria for multispectral remote sensing*. West Lafayette, IN, Purdue University, LARS, 1973. (LARS Information Note 042573).
- TARANIK, J.F. *Principles of computer processing of LANDSAT data for geologic applications*. Washington, DC, Geological Survey, 1978. 50 p. (Open-File Report 78-117).
- VELASCO, F.R.D.; PRADO, L.O.C.; SOUZA, R.C.M. *Sistema MAXVER; Manual do usuário*. São José dos Campos, 1978. (INPE-NTI/110).
- VETTORI, L. Método de análise do solo. Rio de Janeiro, Equipe de Pedogologia e Fertilidade do Solo, *Boletim Técnico nº 7*, 24 p., 1969.
- WEISMILLER, R.A.; PERSINGER, I.D.; MONTGOMERY, O.L. Soil inventory from digital analysis of satellite scanner and topographic data. *Soil Science Society of America Journal*, 41:1166-1170, 1977.
- WHITMORE, G.D.; THOMPSON, M.M. Introduction to photogrammetry. In: AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. *Manual of Photogrammetry*. Falls Church, VA, v. 1, p. 1-16, 1966.

APENDICE A

DADOS DAS ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS DE 17 AMOSTRAS DE SOLOS UTILIZADAS
PARA A ESPECTROMETRIA DE LABORATÓRIO

| Amostras Solos | MAT.ORG. (%) | CTC (emg/100g) | Fe ₂ O ₃ (%) | COR (1) | | GRANULOMETRIA(%) | | | |
|-------------------|-----------------|-------------------|---------------------------------------|----------|----------|------------------|-------|--------|---------|
| | | | | SECA | ÚMIDA | ARGILA | SILTE | A.FIN. | A.GROS. |
| P.05/LR | 3,75 | 12,3 | 18,1 | 2,5YR3/6 | 2,5YR3/4 | 66,0 | 16,0 | 11,0 | 7,0 |
| P.06/LR | 2,94 | 11,3 | 20,7 | 2,5YR4/6 | 2,5YR3/4 | 69,0 | 14,0 | 10,0 | 7,0 |
| P.19/LR | 2,60 | 9,2 | 23,3 | 2,5YR3/6 | 2,5YR3/4 | 59,0 | 15,0 | 15,0 | 11,0 |
| P.50/LR | 2,73 | 10,4 | 19,9 | 2,5YR4/6 | 2,5YR3/4 | 57,0 | 19,0 | 16,0 | 8,0 |
| P.51/LR | 3,58 | 10,8 | 16,1 | 2,5YR4/6 | 2,5YR3/3 | 61,0 | 19,0 | 13,0 | 7,0 |
| P.18/LE | 1,99 | 7,1 | 10,5 | 2,5YR3/6 | 2,5YR3/4 | 46,0 | 8,0 | 31,0 | 15,0 |
| P.93/LE | 2,36 | 6,5 | 8,5 | 2,5YR3/6 | 2,5YR3/4 | 41,0 | 8,0 | 32,0 | 19,0 |
| P.16/LV | 1,29 | 3,6 | 2,6 | 7,5YR4/4 | 7,5YR3/2 | 19,0 | 4,0 | 52,0 | 25,0 |
| P.23/LV | 1,29 | 6,0 | 3,3 | 10YR4/3 | 10YR3/2 | 29,0 | 3,0 | 24,0 | 44,0 |
| P.40/LV | 2,03 | 6,7 | 3,3 | 5YR4/8 | 5YR3/3 | 27,0 | 16,0 | 39,0 | 18,0 |
| P.43/LV | 1,86 | 5,1 | 3,9 | 5YR4/6 | 5YR4/4 | 39,0 | 6,0 | 30,0 | 25,0 |
| P.26/PV | 1,51 | 4,5 | 3,3 | 7,5YR5/6 | 7,5YR3/2 | 31,0 | 4,0 | 26,0 | 39,0 |
| P.53/PV | 3,82 | 11,1 | 7,9 | 5YR4/5 | 5YR3/3 | 59,0 | 32,0 | 6,0 | 3,0 |
| P.55/PV | 2,25 | 10,7 | 6,8 | 5YR5/6 | 5YR4/4 | 59,0 | 33,0 | 6,0 | 2,0 |
| P.61/PV | 2,49 | 9,7 | 7,9 | 5YR6/6 | 5YR4/3 | 51,0 | 27,0 | 12,0 | 10,0 |
| P.64/PV | 2,91 | 8,6 | 6,3 | 7,5YR5/4 | 7,5YR4/4 | 52,0 | 32,0 | 8,0 | 8,0 |
| P.67/PV | 2,60 | 7,9 | 6,9 | 2,5YR5/8 | 2,5YR3/4 | 74,0 | 20,0 | 4,0 | 2,0 |

APÊNDICE B

CURVAS ESPECTRAIS DOS QUATRO SOLOS OBTIDAS EM CONDIÇÕES DE CAMPO E EM CONDIÇÕES DE LABORATÓRIO

Neste Apêndice B são apresentadas, em primeiro lugar, as curvas espectrais obtidas em condições de campo. Para cada curva são fornecidas as seguintes informações:

- condições superficiais dos solos, no momento da execução das medidas espectrais;
- umidade em porcentagem;
- cores do solo seco e do solo úmido, respectivamente.

Quando um destes parâmetros acima era suposto influenciar de forma significativa a respectiva curva em relação à média do solo correspondente, este foi sublinhado.

Em seguida, da página B.23 para frente, são apresentadas as curvas obtidas em condições de laboratório.

