

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Solos  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

# **Manual de Métodos de Análise de Solo**

**3ª edição revista e ampliada**

*Paulo César Teixeira  
Guilherme Kangussu Donagemma  
Ademir Fontana  
Wenceslau Geraldes Teixeira*  
Editores Técnicos

**Embrapa**  
Brasília, DF  
2017

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

### **Embrapa Solos**

Endereço: Rua Jardim Botânico, 1024. Jardim Botânico

CEP: 22460-000 - Rio de Janeiro, RJ

Fone: + 55 (21) 2179-4500

Fax: + 55 (21) 2179-5291

<https://www.embrapa.br>

<https://www.embrapa.br/fale-conosco/sac/>

### **Unidade responsável pelo conteúdo e edição**

Embrapa Solos

### **Comitê de Publicações da Embrapa Solos**

Presidente: *José Carlos Polidoro*

Secretária-Executiva: *Jacqueline Silva Rezende Mattos*

Membros: *Ademar Barros da Silva, Adriana Vieira de C. de Moraes, Alba Leonor da Silva Martins, Enyomara Lourenço Silva, Evaldo de Paiva Lima, Joyce Maria Guimarães Monteiro, Luciana Sampaio de Araujo, Maria Regina Laforet, Maurício Rizzato Coelho, Moema de Almeida Batista, Wenceslau Geraldes Teixeira*

Supervisão editorial: *Jacqueline Silva Rezende Mattos*

Normalização bibliográfica: *Luciana Sampaio de Araujo*

Editoração eletrônica: *Jacqueline Silva Rezende Mattos*

Capa: *Eduardo Guedes de Godoy*

Revisão de texto: *André Luiz da Silva Lopes e  
Marcos Antônio Nakayama*

### **3ª edição**

Publicação digitalizada (2017)

### **Todos os direitos reservados.**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Embrapa Solos

---

Manual de métodos de análise de solo / Paulo César Teixeira ... [et al.], editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2017.

574 p. : il. color.

ISBN 978-85-7035-771-7

1. Análise do solo. 2. Física do solo. 3. Química do solo. 4. Matéria orgânica. 5. Mineralogia. I. Teixeira, Paulo César. II. Donagemma, Guilherme Kangussu. III. Fontana, Ademir. IV. Teixeira, Wenceslau Geraldes. V. Embrapa Solos.

CDD 631.40202

# — Capítulo 1 —

## MICROMORFOLOGIA DO SOLO

Miguel Cooper

Selma Simões de Castro

Maurício Rizzato Coelho

### 1.1 Introdução

A micromorfologia do solo é o ramo da ciência do solo e da terra que descreve, mede e interpreta os componentes, as feições e as fábricas dos solos, dos saprolitos, dos sedimentos e dos artefatos pré-históricos/históricos na escala microscópica e submicroscópica (Bullock et al., 1985; Stoops, 2003). Contempla uma coleção de conceitos apoiados em ferramentas e técnicas que são utilizadas para obter informações específicas sobre os solos e que não podem ser obtidas diretamente por meio de outros métodos analíticos (Vepraskas; Wilson, 2008).

A micromorfologia do solo não deve ser considerada uma disciplina isolada e, sim, uma técnica complementar que, utilizada em conjunto com outras fontes de informação, pode fornecer dados sobre a formação, evolução e funcionamento dos solos. Os usuários atuais da micromorfologia são cientistas, como pedólogos, geólogos, geógrafos, geomorfólogos, geoquímicos, arqueólogos, quaternaristas e físicos de solo, entre outros, que necessitam das técnicas microscópicas para explorar os materiais de seus campos de interesse.

Assim, os objetivos fundamentais da micromorfologia de solos são (Castro et al., 2003): 1) identificar os constituintes dos solos nas suas diferentes frações; 2) definir as relações existentes entre esses constituintes (tipos de organização, hierarquia e cronologia das organizações); 3) formular hipóteses ou demonstrações acerca da dinâmica genética e evolutiva dos solos na tentativa de esclarecer as controvérsias sobre sua origem, evolução e comportamento.

A micromorfologia é atualmente uma técnica analítica bem estabelecida que fornece informações essenciais para qualquer disciplina da Ciência do Solo cujo foco de estudo sejam partículas, poros e organismos dos solos. Pode ser utilizada como uma ferramenta descritiva ou quantitativa. Nesse último caso, as descrições micromorfológicas são apoiadas por medições morfológicas, (geo)químicas ou mineralógicas. Até meados da década de 1980, a micromorfologia foi amplamente utilizada quase exclusivamente para estudos pedogenéticos, procurando elucidar problemas ligados aos processos de formação do solo. A partir de então, a técnica passou a ser utilizada em outras áreas da Ciência do Solo. Nesse sentido, Miedema (1997) fez uma ampla revisão sobre o tema, destacando sua utilização nos estudos de processos físicos, biológicos e de funcionamento resultante do uso e manejo dos solos, com ênfase nas questões relativas à sua estabilidade estrutural, ao seu funcionamento ecológico e ao seu funcionamento hídrico. O autor apresenta, além das técnicas de observação para cada um desses tipos de aplicações, os modelos de comportamento estrutural, físicos e ecológicos dos solos. Recentemente, Stoops (2009) fez, também, um balanço das principais contribuições da micromorfologia, sobretudo à Ciência do Solo, de 1938 até 2008. Portanto, cerca de 70 anos desde o seu surgimento.

O objetivo deste capítulo é apresentar alguns conceitos básicos e as técnicas de preparo de amostras utilizadas na micromorfologia do solo. Será dada ênfase à coleta de amostras e preparo de lâminas delgadas utilizadas na

descrição de materiais de solos minerais. O preparo de materiais de solos orgânicos não será abordado neste capítulo e pode ser encontrado no trabalho de Fox e Parent (1993). Também não serão abordados os procedimentos de descrição de lâminas delgadas, os quais estão detalhadamente descritos nos trabalhos de Bullock et al. (1985), Castro et al. (2003), Castro (2008) e Stoops (2003).

## 1.2 Princípio

A análise micromorfológica dos solos corresponde a uma técnica de observação morfológica em escala micrométrica. Tal técnica requer amostras de material pedológico, adequadamente coletadas, previamente impregnadas, geralmente com resinas, finamente cortadas e coladas em lâminas delgadas similares às petrográficas, podendo ser produzidas também em tamanho médio (1,8 mm x 50 mm x 70 mm) ou “mamute” (1,8 mm x 90 mm x 130 mm).

Os materiais assim preparados são observados com auxílio de lupas e microscópios ópticos polarizadores do tipo usado em Petrografia, ambos preferencialmente binoculares, podendo ainda ser submetidos à microscopia eletrônica e microanálise (análise química pontual) após tratamentos adequados, desde que as lâminas não estejam recobertas por lamínulas, ou possam ser facilmente removidas.

Castro et al. (2003) e Castro (2008) ressaltam alguns pontos importantes para quem inicia seus estudos nessa técnica:

- A lâmina contém uma porção minúscula de um material de dimensão espacial muito maior, o que requer uma amostragem criteriosa do que se pretende investigar.
- Para que possa ser útil no esclarecimento das controvérsias pedológicas, é primordial que o material amostrado esteja com sua estrutura conservada, ou seja, não deformada pela coleta, além de corretamente situado quanto à sua

orientação, profundidade, plano de amostragem, razão da coleta naquele ponto, etc.

- Ao se trabalhar sobre lâminas delgadas, ou seja, sobre seções polidas, se está trabalhando bidimensionalmente, o que dificulta realizar cálculos volumétricos.
- O limite da resolução do microscópio óptico (em geral até 1000X, mas idealmente até 600X) impõe restrições às observações de constituintes muito finos, como argilas, por exemplo, as quais podem ser observadas por meio de comportamento óptico de conjunto.
- Com o avanço atual das teorias e métodos em Ciência do Solo, procura-se estudar o solo tal como ele é, numa perspectiva dinâmica no tempo. Com isso, o perfil de solo passou a ter significado não só vertical, mas também lateral na medida em que uma sucessão de perfis alinhados do topo até à base de uma encosta permite identificar tanto a distribuição de seus horizontes, como as relações genético-evolutivas e funcionais entre eles e, com isso, convalidar hipóteses que podem explicá-las.
- Os níveis de organização/observação do solo estão embutidos uns nos outros e constituem unidades de medida que implicam ordens de grandeza extremas, variando do quilômetro (km) ao nanômetro (nm).
- As organizações do solo podem ter sido identificadas em campo e, nesse caso, a micromorfologia permite dissecá-las; contudo, pode também ocorrer o caminho inverso: reveladas pela micromorfologia e, posteriormente, serem reconhecidas no campo, melhorando, com isso, a escala de observação e a interpretação dos resultados.
- Não é recomendável realizar estudos micromorfológicos de solos em escalas de grande generalização cartográfica, os quais devem servir-se de outras técnicas de estudo em nível de paisagem, como levantamentos e mapas pedológicos, entre outros.

## **1.3 Material e Equipamentos**

### **1.3.1 Coleta de amostras**

- Caixas de Kubiena (caixas confeccionadas com chapa de ferro galvanizado com duas tampas) ou de cartolina (12 cm x 7 cm x 4 cm).
- Filme plástico.
- Plástico bolha.
- Faca.
- Tesoura de poda.
- Tesoura.
- Espátula.
- Fita métrica.
- Caixa de madeira, plástico ou isopor.
- Caneta tipo marcador permanente.
- Caderneta de campo.

### **1.3.2 Remoção de água das amostras**

#### **(i) Secagem ao ar ou estufa**

- Estufa com ventilação forçada, temperatura ideal de 40 °C.

#### **(ii) Troca de água por acetona**

- Caixa plástica (dimensões: 60 cm x 40 cm x 30 cm).
- Mangueiras de silicone (0,8 cm e 1,0 cm).
- Bomba peristáltica.

- Tubos de vidro com entrada na parte superior e saída na parte inferior.
- Bomba de vácuo.
- Dessecadores.
- Capela.
- Querosene.
- Acetona.

### **1.3.3 Impregnação**

- Dessecadores.
- Capela.
- Bomba de vácuo.
- Bastão de vidro de tamanho 1 cm x 20 cm.
- Béquer de 600 mL ou 1 L ou 2 L.
- Resina poliéster não saturada acelerada ou não acelerada.
- Monômero de estireno.
- Acetona.
- Catalisador (Butanox – peróxido de metil etil cetona).
- Acelerador de cobalto.
- Pigmento orgânico solúvel fluorescente (Tynopal OB).

### **1.3.4 Confeção de lâminas delgadas e blocos polidos**

- Serra com disco de corte diamantado.
- Pedra e disco de desbaste.

- Politriz com disco diamantado para desbaste grosseiro.
- Politriz com sistema de alimentação de abrasivo para desbaste fino e polimento.
- Lâminas de vidro (4 cm x 2 cm ou 7 cm x 4 cm ou 13 cm x 9 cm ou 16 cm x 9 cm).
- Prensa para colagem.
- Cola (epoxy) com tempo de secagem de 24h.
- Placa aquecedora.
- Pinça.
- Lixas de diversas granulações (220 até 1.200 mesh).
- Pó abrasivo de óxido de silício ou alumínio de diferentes granulometrias (220 até 1.200 mesh).
- Placa de vidro temperado  $\Phi$  2 ou 3 cm x 30 cm.
- Querosene.

### **1.3.5 Descrição micromorfológica**

- Lupa binocular (até 50x de aumento).
- Microscópio petrográfico binocular com jogo de objetivas de baixo (2,5; 3,2; 4X), médio (10; 25X) e alto (40X) aumentos.
- Máquina fotográfica acoplada à lupa e microscópio, idealmente digital.
- Informações morfológicas, analíticas, da paisagem e de localização geográfica do perfil estudado e da posição da amostra coletada no perfil.
- Material de escritório para anotações, desenhos esquemáticos e similares.

### 1.3.6 Quantificação

- Lupa binocular (até 50X de aumento).
- Microscópio petrográfico binocular com jogo de objetivas (vide item 1.3.5).
- Máquina fotográfica acoplável à lupa e microscópio.
- Programa computacional de aquisição e análise de imagens (há vários softwares no mercado vinculados às marcas dos microscópios).

## 1.4 Reagentes e soluções

- **Solução para impregnação de amostras indeformadas de solos** – Adicionar 1 L de resina de poliéster em béquer de 2 L. A seguir, adicionar 1 L de monômero de estireno (ou acetona pura p.a.) e misturar lentamente. Na sequência, adicionar 15 gotas de catalisador Butanox (peróxido metil-etil-cetona), 5 g de pigmento orgânico solúvel fluorescente (Tynopal OB) e cinco gotas de acelerador de cobalto a 6% (apenas para resina não acelerada). Os produtos devem ser adicionados na ordem em que foram relacionados acima. Misturar lentamente (sem bater) com um bastão de vidro, até que a mistura adquira coloração amarelada (sem pigmento) ou esverdeada (com pigmento) e não contenha pequenas bolhas. Como o produto é tóxico, deve-se evitar a inalação de gases ou vapores e manuseá-lo com EPI tipo máscaras, jaleco e luvas resistentes ao produto, dentro de capela com exaustão apropriada ou ao ar livre. A quantidade preparada (2 L) é suficiente para impregnar uma amostra com dimensão aproximada de 12 cmx7 cmx4 cm.

## 1.5 Procedimento

### 1.5.1 Coleta de amostras no campo

A coleta de amostras é uma das etapas mais críticas dos estudos micromorfológicos. Erros na amostragem podem comprometer o que é observado na lâmina delgada e podem levar a conclusões errôneas sobre o material estudado. A micromorfologia requer a coleta e a preparação de amostras indeformadas e orientadas, tal como encontradas no campo ou no experimento. A coleta de amostras representativas é difícil porque o solo é normal e visualmente heterogêneo, mesmo a distâncias centimétricas. Sendo assim, mesmo as lâminas maiores contêm só um pequeno volume de solo. Considerando-se que a vantagem maior da micromorfologia do solo é a possibilidade de se estudar o arranjo espacial dos constituintes dos solos e a relação composicional, hierárquica e cronológica entre eles, a coleta de amostras representativas e não tendenciosas passa a ser um dos pontos mais delicados desse estudo.

Castro (2008), Castro et al. (2003), FitzPatrick (1993), Murphy (1986), Vepraskas e Wilson (2008), entre outros, enumeram uma série de critérios de amostragem que devem ser levados em consideração na hora da coleta, os quais estão descritos a seguir.

- Finalidade da investigação – a finalidade dos estudos micromorfológicos pode ser intencionada para produzir dados qualitativos, quantitativos, descritivos ou para dar suporte a outros tipos de investigação. O objetivo do estudo determina o tamanho, o número de amostras a ser coletado por horizonte, onde coletar (se no meio ou nas transições entre os horizontes), a orientação da amostra, o número de horizontes ou de subamostras e, até mesmo, a técnica a ser empregada na amostragem. Não há um critério absoluto para definir a amostragem e, por isso, é sempre desejável ter em mente que em materiais de solos ocorrem heterogeneidade e descontinuidade. É sempre desejável, quando amostrando uma determinada feição do

solo, incluir materiais das circunvizinhanças para efeitos comparativos.

- Tamanho e número de amostras – considerando-se que componentes e feições do solo podem variar em tamanho, é necessário adequar o número e a quantidade de amostras para aquilatar suas relações, distribuição e quantificação. Além do tamanho, muitos componentes e feições do solo não estão uniformemente distribuídos ou ocorrem a intervalos maiores que as dimensões da lâmina delgada. Dessa forma, pode ocorrer de ficarem ausentes ou serem observados em concentrações maiores do que seria a verdadeira. Todas essas possibilidades conduzem a uma adequação no tamanho, na orientação, na quantidade e posição das amostras, ou no número de lâminas de cada bloco de solo impregnado, necessárias para uma avaliação confiável de cada uma das situações acima expostas.
- Orientação das amostras – pode ser crítica para alguns tipos de investigação e sempre deve ser conhecida. Na maioria dos casos, a orientação é vertical ou horizontal em relação ao perfil de solo. Em caso de necessidade, amostras com orientação inclinada podem ser coletadas. Em casos onde a orientação ideal não é conhecida com antecedência, tanto amostras verticais como horizontais devem ser coletadas.
- Local de amostragem no perfil – a concepção do plano de amostragem deriva dos objetivos da pesquisa, da revisão da literatura e das observações de campo que permitiram caracterizar a morfologia do solo tal como ela se apresenta. O plano de amostragem reflete uma estratégia adotada para que a investigação possa responder às questões formuladas, ou que correm o risco de não serem esclarecidas satisfatoriamente por outras escalas de observação ou métodos, sobretudo de laboratório. Para amostrar um perfil de solo, por exemplo, amostras são coletadas em cada horizonte. Quando os horizontes são

muito difusos, as amostras podem ser espaçadas a intervalos regulares. As transições entre horizontes e feições específicas também devem ser amostradas separadamente. Em estudos onde feições específicas são o foco do estudo, a amostragem deve focar nelas. Pode ocorrer ainda de uma feição ser maior que a amostra prevista; nesse caso, deve-se coletar uma série sucessiva de amostras, do seu aparecimento até seu desaparecimento, incluindo as transições superiores, inferiores e laterais, quando isso for essencial para testar hipóteses, sobretudo genético-evolutivas ou degradacionais.

- Número de repetições – repetições de amostras devem ser coletadas sempre que possível, porque uma amostra isolada muitas vezes não consegue representar a variabilidade dos atributos e feições de uma classe de solo ou de um sistema pedológico (topossequência). Além disso, há a possibilidade de se perderem determinadas amostras durante o seu transporte, armazenamento ou manipulação. Repetições dão maior garantia de que pelo menos uma amostra coletada em campo de um determinado horizonte ou feição seja convertida em lâmina(s) delgada(s). Na prática, a quantidade de amostras a serem coletadas vai depender da capacidade técnica e financeira que o pesquisador dispõe para fabricar as lâminas delgadas. Como medida de segurança, sempre é recomendável coletar duas amostras por horizonte ou do que se quer amostrar. Também é melhor coletar um menor número de amostras maiores que tenham uma maior área representativa do que uma grande quantidade de repetições para fabricar lâminas pequenas. A justificativa para tal é que solo observado em lâminas maiores possivelmente representará melhor a variabilidade e as relações entre as feições ou o que se quer analisar.
- Época de amostragem – como o solo é um sistema dinâmico, respondendo a adições, subtrações,

translocações e transformações de matéria e energia, sua morfologia é variável em função de perturbações causadas por umidade, temperatura, vegetais, animais e do homem (particularmente do uso e manejo). Mudanças a curto tempo podem ser esperadas, como, por exemplo, variações na estrutura e porosidade por acomodações após tratamentos culturais, expansão e contração devido a variações no conteúdo de umidade, translocações por movimentação de solutos ou por arrastes mecânicos por efeito da movimentação da água no solo, entre outras mudanças. Dessa forma, é preciso considerar o momento ou os momentos mais adequados de se proceder a amostragem para que se possa representar uma condição do solo ou detectar a sua variabilidade. Em caso de variações climáticas sazonais, por exemplo, e dependendo do objetivo da pesquisa, convém coletar em cada estação.

O procedimento de coleta de amostras indeformadas envolve os seguintes passos (Figura 1):

- Uma vez determinados os locais de interesse na classe do solo, na topossequência, seleciona-se na parede do perfil de solo uma pequena área a ser amostrada, um pouco maior que a dimensão da caixa de coleta, cuidando-se para que a superfície esteja limpa e relativamente plana, de modo a preservar a estrutura, cuidando para não deformá-la ou desmoroná-la. Se necessário, cortam-se as pontas de pequenas raízes com tesoura bem afiada, sem perturbar a amostra. É conveniente elaborar-se uma listagem na caderneta de campo para a anotação das informações das amostras coletadas, devendo as denominações serem claras para o autor da pesquisa e de fácil reconhecimento quando forem para a preparação e impregnação.
- Desenha-se o contorno da caixa no horizonte, na transição ou feição pedológica que se quer amostrar, com auxílio de um canivete ou faca, e inscrevem-se na parte externa da caixa as anotações de identificação (código de identificação

do perfil, do horizonte e da profundidade) e de orientação da amostra, por meio de uma pequena seta indicando a direção superior do perfil, e eventualmente outra, indicando se a montante ou jusante da vertente.

- As faces do bloco a ser retirado devem ser cuidadosamente esculpidas com uma faca ou canivete, iniciando-se pelas laterais, depois a face superior e, por último, a inferior, aprofundando o corte suavemente, de modo inclinado no início e posteriormente deixando as paredes retas, até que a caixa se ajuste completamente ao bloco. Após isso, acomoda-se a embalagem sobre a amostra e força-se o seu desprendimento fazendo uma pequena alavanca com a faca ou canivete, segurando-se firmemente a caixa e virando-a imediatamente para a posição horizontal. Pode-se, então, colocar a tampa da caixa que se está utilizando e envolvê-la com jornal e filme de poliéster. Outra técnica consiste no uso de caixas metálicas abertas dos dois lados (Caixas de Kubiena), sendo uma das bordas cortante. A caixa deve ser introduzida no perfil de solo, batendo-se sobre uma madeira apoiada na parte de trás. Libera-se, com cuidado, a amostra, aparam-se os excessos e colocam-se o fundo e a tampa. Pode-se ainda recorrer a cordas de violão finas para o corte inferior (basal) do bloco; a corda deve ser esticada e movimentada suavemente como um serrote, até que o bloco esteja inteiramente cortado. É possível, ainda, que se queira coletar um bloco maior e, a partir dele, retirar blocos menores em laboratório. Nesse caso, o procedimento do corte é o mesmo, desde que o bloco grande esteja bem apoiado no balcão.
- Acomodam-se as amostras coletadas em caixas de madeira, papelão ou isopor forradas com jornal, bolinhas de isopor, espuma ou “plástico-bolha”, separando-as das vizinhas também com um desses materiais de proteção, a fim de evitar que se quebrem no transporte para o laboratório.

Procedimentos de coleta para solos que apresentam alta friabilidade, presença de cascalho e pedregosidade, materiais cimentados e coesos e materiais soltos são descritos com bastante detalhe em em Murphy (1986), Castro et al. (2003) e Vepraskas e Wilson (2008).

### 1.5.2 Remoção de água das amostras

Antes de impregnar as amostras com resina, há a necessidade de eliminar toda a sua água, para permitir que toda a resina penetre nos poros. Além disso, as resinas utilizadas na impregnação das amostras indeformadas têm sua taxa de polimerização comprometida pela presença de água, mesmo em pequenas quantidades. Portanto, para o sucesso da confecção de boas lâminas delgadas, é extremamente importante eliminar a água contida nas amostras. As duas metodologias mais utilizadas para tal são: (i) secagem ao ar e em estufa e (ii) troca de água por acetona. Existe uma terceira metodologia para remover água de uma amostra de solo que é a secagem por sublimação, após congelamento (*freeze drying*). Essa técnica é pouco utilizada e não será abordada neste capítulo. Detalhes podem ser encontrados em Jongerius e Heintzberger (1975).

- Secagem ao ar e estufa – amostras de solo podem ser secas à temperatura ambiente em ambiente ventilado e/ou em estufa com ventilação forçada a 40 °C ou a menores temperaturas (Figura 2A). A secagem ao ar é bastante lenta e demora de 15 a 30 dias, dependendo da textura e densidade da amostra, até que atinja peso constante. Após atingir o peso constante, as amostras são colocadas em estufa a 40 °C por 48h para eliminação da água higroscópica. Um dos problemas da secagem forçada em estufa é que na maioria dos solos, em especial aqueles com argila de atividade alta, ou com muita matéria orgânica, podem ocorrer contrações drásticas com aparecimento de artefatos, tais como rachaduras, ou

mesmo pode ocorrer quebra da amostra. Para minimizar esse problema, deve-se proceder a secagem muito lentamente. Colocar as amostras úmidas diretamente na estufa após a coleta pode aumentar os problemas de contração e re-orientação de partículas do solo.

- Troca de água por acetona – em vez de remover a água por evaporação, ela pode ser trocada por acetona por um processo de troca líquida (Figura 2B). Utilizando-se esse sistema, evita-se o problema de contração do material pela secagem. As amostras úmidas trazidas do campo são colocadas dentro de dessecadores, cujo fundo é recoberto com um pano embebido em acetona. Por ascensão capilar, os poros que não estão preenchidos com água se saturam com acetona. Esse processo demora em torno de 10 a 15 dias. Uma vez saturadas, as amostras são submergidas num banho de acetona que permite a difusão da água nos poros para a solução de acetona circundante. Esse processo ocorre lentamente e demora de 15 a 30 dias, dependendo do tamanho e composição da amostra, para a completa eliminação da água da amostra de solo. A água que se difunde da amostra para a acetona precisa ser eliminada e, para isso, pode-se proceder de duas formas: 1) trocando periodicamente a acetona dos recipientes plásticos (este processo consome muita acetona se não se dispõe de um sistema de recuperação dela); ou 2) utilizando um tamis molecular (normalmente é utilizada a zeólita na forma granulada ou um tamis artificial; este último de uso mais comum), que filtra a mistura de água + acetona por meio da retenção das moléculas de água. A filtração da mistura utilizando um tamis molecular é realizada por meio da circulação da solução de acetona com água através do tamis. Para isso, utiliza-se uma bomba peristáltica que promove uma circulação constante a uma velocidade de  $30 \text{ mL h}^{-1}$  da mistura de acetona + água, que sai dos recipientes onde estão as amostras e passa através de colunas de vidro onde está o tamis

molecular (formato de bolinha ou bastonete). Utilizam-se três colunas de vidro de 0,93 m de altura e 0,07 m de diâmetro interconectadas por mangueiras de silicone por onde entra, na parte superior da coluna, a acetona contaminada com água e sai, na parte inferior da coluna, a acetona filtrada. Periodicamente, o tamis molecular tem que ser retirado das colunas para secagem e eliminação da água por aquecimento numa estufa a 110 °C por 24h. O processo se completa quando não há mais água na solução de acetona. Para isso, é realizado um teste prático: adicionam-se 10 mL de solvente (por exemplo, querosene) a 20 mL da solução. Se ainda há água na acetona, o solvente irá produzir borbulhas ou turbidez na mistura, uma vez que as duas substâncias são imiscíveis. O método mais preciso de se avaliar a presença de água na solução de acetona + água é medir a sua gravidade específica usando um picnômetro ou hidrômetro.

### **1.5.3 Preparação da solução impregnadora e impregnação das amostras**

Para a confecção das lâminas delgadas, é necessário que a amostra de solo indeformada e coletada em campo seja suficientemente endurecida para poder ser cortada e polida. Basicamente, dois tipos de resinas são atualmente utilizados para impregnar solos para estudos micromorfológicos: as de poliéster e as de epóxi, tal como citadas anteriormente. Ambas são hidrofóbicas que requerem total secagem da amostra para endurecerem. As de poliéster são as mais comuns e têm inúmeros nomes comerciais dependendo do fabricante. A resina escolhida tem que ter as seguintes características: ser transparente, ter um índice de refração de 1,54, ser isotrópica, ter baixa viscosidade para penetrar nos poros menores, apresentar estabilidade dimensional e endurecer sem quebrar.

A fim de se obter maior eficiência de penetração da resina nos solos, dois procedimentos são requeridos: 1) diminuir a sua

viscosidade e 2) proceder à impregnação em ambiente de vácuo. Algumas resinas de poliéster utilizam acetona como diluente para diminuir a viscosidade, mas são mais comuns as que utilizam monômero de estireno. Para acelerar a polimerização das resinas, deve-se adicionar algumas gotas de catalisador naquelas pré-aceleradas. No caso de se utilizarem resinas que não sejam pré-aceleradas, deve-se, ainda, adicionar um acelerador de polimerização.

A solução mais utilizada para impregnar as amostras de solos é composta pela mistura dos seguintes componentes: resina de poliéster ou epóxi, monômero de estireno (ou acetona pura P.A.), catalisador, pigmento orgânico solúvel fluorescente e acelerador de cobalto (apenas para resina não acelerada). O conjunto de componentes utilizados para a preparação da solução impregnadora doravante será denominado de “mistura”. Os seguintes procedimentos devem ser seguidos para a elaboração da mistura: adicionar, um a um, os ingredientes num béquer de 2 L (plástico, vidro comum ou refratário), na ordem em que foram relacionados, misturando-os lentamente, sem bater, com um bastão de vidro, até que a mistura adquira uma cor amarelada sem pigmento ou esverdeada com pigmento). Como o produto é tóxico, é recomendável evitar a inalação de gases ou vapores por meio de máscara e manuseá-lo com luvas resistentes ao produto, dentro de uma capela com exaustão apropriada ou executar todo o procedimento ao ar livre.

As amostras indeformadas de solos devem ser cuidadosamente manuseadas durante todo o preparo, evitando-se, com isso, impactos ou esforços. Caso as caixas de coleta sejam de materiais rígidos (metais, plástico rígido ou madeira), elas devem ser retiradas antes da impregnação, sendo substituídas por recipientes plásticos ou dispostas para impregnação diretamente nas caixas de papel cartão ou cartolina utilizadas nas coletas de campo.

O procedimento de impregnação de amostras secas ao ar e estufa envolve os seguintes passos:

- Dispor as amostras dentro de um recipiente plástico ou metálico (alumínio ou lata), deixando-as no dessecador até receberem a mistura.
- Em seguida, verter a solução por meio do bastão ao lado da amostra (jamais sobre ela) até formar um filme no fundo do recipiente que contém as amostras, sem tirá-lo do dessecador, e evitando que caiam pingos sobre os torrões. No caso de usar um gotejador, fazer com que o bico goteje a mistura igualmente ao lado das amostras e nunca sobre elas. As vidrarias podem ser limpas com acetona pura.
- Tampar o dessecador e ligá-lo a um sistema de vácuo fraco, para facilitar a ascensão da mistura por capilaridade (Figura 3). Quando forem utilizadas bombas de vácuo e a classe textural da amostra for média ou arenosa, usar valores baixos de vácuo, suficientes para favorecer a ascensão capilar da mistura.
- Tão logo a frente de capilaridade seja bem visível e se esgote a mistura do recipiente, repetir a operação, preenchendo o recipiente até atingir a frente de capilaridade. Na última operação, a mistura deve cobrir por completo a amostra. A impregnação pode levar mais de um dia para ser completada.
- Após todo recobrimento da amostra pela mistura, deixá-la em repouso no dessecador ainda sob vácuo por 12h, mas com a bomba de vácuo desligada. É conveniente que a tampa do dessecador esteja bem vedada. Para tal, passa-se vaselina em toda a borda interna da tampa.
- Após esse procedimento, o recipiente com as amostras pode ser retirado do dessecador e deixado em repouso sobre local limpo e firme dentro de uma capela de exaustão (Figura 4), preenchendo o nível da mistura sempre que necessário a fim de manter as amostras cobertas até que endureçam e não se possa mais marcá-las com unha ou instrumento com ponta, o que pode levar até 30 dias.

- Para um endurecimento completo, as amostras já em avançado estágio de endurecimento ao ar são retiradas da capela e colocadas em estufa a 40 °C por 72h.

O procedimento de impregnação de amostras, cuja remoção de água foi realizada por meio da troca da água por acetona, envolve os seguintes passos:

- Retirar as amostras de solo do banho de acetona depois de finalizado o processo de remoção de água, imediatamente submergi-las completamente na mistura dentro de um recipiente plástico ou metálico (alumínio ou lata) e colocar no dessecador.
- Deixar as amostras descansando na solução por 12h sem vácuo.
- Tampar o dessecador e ligá-lo a um sistema de vácuo fraco.
- As amostras devem ficar pelo menos 12h sob vácuo fraco até que não se observe mais a saída de bolhas de ar.
- Após isso, as amostras podem ser retiradas do dessecador e deixadas em repouso sobre local limpo e firme dentro de uma capela de exaustão, preenchendo o nível de mistura, mantendo-as sempre cobertas até que endureçam e não se possa mais marcá-las, o que pode levar até 30 dias.
- Para um endurecimento completo, as amostras já bastante endurecidas ao ar são retiradas da capela e colocadas numa estufa a 40 °C durante uma semana.

Na impossibilidade de impregnar de uma só vez todas as amostras coletadas em campo, é recomendável executá-lo por perfil, ordenando-as em função das informações de campo. É importante reservar réplicas das amostras impregnadas, devidamente identificadas e orientadas para a fabricação de novas lâminas, caso ocorra acidente, ou, o que é mais importante, caso seja necessária a aplicação de algum

reagente ou corante ou, ainda, para testes em ultramicroscopia, microanálise etc. Para esses testes, as lâminas delgadas em duplicata deverão ser confeccionadas sem lamínulas.

#### **1.5.4 Confeção de blocos polidos e de lâminas delgadas**

Uma vez impregnadas e endurecidas, resta confeccionar as lâminas delgadas das amostras. Esse procedimento é bastante trabalhoso e exige uma habilidade quase “artística” se o desbaste final e polimento forem realizados manualmente. Atualmente, existem máquinas de corte e polimento altamente sofisticadas, denominadas politrizes, que podem realizar todas as tarefas de laminação com alta precisão.

O procedimento de confeção de lâminas delgadas envolve os seguintes passos:

- Após endurecimento, os blocos impregnados (Figura 5) devem ser cortados em fatias de aproximadamente 15 mm de espessura, utilizando-se para tal uma serra com disco adiamantado. A direção do corte deve respeitar a orientação na qual a amostra foi coletada em campo. É importante realizar um pequeno corte na parte superior da amostra para indicar a orientação desta.
- Se a superfície da amostra desprender partículas, especialmente as finas (argilas), é necessário reimpregná-la. Apoiando a lâmina sobre placas de vidro envoltas com folha de alumínio, reimpregnar alternadamente, a cada 1h, as faces expostas por gotejamento, até que estejam bem impregnadas (um filme da mistura deve recobrir a face da fatia). As dosagens dos ingredientes para a reimpregnação são:
  - 30 mL de resina de poliéster (pré-acelerada).
  - 30 mL de acetona pura p.a.

- 0,5 g de pigmento fluorescente.
- Três gotas de catalisador Butanox (peróxido metil-etil-cetona).
- Quando necessária a reimpregnação, deixar secar por 1h e depois endurecer em estufa a 40 °C por cerca de 18h, até que adquiram aspecto de acrílico, deixando-as esfriar no interior de um dessecador.
- Uma vez certificada a boa qualidade da impregnação e do endurecimento, cortar a fatia no tamanho da lâmina de vidro (prestar atenção para não perder a orientação, realizando, para isso, um pequeno corte na parte superior da fatia) (Figura 6).
- Selecionar uma das faces da fatia onde vai ser colada a lâmina de vidro e realizar um desbaste de possíveis irregularidades que por ventura possam ter ocorrido durante o corte. Utilizar abrasivos de óxido de alumínio e carbamato de silício de diferentes granulações para essa tarefa. O ideal é começar com granulações ou papéis de lixa de 220 mesh e finalizar em granulações de 600 a 1.200 mesh até a eliminação das irregularidades e espelhamento da face da fatia. Esse desbaste pode ser executado manualmente ou com máquinas especializadas (politriz). É importante eliminar qualquer resíduo após essa operação, limpando a face com água ou um solvente ou um limpador de ultrassom antes de colar a lâmina.
- Selecionar uma das faces da lâmina de vidro onde vai ser realizada a colagem da fatia da amostra de solo impregnada. Realizar nessa face um polimento com abrasivo de média a baixa granulação (600 a 1.000 mesh) a fim de eliminar qualquer irregularidade que possa ocorrer na superfície do vidro.
- Colar a fatia de solo impregnado na lâmina de vidro respeitando as faces previamente polidas. Para essa colagem, utiliza-se resina epoxy de secamento em 24h ou

resina poliéster não diluída (é importante que a cola tenha índice de refração de 1,54 e seja isotrópica). A colagem é realizada apoiando-se a lâmina sobre uma placa aquecedora levemente aquecida e comprimindo a amostra suavemente com uma pinça para eliminar as bolhas de ar e garantir um bom contato entre a amostra e a lâmina.

- A cura da cola deve ser realizada com a amostra sob pressão para eliminação de bolhas de ar. A pressão pode ser aplicada com pesos ou pequenas prensas especiais construídas para esse fim.
- Quando seca, a lâmina é cortada até a espessura de 1 mm com o uso de uma serra de corte diamantada.
- A seguir, a lâmina é desbastada até uma espessura uniforme de aproximadamente 40  $\mu\text{m}$ . Essa operação pode ser realizada manualmente ou utilizando politriz regulável.
- A espessura final, entre 20  $\mu\text{m}$  e 30  $\mu\text{m}$ , é atingida manualmente utilizando abrasivos ou papéis de lixa de óxido de alumínio e/ou carbamato de silício de granulações entre 600 mesh e 1.200 mesh. Atualmente, existem politrizes sofisticadas que finalizam as lâminas delgadas, sem necessidade das operações de desbaste manual.
- A espessura final é atingida quando a cor de interferência do quartzo, observado em microscópio sob luz polarizada (nicóis cruzados – XPL), torna-se branca ou cinza clara. Quando o procedimento de desbaste da lâmina for manual, controla-se a espessura da lâmina pela observação em microscópio durante o seu desbaste, tornando-a mais frequente à medida que se aproxima de sua espessura final. Sob luz polarizada, os grãos de quartzo passam de multicoloridos (amarelos, vermelhos etc.) quando a lâmina está grossa, para cinza claros ou brancos quando na espessura aproximada de 30  $\mu\text{m}$ .

- Lavar em água corrente de boa qualidade (sem partículas dispersas) ou, no caso de amostras que contêm minerais de argila de atividade alta, utilizar um solvente orgânico (acetona, xileno ou querosene) e deixar secar ao ar. Para obter uma limpeza efetiva, imergir as amostras em equipamentos de ultrassom.
- Se a lâmina não for utilizada para outras análises, como, por exemplo, microscopia eletrônica de varredura, aplicação de reagentes ou microanálise pontual, pode-se colar uma lamínula com a própria resina epoxy.

As lâminas utilizadas são delgadas, frequentemente similares às petrográficas (em geral no tamanho de 1,8 mm x 30 mm x 40 mm), podendo ser produzidas também em tamanhos maiores, usualmente médio (1,8 mm x 50 mm x 70 mm) e “mamute” (1,8 mm x 90 mm x 130 mm) (Figura 7).

Se o objetivo do estudo for realizar a quantificação dos poros e da estrutura do solo por meio de técnicas de análise de imagens, pode-se prescindir a fabricação de lâminas delgadas. Nesse caso, utilizam-se as faces polidas de uma das fatias cortadas dos blocos impregnados tendo sido adicionado pigmento fluorescente à solução impregnante (Figura 8). Assim, o preparo dessas fatias polidas é realizado seguindo as cinco primeiras etapas descritas neste subitem (1.5.4).

Uma vez preparadas e identificadas, as lâminas devem ser acondicionadas em caixas plásticas ou de madeira especiais para essa finalidade, organizadas por perfil ou experimento, a fim de poderem ser facilmente localizadas e seguramente guardadas e manuseadas. Uma lista de controle, com a identificação e localização das lâminas, se faz necessária quando em grande quantidade.

### **1.5.5 Descrição micromorfológica**

Uma vez finalizada a confecção das lâminas delgadas, a

próxima etapa é a descrição e obtenção das informações micromorfológicas necessárias para alcançar os objetivos da pesquisa. Tal como comentado na introdução, não é objetivo deste capítulo descrever as terminologias e conceitos utilizados na descrição de lâminas delgadas. No entanto, é importante ressaltar que o nível de detalhe da descrição micromorfológica varia de acordo com a investigação e que uma terminologia uniforme deve ser utilizada para que especialistas no mundo todo possam entender as descrições. Ao longo dos anos, Brewer (1976), Bullock et al. (1985), FitzPatrick (1984, 1993), Kubiena (1938) e Stoops (2003) propuseram terminologias e conceitos para a descrição de lâminas delgadas. Atualmente, o sistema apresentado por Stoops (2003), baseado no amplamente utilizado sistema de Bullock et al. (1985), representa a terminologia mais atual e utilizada na descrição de fábricas e feições do solo.

A seguir, descreve-se a sistemática e cuidados necessários para uma boa descrição de lâminas delgadas.

Antes de iniciar as observações, é fundamental verificar se o microscópio está corretamente preparado e ajustado para os trabalhos (tensão da rede, iluminação, limpeza das lentes, distância interpupilar, jogo de oculares, equipamento fotográfico, objetivas centralizadas etc.), bem como se os demais acessórios estão disponíveis (*charriot*, pinças etc.).

Em seguida, o pesquisador deve munir-se das notas e fotos de campo, esquema de localização da amostra no perfil e, na sequência, caixa de lâminas e os materiais necessários às anotações e desenho dos croquis (papel, lápis, borracha, lápis de cor, régua, compasso etc.), roteiros para descrição e material de consulta (livros, textos, guias etc.) e dos dados analíticos dos perfis ou amostras estudadas.

Para os registros das observações, é recomendável ter à mão os roteiros, contendo um cabeçalho padrão que inclua: número do perfil, horizonte ou equivalente, profundidade, número ou código da lâmina, croqui de situação da lâmina no

perfil, localização do perfil na topossequência (se for o caso) e o número da(s) fotomicrografia(s) efetuadas de cada lâmina.

O armazenamento das lâminas nas caixas plásticas ou de madeira deve ser feito ordenando-se, preferencialmente, as lâminas de baixo para cima caso se trate de estudos de perfis de solos, sendo que as observações devem obedecer à mesma sequência. No caso de topossequências, a ordenação dos perfis é função da hipótese de campo e do que se busca nas lâminas. No caso de experimentos, ensaios ou simulações, tanto em campo quanto em laboratório, deve-se iniciar pela lâmina da amostra-testemunha não perturbada, ou seja, na condição original, passando-se progressivamente às demais, segundo a lógica dos mesmos (exemplos: amostra não compactada, com compactação fraca, moderada e forte; amostra não irrigada e irrigada etc.).

### **1.5.5.1 Exame por microscopia óptica**

#### **1.5.5.1.1 Observação geral**

É recomendável que as lâminas sejam observadas e descritas primeiramente sob menor aumento, procedendo-se uma observação expedita com auxílio de uma lupa binocular. Nessa escala de observação, procede-se ao mapeamento dos conjuntos diferenciáveis na lâmina, identificando-os por códigos a critério do observador (por exemplo: zona 1, zona 2 etc.), anotando e desenhando os croquis da lâmina observada e, preferencialmente, mantendo-se a escala de observação entre as feições observadas. É importante anotar os motivos da separação das zonas e distinguir os padrões e feições dominantes, caso ocorram. Para facilitar o reconhecimento dos diferentes conjuntos identificados nesta etapa, é recomendável desenhar com lápis sobre a lâmina os limites entre eles.

Ainda, com o uso da lupa, procede-se à observação de cada

zona, sob aumentos progressivamente maiores, anotando os detalhes de cada zona e executando desenhos ou fotografias das áreas mais relevantes, sempre procurando manter nos desenhos a escala entre as feições observadas.

#### *1.5.5.1.2 Microscopia óptica de detalhe*

Após a observação em lupa, recorre-se à microscopia óptica de detalhe (Figura 9). Esse tipo de observação deve iniciar sob baixo aumento, utilizando-se o microscópio com objetivas de 1X ou 2,5X. Efetua-se a varredura sistemática de toda a superfície da lâmina, por meio de curtos deslocamentos verticais e percursos ao longo de toda a largura da lâmina, ou por zona demarcada durante a observação.

Deve-se inicialmente observar as lâminas sob iluminação normal ou planar (PPL), isto é, com nicóis descruzados e posteriormente com luz polarizada ou nicóis cruzados (XPL), anotando os detalhes observados em cada zona.

Passa-se, então, às observações sob aumentos progressivamente maiores (objetivas, por exemplo, de 3X, 4X, 6X, 10X, 25X e 40X), repassando cada zona e completando as anotações realizadas nas etapas anteriores. Se necessário, devem ser executados desenhos em escala maior ao lado dos desenhos anteriormente feitos, ou das fotografias. Ao fazer ampliação (*zoom*) progressiva, deve-se ter clareza da zona que se está observando e da posição em que se encontra.

Os desenhos ou fotografias devem conter legenda apropriada à escala adotada. Legendas usualmente adotadas estão disponíveis nos textos-guia e nos trabalhos que empregam ilustrações do gênero. As legendas devem reproduzir de modo bastante fiel os contornos e formas das microestruturas encontradas, atribuindo tom cinza ou preto aos poros, contornos pretos com interiores brancos ao material grosso e, sempre que possível, aplicar cores próximas da realidade ao material fino.

A observação das transições de uma zona para outra ou de uma feição para seu entorno são extremamente importantes e devem ser feitas com riqueza de detalhes, uma vez que podem revelar o processo evolutivo das microestruturas.

Após o domínio do conteúdo evidenciado na lâmina, deve-se proceder ao preenchimento completo das fichas ou à descrição textual corrida, sempre seguindo uma ordem ou sistemática de descrição (exemplo: zonas, microestrutura, pedacidade, trama, agregados, fundo matricial, feições pedológicas etc.). Bullock et al. (1985) apresentam um modelo de ficha e apresentam exemplos de descrições textuais corridas que são de grande ajuda para guiar a descrição das lâminas.

Outra questão importante diz respeito ao dimensionamento ou quantificação por meio de cálculos dos elementos observados, ainda que feito de forma aproximada. Pode-se fazê-lo por zona e/ou por tipo (ex.: material fino e material grosso).

Os passos descritos devem ser repetidos para cada lâmina, ou zona da lâmina, até a conclusão de todo o perfil de solo quanto à evolução das microestruturas, caso o perfil seja o objeto em estudo.

A partir de então, tenta-se estabelecer uma hierarquia e cronologia para os fatos observados na lâmina, procedendo-se às devidas anotações. Os dados encontrados devem ser reunidos na ordem das lâminas analisadas, tentando-se também estabelecer uma hierarquia e cronologia das feições e microestruturas no perfil estudado, anotando-se também as próprias reflexões sobre o conjunto analisado. O passo seguinte consiste na redação de uma síntese das observações de cada lâmina, do perfil, da topossequência ou mancha de solo em questão.

As feições e microestruturas representativas podem ser fotografadas, segundo critérios que atendam aos objetivos do estudo em curso. As feições e microestruturas de interesse devem estar bem centradas, nítidas e corretamente iluminadas.

É útil tomar as fotos dos diferentes aumentos com auxílio de uma escala milimétrica antes de fotografar as amostras propriamente ditas, facilitando, posteriormente, a inscrição da escala de referência (mm ou  $\mu\text{m}$ ) sobre as fotos. No caso de a lupa ou microscópio estar acoplado a um sistema de análise de imagens, deverá ser realizada a calibração dentro do sistema dos aumentos utilizados na fase da descrição. Dessa forma, a escala pode ser gravada na foto ou imagem de acordo com a calibração programada de acordo ao aumento utilizado.

É conveniente registrar os seguintes dados sobre as fotografias tomadas durante a descrição das lâminas: código da lâmina, sua posição na lâmina, aumento utilizado, grau de iluminação do microscópio, ajustes e filtros utilizados e ajustes de abertura e velocidade da câmera, mesmo que funcionando no modo automático. Essas anotações permitem rever os campos escolhidos e refotografá-los com novos ajustes, caso não haja sucesso na primeira tentativa.

Se necessário, selecionam-se sítios para execução de ultramicroscopia ou microanálise, fotografando-os ou desenhando-os em aumentos compatíveis com o equipamento a ser utilizado. A escolha definitiva desses sítios deve ocorrer ao final do trabalho de análise microscópica.

É conveniente uma organização de pastas de descrição micromorfológica apropriadamente identificadas, capazes de arquivar as descrições textuais ou fichas, desenhos, fotografias, etc.

As fotografias devem ser ordenadas, identificadas e legendadas. Para todo o material resultante da descrição das lâminas e fotografias, é importante providenciar cópias de arquivos de segurança (backups).

### **1.5.5.2 Quantificação**

Dois métodos de quantificação de feições e microestruturas

do solo serão discutidos. A contagem de objetos é um método manual utilizado para adquirir dados globais, enquanto a análise de imagens utilizando sistemas computadorizados é utilizada para medidas de feições específicas.

#### *1.5.5.2.1 Contagem de objetos*

A contagem de objetos é a técnica mais comum para quantificar objetos por análise de imagens. É comumente utilizada para verificar a quantificação de uma feição ou microestrutura por análise de imagens (Aydemir et al., 2004). A técnica consiste em colocar um *grid* de pontos regularmente espaçados sobre a amostra (bloco polido e/ou lâmina delgada) e depois identificar os tipos de feições sob cada ponto. Existem várias formas de definir os pontos do *grid*. Uma das formas mais comuns, utilizada principalmente em amostras pequenas (blocos ou lâminas até 7 cm x 4 cm) é mover as amostras ao longo de linhas sob a objetiva. Utilizando a barra de escala da ocular, podem-se definir os pontos do *grid* onde serão realizadas as observações de feições, que podem ser feitas em espaçamento regulares ou ao acaso. A definição de várias linhas paralelas de pontos pode ser contada para amostrar uma porção ou a área total da lâmina delgada.

#### *1.5.5.2.2 Análise de imagens utilizando sistemas computadorizados*

O estudo da estrutura e da porosidade do solo pelos métodos micromorfológicos, originalmente qualitativos, ganhou uma dimensão quantitativa com o desenvolvimento de métodos de morfologia matemática (Horgan, 1998; Serra, 1982) e da informática. Essa área, que se especializa nos estudos quantitativos da estrutura e da porosidade do solo, é chamada de pedologia quantitativa. Um método quantitativo amplamente difundido na pedologia quantitativa é a utilização da análise de imagens para medir a estrutura em seções 2-D de amostras indeformadas (Miedema, 1997).

Outras técnicas de análise de imagens já são usadas (tomografia computadorizada e ressonância magnética) para a análise 3-D da porosidade e estrutura do solo. Elas estão ganhando mais resolução, favorecendo as pesquisas futuras sobre a formação e dinâmica da estrutura do solo (Miedema, 1997).

O procedimento básico de aquisição de imagens para quantificar feições do solo em lâminas delgadas ou blocos polidos é descrito a seguir:

- Para esse tipo de análise, utilizam-se lâminas delgadas ou blocos polidos que foram impregnados com pigmento fluorescente.
- Identificar as áreas na lâmina ou bloco que serão fotografadas utilizando-se um gabarito (cartolina ou lâmina de plástico de 7 cm x 4 cm que apresenta um corte retangular no centro no tamanho da foto ou imagem a ser adquirida), que varia de acordo com o aumento e tamanho de campo a ser fotografado (Figura 10).
- Colocar a lâmina ou bloco no *plateau* da lupa binocular ou microscópio petrográfico ou sobre uma base de fundo branco, no caso de se obter a imagem diretamente de uma câmera fotográfica digital, sem uso de lupa ou microscópio.
- Iluminar a lâmina ou bloco com luz ultravioleta de comprimento de onda de 450 nm (luz negra).
- Adquirir a imagem digital utilizando câmeras digitais acopladas à lupa binocular ou microscópio petrográfico nos aumentos desejados. Podem-se obter imagens da amostra inteira utilizando-se de câmeras digitais externas montadas sobre tripés.
- Processar a imagem utilizando sistemas específicos de análise de imagens (Figura 11).

Após a aquisição da imagem, passa-se ao processamento da imagem para a sua quantificação.

A seguir, são descritos os procedimentos para a quantificação de poros sobre uma lâmina delgada ou bloco polido:

- Abrir a imagem colorida obtida seguindo o procedimento relatado acima.
- Transformar a imagem colorida em imagem com 255 tons de cinza.
- Utilizando a técnica de limiarização ("*thresholding*"), transformar a imagem em tons de cinza numa imagem binarizada, onde os pixels tomam o valor 0 (cor preta) ou 1 (cor branca) (Russ, 2006). Normalmente, o objeto a ser quantificado (poro ou material sólido) é representado pelos *pixels* com valor 1, ou seja, são representados pela cor branca (Figura 12).
- Para individualizar os objetos a serem quantificados (por exemplo, cada poro do universo total de poros), é realizada a operação de etiquetagem ("*labeling*"). Essa operação é importante para quantificar os parâmetros básicos do objeto.
- Após a individualização dos objetos, é realizada a operação de análise, sendo aplicados os algoritmos de quantificação predefinidos dentro do programa de análise de imagens ou, se o programa permite, construídos pelo usuário.
- Exportar os resultados do sistema de análise de imagens para programas de planilhas e de construção de gráficos para posterior processamento e interpretação.

Um grande número de parâmetros pode ser utilizado para descrever quantitativamente a estrutura do solo e a sua porosidade (Cooper et al., 2010; Cooper; Vidal-Torrado, 2005; Hallaire; Cointepas, 1993; Moran et al., 1988; Ringrose-Voase, 1987; Ringrose-Voase; Bullock, 1984). Os

parâmetros foram classificados por Murphy et al. (1977) em dois grupos: um chamado de *básicos*, que inclui a área, o número de objetos, o perímetro, os diâmetros de Feret horizontais e verticais e as projeções horizontais e verticais do objeto; e outro chamado de *derivados*, que consiste de dois ou mais parâmetros combinados, como, por exemplo, sua forma e orientação, objetivando uma caracterização mais completa da estrutura do solo e dos poros. Mermut (2009) apresentou uma revisão sobre a análise de imagens em micromorfologia.

## **1.6 Medidas de segurança associadas à confecção de lâminas delgadas**

A preparação de amostras indeformadas de solo com a finalidade de realizar análises micromorfológicas acarreta uma série de medidas de segurança que devem ser obrigatoriamente cumpridas.

A maioria dos produtos químicos utilizados na impregnação das amostras apresenta um nível de toxicidade elevada. Por isso, é obrigatória a utilização de equipamentos de proteção individual (EPIs), tais como: avental, luvas de borracha (tipo cirúrgicas), máscara de gás com filtros específicos para vapores orgânicos e óculos de proteção. Todo procedimento de secagem e impregnação das amostras deve ser realizado em capelas com extratores de ar forçado (de preferência de fluxo laminar). O ambiente deve estar bem arejado e equipado com extratores de ar que promovam fluxos de ar das partes baixas do ambiente para saídas localizadas nas partes altas do ambiente (muitos vapores orgânicos são mais densos que o ar e tendem a se acumular próximo ao piso do laboratório). Toda a instalação elétrica deve estar isolada dos vapores orgânicos para evitar problemas, como explosões, e os produtos devem ser armazenados em armários do tipo corta-fogo.

Nas operações de corte e desbaste das amostras

impregnadas, é importante o uso de luvas de tela metálica fina (tipo açougueiro), avental, óculos de proteção e protetores auriculares. No caso de amostras que necessitam de desbastes com a utilização de solventes orgânicos (ex.: querosene) para limpeza e lubrificação, as operações devem ser realizadas em capelas dotadas de extração forçada de ar, com o operador utilizando avental, luva de borracha, óculos de proteção e máscara de gás com filtros para vapores orgânicos.

## 1.7 Referências

AYDEMIR, S.; KESKIN, S.; DREES, L. R. Quantification of soil features using digital image processing (DIP) techniques.

**Geoderma**, v. 119, p. 1-8, 2004.

BREWER, R. **Fabric and mineral analysis of soils**. New York: Robert E. Krieger Publishing Company, 1976. 482 p.

BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOBS, G.; TURSINA, T. **Handbook for soil thin section description**. Albrington: Waine Research, 1985. 152 p.

CASTRO, S. S. **Micromorfologia de solos**: bases para descrição de lâminas delgadas. 2. ed. Campinas: Unicamp; Goiânia: UFG, 2008. 135 p.

CASTRO, S. S.; COOPER, M.; SANTOS, M. C.; VIDAL-TORRADO, P. Micromorfologia do solo: bases e aplicações. In: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v. 3, p. 107-164.

COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de solos com horizonte B nítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 581-595, 2005.

COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P.; GRIMALDI, M. Soil structure transformations between ferralic and nitic horizons on a toposequence in southeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 5, p. 1685-1699, 2010.

FITZPATRICK, E. A. **Micromorphology of soils**. London: Chapman and Hall, 1984. 434 p.

FITZPATRICK, E. A. **Soil microscopy and micromorphology**. New York: J. Wiley & Sons, 1993. 304 p.

FOX, C. A.; PARENT, L. E. Micromorphological methodology for organic soils. In: CARTER, M. R. (Ed.). **Soil sampling and methods of analysis**. Boca Raton: CRC Press, 1993. p. 473-485.

HALLAIRE, V.; COINTEPAS, J. P. Caractérisation de la macroporosité d'un sol de verger par analyse d'image. **Agronomie**, v. 13, p. 155-164, 1993.

HORGAN, G. W. Mathematical morphology for analysing soil structure from images. **European Journal of Soil Science**, v. 49, n. 2, p. 161-173, 1998.

JONGERIUS, A.; HEINTZBERGER, G. **Methods in soil micromorphology**: a technique for the preparation of large thin sections. Wageningen: Soil Survey Institute, 1975. 150 p.

KUBIENA, W. L. **Micropedology**. Iowa: Collegiate Press Inc., 1938. 243 p.

MERMUT, A. R. Historical development in soil micromorphological imaging. **Journal of Mountain Science**, v. 6, p. 107-112, 2009.

MIEDEMA, R. Applications of micromorphology of relevance to agronomy. **Advances in Agronomy**, v. 59, p. 119-169, 1997.

MORAN, C. J.; KOPPI, A. J.; MURPHY, B. W.; MCBRATNEY A. B. Comparison of the macropore structure of a sandy loam surface soil horizon subjected to two tillage treatments. **Soil Use and Management**, v. 4, p. 96-102, 1988.

MURPHY, C. P. **Thin section preparation of soils and sediments**. Berkhamsted: A B Academic Publishers, 1986. 149 p.

MURPHY, C. P.; BULLOCK, P.; TURNER, R. H. The measurement and characterisation of voids in soil thin sections by image analysis. Part I. Principles and techniques. **Journal of Soil Science**, v. 28, p. 498-508, 1977.

RINGROSE-VOASE, A. J. A scheme for the quantitative description of soil macrostructure by image analysis. **Journal of Soil Science**, v. 38, p. 343-356, 1987.

RINGROSE-VOASE, A. J.; BULLOCK, P. The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs. **Journal of Soil Science**, v. 35, p. 673-684, 1984.

RUSS, J. C. **The image processing handbook**. Boca Raton: CRC Press, 2006. 885 p.

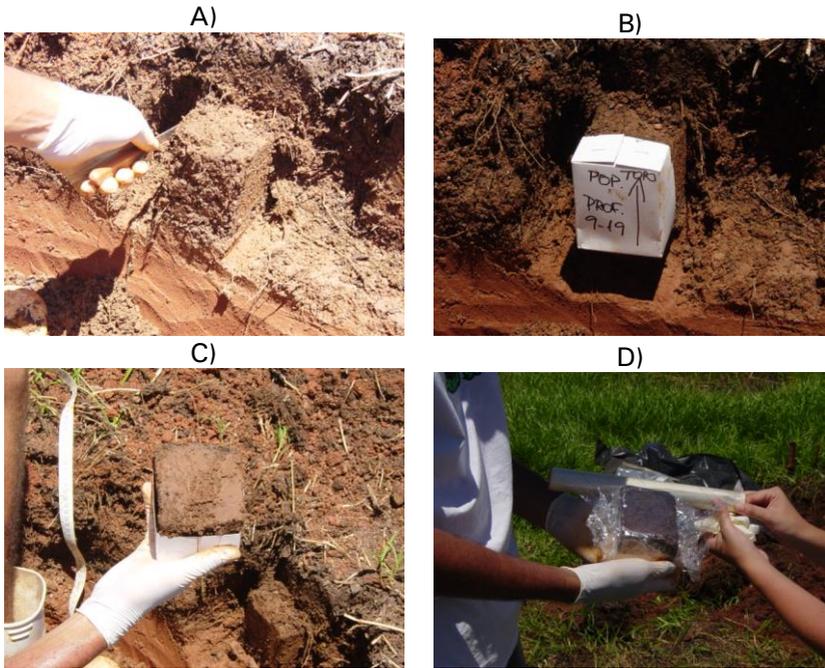
SERRA, J. **Image analysis and mathematical morphology**. London: Academic Press, 1982. 610 p.

STOOPS, G. **Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections**. Madison: Soil Science Society of America, 2003. 184 p.

STOOPS, G. Seventy years of micropedology 1938-2008: the past and future. **Journal of Mountain Science**, v. 6, p. 101-106, 2009.

VEPRASKAS, M. J.; WILSON, M. J. Soil Micromorphology: concepts, techniques, and applications. In: ULERY, A. L.; DREES, R. **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 2008. p. 191-225.

## 1.8 Anexos



**Figura 1.** Sequência de coleta de amostras de solo indeformadas. A) Amostra esculpida com faca; B) embalagem de cartolina sobre a amostra; C) retirada da amostra indeformada do perfil; D) recobrimento da amostra com filme plástico. Fotos: Miguel Cooper.



**Figura 2.** Remoção de água das amostras. A) Secagem ao ar; B) sistema de troca de água por acetona. Fotos: Miguel Cooper.



**Figura 3.** Sistema de impregnação utilizando dessecadores e vácuo. Foto: Miguel Cooper.



**Figura 4.** Capela de exaustão de ar forçada com amostras em processo de polimerização. Foto: Miguel Cooper.



**Figura 5.** Amostras impregnadas. Foto: Miguel Cooper.



**Figura 6.** Máquinas de corte e polimento. Foto: Miguel Cooper.



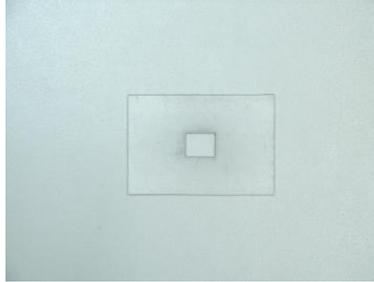
**Figura 7.** Lâminas delgadas de diferentes tamanhos: A = 3x2 cm; B = 4x3 cm; C = 7x4 cm; D = 16x9 cm. Foto: Miguel Cooper.



**Figura 8.** Blocos polidos utilizados para estudos de análises de imagens (observam-se as áreas desenhadas para aquisição da imagem). Foto: Miguel Cooper.



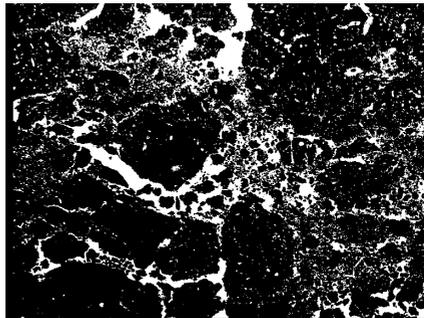
**Figura 9.** Microscópio petrográfico acoplado a um sistema de aquisição de imagens. Foto: Miguel Cooper.



**Figura 10.** Gabarito de plástico utilizado para marcar as áreas para aquisição de imagens em blocos polidos e lâminas delgadas. Foto: Miguel Cooper.



**Figura 11.** Sistema de análise de imagens com câmera fotográfica digital acoplada a uma lupa binocular. Foto: Miguel Cooper.



**Figura 12.** Imagem binária obtida após o processo de limiarização (*thresholding*). Foto: Miguel Cooper.