

Luis Antonio Bittar Venturi (organizador)

# GEOGRAFIA

Práticas de Campo, Laboratório e Sala de Aula



Coleção  
Praticando

  
EDITORA  
SARANDI

# Técnicas de Geomorfologia **2**

JURANDYR LUCIANO SANCHES ROSS

MARISA DE SOUTO MATOS FIERZ

BIANCA CARVALHO VIEIRA

Eduardo Justiniano



- Introdução, 30
- Cartografia geomorfológica como suporte técnico da pesquisa, 31
- Morfometria como técnica de análise geomorfológica, 35
- Experimentos de campo, 38
- Condutividade hidráulica, 43
- Técnicas aplicadas às áreas costeiras, 45
- Modelagem matemática na análise geomorfológica, 47
- Na sala de aula, 50
- Considerações finais, 52
- Referências de apoio, 53
- Sobre os autores, 54

## INTRODUÇÃO

A maioria das pesquisas em Geomorfologia, como em qualquer outro ramo das ciências da terra, passa por três níveis de análise, quais sejam: *trabalho de gabinete ou escritório*, *trabalho de campo* e *trabalho de laboratório*.

Os *trabalhos de gabinete* constituem-se, sobretudo, na elaboração do projeto, nas pesquisas bibliográficas, cartográficas e de dados preexistentes. Nesse rol, estão livros, artigos de revistas, jornais, teses, dissertações, arquivos de fotos aéreas, imagens de radar, imagens de satélites, arquivos de mapas topográficos e mapas temáticos de Geologia, Pedologia, Geomorfologia, Hidrografia, vegetação, usos da terra, climáticos, dentre inúmeros outros. Esses documentos podem ser qualitativos e/ou quantitativos e servem de base analítica e teórico-metodológica, bem como subsidia a parte operacional da pesquisa.

A interpretação de fotografias aéreas e imagens de satélite e radar para produzir os mapas temáticos preliminares, que serão confrontados com os dados de campo e laboratório, é outra fase importante do trabalho de gabinete.

A *pesquisa de campo*, por sua vez, processa-se de dois modos: um básico inicial, que se caracteriza pelo trabalho de observação e descrição mais precisa possível, incluindo coletas de amostras para análise laboratorial; e um segundo, marcado pelos ensaios e experimentos de campo.

Dentre as pesquisas geomorfológicas, incluindo mapeamentos e trabalhos de campo em Geomorfologia, destacam-se o trabalho desenvolvido pela divisão de recursos naturais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 1995). Trata-se de um manual técnico que oferece um roteiro sistemático para observações e descrições de fatos geomorfológicos, geológicos e pedológicos detalhados, que possibilitam apoio às pesquisas sobre o relevo e sua dinâmica pretérita e atual.

Outra obra de referência: *Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações*, organizada por Guerra & Cunha (1996) e produzida com a colaboração de vários profissionais, foi o primeiro livro de aplicação de técnicas em Geomorfologia no Brasil.

## CARTOGRAFIA GEOMORFOLÓGICA COMO SUPORTE TÉCNICO DA PESQUISA

A cartografia do relevo ganhou importância na Europa, principalmente no Leste europeu, após a Segunda Guerra Mundial, por dois principais motivos. O primeiro foi o desenvolvimento das bases tecnológicas, aviões e fotografias aéreas e, a partir da década de 1970, a utilização dos sensores remotos com plataforma em aviões a jato e em satélites, produzindo imagens de radar e satélite, que passaram a ter ampla aplicação na pesquisa dos recursos naturais, tais como: relevo, solo, rochas, água, clima, vegetação. O segundo motivo deveu-se, sobretudo, à necessidade de demonstrar a utilidade da Geomorfologia como instrumento para desenvolvimento econômico e social dos então países comunistas, com destaque para URSS, Polônia, Tchecoslováquia e Alemanha Oriental, em função dos mapeamentos dos recursos naturais e do planejamento territorial. No Brasil e na Austrália, países de grande dimensão territorial, a Geomorfologia também firmou-se com os mapeamentos geomorfológicos voltados para projetos de levantamento dos recursos naturais através do Projeto Radambrasil (Brasil – 1970/1985) e da CSIRO (a partir de 1945).

O mapa geomorfológico é um importante instrumento na pesquisa do relevo, correspondendo ao que Tricart (1965) apresentou como sendo o que constitui a base da pesquisa e não a concretização gráfica da pesquisa já feita. Ele é ao mesmo tempo o instrumento que direciona a pesquisa e, quando concluído, deve representar uma síntese como produto desta. Assim, a carta geomorfológica é indispensável na questão do inventário genético do relevo. Para tanto, ao se elaborar a carta geomorfológica é necessário:

- fornecer elementos de descrição do relevo;
- identificar a natureza geomorfológica de todos os elementos do terreno;
- datar as formas.

Para Tricart (1965) os elementos de descrição do relevo são informações que devem ser retiradas das cartas topográficas. Entretanto, estas não são suficientes, sendo necessário acrescentar informações de natureza específica que a simples carta topográfica não fornece, como, por exemplo, rupturas topográficas, rebordos de pequenos patamares. A identificação da “natureza geomorfológica dos elementos do terreno” é feita através de simbologia gráfica e é de caráter genético, pois, ao se registrar, por exemplo, um *front de cuesta*, ou uma crista sinclinal, está se fornecendo informações ligadas à gênese.

A datação das formas, ainda que relativa, é primordial para que se possa identificar o que são formas herdadas das formas vivas que continuam a se desenvolver na atualidade e, ao mesmo tempo, ajudar na explicação da gênese.

Tricart (1965), ao discutir a concepção e os princípios da carta geomorfológica detalhada, lembra que a descrição razoável dos fatos geomorfológicos representa categorias de fenômenos muito diferenciados segundo a escala adotada. Afirma que as cartas de pequena escala, em função da natureza das coisas, são orientadas para representar, sobretudo, os fenômenos morfoestruturais. Já nas cartas de escala maiores, as formas esculturais assumem maior significado. Afirma também que as cartas geomorfológicas detalhadas devem compor-se de dados de quatro naturezas diferentes:

- *dados morfométricos*: obtidos a partir de carta topográfica;
- *informações morfográficas*: que devem ser registradas através de simbologia que indique o fenômeno e sua origem, por exemplo, escarpa de falha ao invés de simplesmente escarpa;
- *dados morfogenéticos*: as formas registradas no mapa através de símbolos devem indicar sua

gênese, como terraço fluvial, planície fluviolacustre, entre outros;

➤ *cronologia*: a idade das formas também deve ser estabelecida, distinguindo-se as formas funcionais das formas herdadas (paleoformas). As paleoformas indicam os processos pretéritos, enquanto as formas atuais permitem definir o sistema morfogênético operante na região atualmente.

A cartografia geomorfológica deve mapear concretamente o que se vê e não o que se deduz da análise geomorfológica. Portanto, em primeiro plano, os mapas devem representar os diferentes tamanhos de forma de relevo, dentro da escala compatível e, em planos secundários, a morfometria, morfogênese e morfocronologia, que têm vínculo direto com a tipologia das

formas. Para a cartografia geomorfológica, são aplicados os mesmos princípios adotados para a cartografia de solos e de geologia, em que se representa o que estes temas têm de concreto, ou seja, os tipos de solos e as formações rochosas

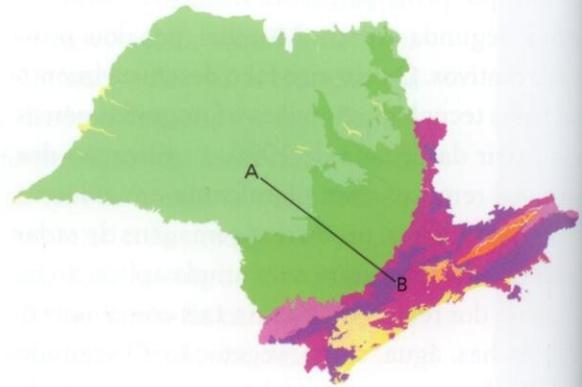


Figura 2.1. Fragmento do mapa das morfoestruturas do estado de São Paulo.

### Morfoestruturas e Morfoesculturas no Estado de São Paulo

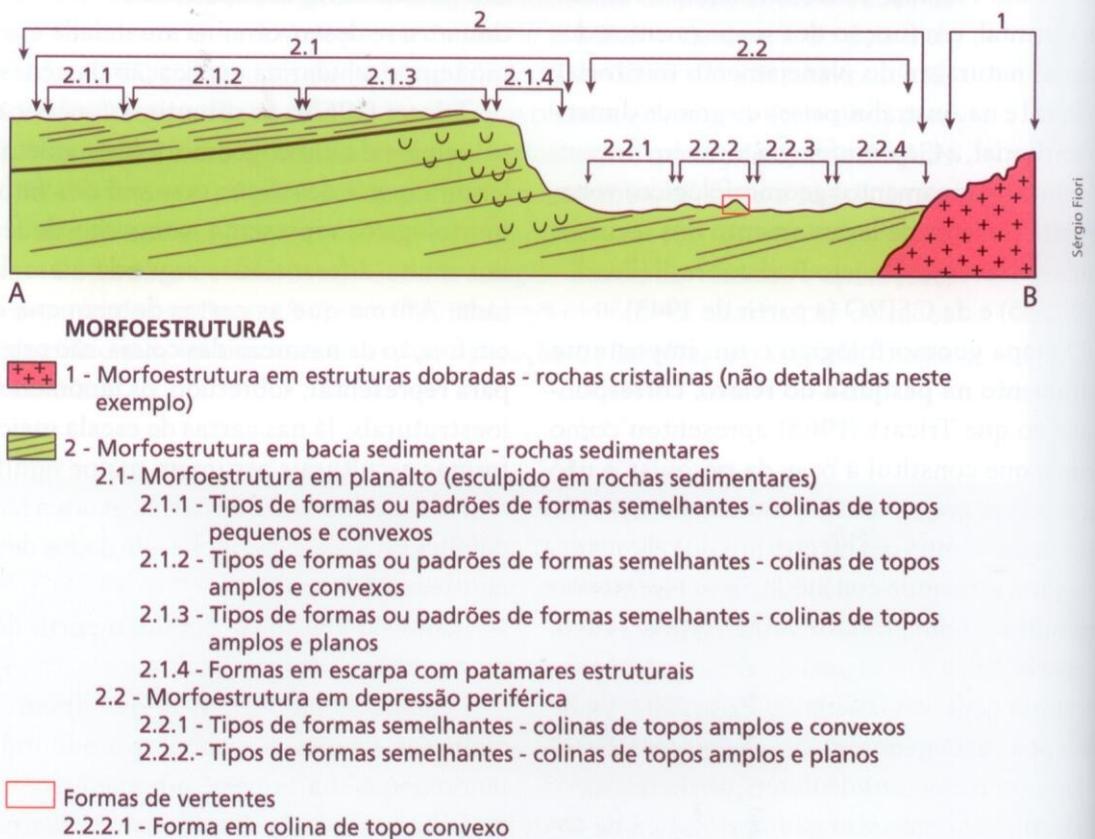


Figura 2.2. Perfil das morfoestruturas e morfoesculturas no estado de São Paulo. Fonte: Ross (2004).

para, a seguir, dar outras informações relativas à idade, à gênese e às demais características de um modo descritivo no corpo da legenda.

A cartografia e a análise geomorfológica podem seguir os pressupostos da metodologia proposta por Ross (1990 e 1992), como indicam as Figuras 2.1. e 2.2.

O primeiro táxon, que representa maior extensão em área e que corresponde às unidades morfoestruturais, é identificado em imagens de radar e satélite e controlado em trabalho de campo e por cartas geológicas. Na representação cartográfica, cada unidade morfoestrutural é identificada por cor.

O segundo táxon, referente às unidades morfoesculturais contidas em cada morfoestrutura é, do mesmo modo, identificado com o auxílio dos produtos dos sensores remotos e controlado com a investigação de campo. Essas unidades recebem identificação por diferentes tons da cor que representa a morfoestrutura. Por exemplo, se a cor verde indica uma determinada morfoestrutura, os variados tons de verde indicarão as unidades morfoesculturais contidas e pertencentes a essa morfoestrutura.

O terceiro táxon representa as unidades morfológicas ou padrões de formas semelhantes que estão contidos nas unidades morfoesculturais e correspondem às unidades em manchas de menor extensão territorial, definindo-se por conjuntos de tipologias de formas (tipos de relevo) que guardam entre si elevado grau de semelhança, quanto ao tamanho de cada forma e aspecto fisionômico. Esses padrões caracterizam-se por diferentes intensidades de dissecação do relevo ou rugosidade topográfica, por influência dos canais de drenagem temporários e perenes.

As unidades morfológicas ou padrões de formas semelhantes são de duas naturezas genéticas: as formas agradacionais (de acumulação), entre as quais estão as planícies; e as formas denudacionais, em que predomina a erosão. Podem-se seguir os procedimentos do mapea-

mento geomorfológico adotado pelo Projeto RadamBrasil, no qual as formas agradacionais recebem a primeira letra maiúscula A (de agradação) acompanhadas de outras duas letras minúsculas que determinam a gênese e o processo de geração da forma de agradação. Por exemplo: Apf – A de agradação ou acumulação; p de planície e f de fluvial. Outras formas de agradação possíveis são as planícies marinhas (Apm) e as planícies lacustres (Apl), entre outras. As formas denudacionais (D) são acompanhadas de outras letras minúsculas que indicam a morfologia do topo da forma individualizada, que é reflexo do processo morfogenético que gerou tal forma. As formas podem apresentar características de topos aguçados (a), convexos (c), tabulares (t) ou absolutamente planos (p), conforme apresentado na Tabela 2.1.

Deste modo, os conjuntos de formas denudacionais são batizados pelos conjuntos Da, Dc, Dt e Dp ou outras combinações que apareçam ao se executar o mapeamento. Esses conjuntos são acrescidos de algarismos arábicos extraídos da matriz dos índices de dissecação. Por exemplo: o conjunto Dc23 significa forma denudacional de topo convexo com entalhamento do vale de índice 2 (20 a 40 metros) e dimensão interfluvial de tamanho médio (750 a 1.750 metros). Veja a Figura 2.3, na próxima página.

O quarto táxon é representado pelas formas individualizadas que, neste caso, são indicadas no conjunto. Deste modo, a unidade morfológica ou de padrão de formas semelhantes tipo Dc33 constituem-se por formas de topos arredondados ou convexos e vales entalhados que, individualmente, caracterizam-se por morros. Assim, a forma individualizada é um morro de topo convexo, com determinadas características de tamanho, inclinação de vertentes e gerada por erosão física e química fazendo parte de um conjunto maior: o padrão de forma semelhante.

O quinto táxon refere-se às partes que compõem as formas do relevo, ou seja, das vertentes. Este táxon só pode ser totalmente repre-

Tabela 2.1 – Padrões de formas de relevo

Formas de denudação	Formas de acumulação
D – Denudação (erosão)	A – Acumulação (deposição)
Da – Formas com topos aguçados	Apf – Formas de planície fluvial
Dc – Formas com topos convexos	Apm – Formas de planície marinha
Dt – Formas com topos tabulares	Apl – Formas de planície lacustre
Dp – Formas de superfícies planas	Api – Formas de planície intertidal (mangue)
De – Formas de escarpas	Ad – Formas de campos de dunas
Dv – Formas de vertentes	Atf – Formas de terraços fluviais
	Atm – Formas de terraços marinhos

Fonte: Modificado do tema Geomorfologia do Projeto RadamBrasil/MME/SNPM (1982).

sentado cartograficamente quando se trabalha com fotografias aéreas em escalas de detalhe como 1:25.000, 1:10.000, 1:5.000, ou imagens de satélite de alta resolução espacial. Nesses casos, as vertentes são indicadas por seus diversos setores que indicam determinadas caracterís-

ticas genéticas. Assim, os setores de vertentes podem ser identificados como: escarpado (Ve), convexo (Vc), retilíneo (Vr), côncavo (Vcc), em patamares planos (Vpp), em patamares inclinados (Vpi), topos convexos (Tc), topos planos (Tp) entre outros que possam ser encontrados.

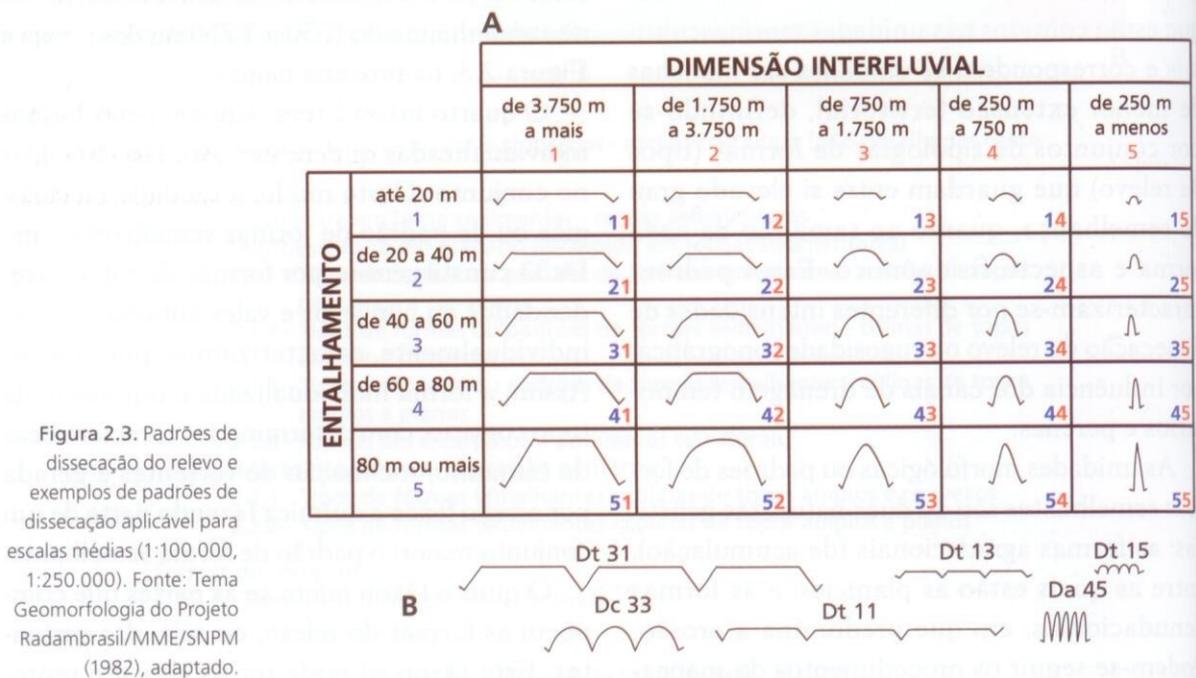


Figura 2.3. Padrões de dissecação do relevo e exemplos de padrões de dissecação aplicável para escalas médias (1:100.000, 1:250.000). Fonte: Tema Geomorfologia do Projeto RadamBrasil/MME/SNPM (1982), adaptado.

O sexto táxon corresponde às pequenas formas de relevo que se desenvolvem, geralmente, por interferência humana, ao longo das vertentes. São formas geradas pelos processos erosivos e acumulativos atuais. Nestes casos, destacam-se ravinhas, voçorocas, terracetes de pisoteio de gado, deslizamentos, corridas de lama, pequenos depósitos aluvionares de indução antrópica e bancos de assoreamento. Também se enquadram neste táxon os cortes, aterros, desmontes e outras formas produzidas pelo homem. Essas formas de relevo só podem ser representadas quando em escalas grandes, em que é possível cartografar detalhes dos fatos geomórficos indicados em fotos aéreas ou no campo.

## MORFOMETRIA COMO TÉCNICA DE ANÁLISE GEOMORFOLÓGICA

Existem vários recursos técnicos para as medidas das formas do relevo que se aplicam em mapas e também no campo (ver Figura 2.4).

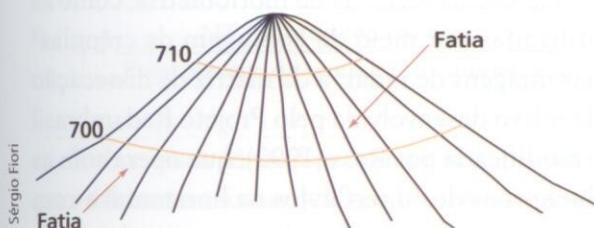


Figura 2.4. Modelo de fatiamento do relevo em carta topográfica. Fonte: De Biasi (1992), adaptado.

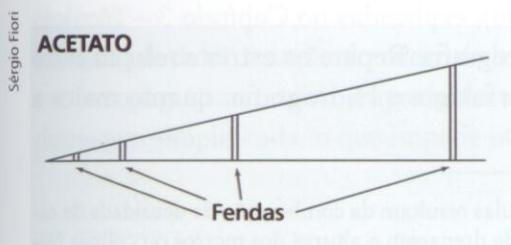


Figura 2.5. Ábacos na elaboração da carta clinográfica manual. Fonte: De Biasi (1992), adaptado.

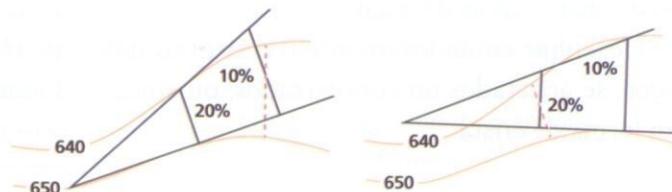
As declividades das vertentes tanto podem ser obtidas com medidas com clinômetro ou com bússola geológica no campo ou elaborando-se os mapas clinográficos, já bastante divulgados em nosso meio, sobretudo, a partir da contribuição de De Biasi (1992).

Os sistemas de informações geográficas (SIG) possibilitam a elaboração dos mapas isoclinográficos pelo processamento digital dos dados numéricos topográficos.

Os mapas clinográficos ou de declividade, bem como os perfis topográficos, *a priori*, eram elaborados manualmente, tendo como ponto de partida os mapas topográficos de diferentes escalas. Atualmente, a maioria dos pesquisadores já utiliza as técnicas de geoprocessamento para a elaboração desses mapeamentos. No entanto, costuma-se, em sala de aula, utilizar a técnica manual, porque é uma forma de se fixar conceitos e melhorar a aprendizagem com relação à interface realidade/representação das formas do relevo.

Em função da escala e da equidistância das curvas de nível ou isoípsas, monta-se o ábaco com os intervalos de declividades que se deseja representar (Figura 2.5). A partir da construção do ábaco, percorre-se com ele por entre as curvas de nível do mapa e elaboram-se a divisão dos espaços entre curvas pelos polígonos demarcáveis pelo percurso das classes de declividades estabelecidas no ábaco, conforme descreve De Biasi (1992).

Em campo, é possível fazer medição da declividade com o uso do clinômetro, equipamento que possui uma mira e no seu interior uma bolha



que auxilia na definição do ponto de equilíbrio. Quando se atinge o alvo desejado, ou seja, o topo ou a base da vertente, trava-se o clinômetro fazendo-se a leitura da declividade em graus ou em porcentagem (Figura 2.6).

Os *perfis topográficos*<sup>1</sup>, que podem reunir ao mesmo tempo forma, litologia e, dependendo da escala, os tipos de solos, são elaborados em sala de aula com a utilização de cartas topográficas (ver Figura 2.7).

Com as informações de altitude, traça-se um transecto sobre a carta topográfica, o qual pode ser retilíneo ou tortuoso. Para elaborar o perfil retilíneo, basta transferir com uma régua ou com uma tira de papel as informações desse transecto para um papel milimetrado, ajustando as distâncias de acordo com as escalas horizontal e vertical adequadas para o mapeamento.

Desta forma, destaca-se a sequência apresentada pelo IBGE (2008):

- Em um papel milimetrado, traça-se uma linha básica e transferem-se, com precisão, os sinais para essa linha.
- Levantam-se perpendiculares no princípio e no fim dessa linha e determina-se uma escala vertical.
- Seguindo-se as linhas verticais do papel milimetrado, levantando-se perpendiculares dos sinais da linha-base, marca-se a posição de cada ponto correspondente na escala vertical.

Em seguida, todos os pontos serão unidos com uma linha, evitando-se traços retos. Alguns cuidados devem ser tomados na representação do perfil:

- Iniciar e terminar com altitude exata.
- Distinguir entre subida e descida quando existir duas curvas de igual valor.
- Desenhar cuidadosamente o contorno dos picos, se achatados ou convexizados, ou ainda, em forma de crista.

1 Sobre a escala vertical, necessária à construção do perfil, consultar o Capítulo 7 – Técnicas de Cartografia.

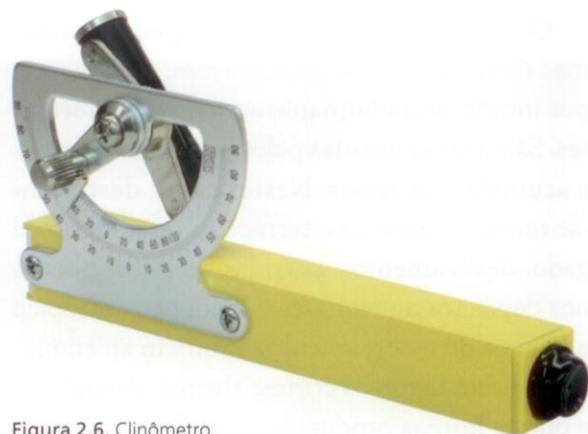


Figura 2.6. Clinômetro.

Caso o transecto elaborado seja sinuoso ou siga em direções diferentes, utiliza-se o curvímeter, que pode ser analógico ou digital. O curvímeter analógico possui uma roldana com a qual se percorre o transecto, ou o curso do rio, quando se quer elaborar o perfil longitudinal de um rio (vide Capítulo 3 – Técnicas de Hidrografia). Essa roldana está diretamente ligada a um ponteiro que gira ao mesmo tempo, indicando a distância percorrida de acordo com a escala da carta, lembrando que o curvímeter analógico possui um visor com diversas escalas; já no digital, define-se a escala anteriormente ao procedimento.

Há outras técnicas de morfometria, como as utilizadas por meio da contagem de crênulas<sup>2</sup> nas imagens de radar; a da matriz de dissecação do relevo desenvolvida pelo Projeto Radambrasil e modificada por Ross (1992), que opera com as dimensões dos interflúvios na horizontal e com os entalhamentos dos vales na vertical; as técnicas de medidas de frequência de rios (Fr) ou canais de drenagem e as de densidade de drenagem (Dd), explicadas no Capítulo 3 – Técnicas de Hidrografia. Repare na estreita relação entre Geomorfologia e Hidrografia: quanto maior a

2 Crênulas resultam da combinação da densidade de canais de drenagem e alturas dos morros ou colinas (rugosidade topográfica). Expressam-se pela textura dos alvos na imagem.

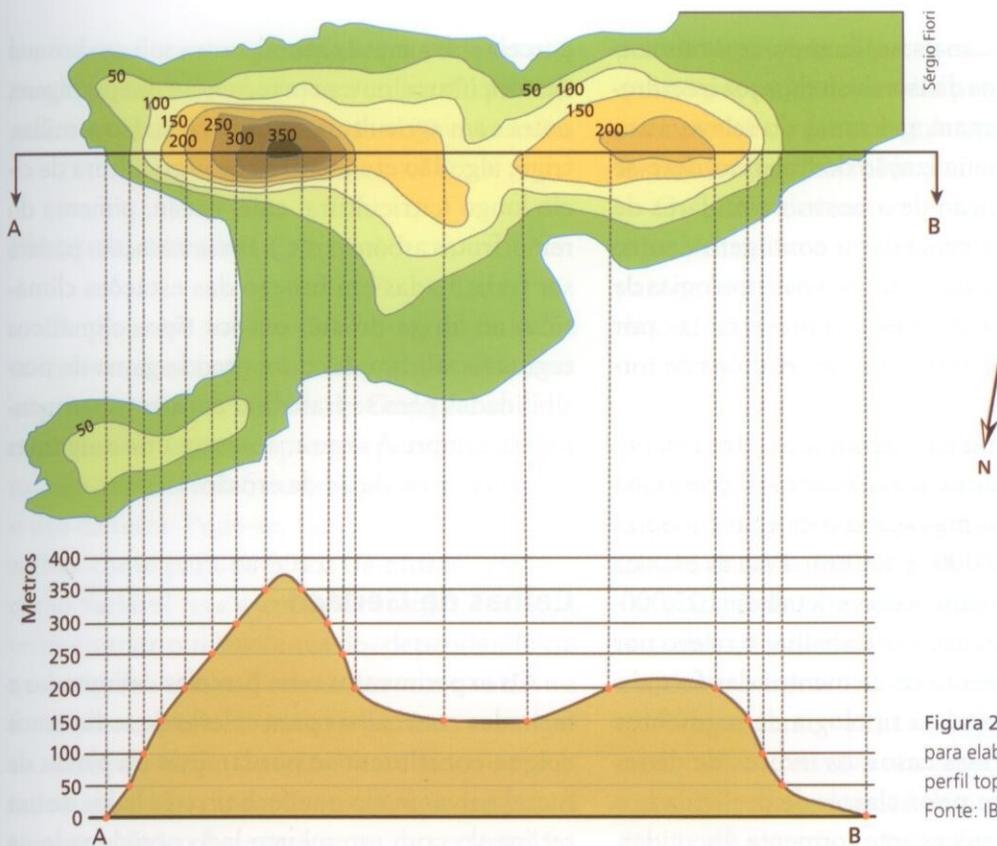


Figura 2.7. Esquema para elaboração de perfil topográfico. Fonte: IBGE (2008).

densidade de drenagem, mais dissecado tende a ser o relevo.

Outro indicador também pode ser utilizado aplicando-se a razão de textura (T) que se expressa pela fórmula:

$$T = \frac{NT \text{ (número de canais)}}{P \text{ (perímetro da bacia ou da amostra)}^3}$$

Todas essas fórmulas podem ser aplicadas para diferentes escalas de trabalho e utilizando-se diferentes sensores (imagens de radar, de satélite, fotos aéreas) ou até mesmo, de forma simplificada, utilizando-se apenas boas cartas topográficas. Entretanto, quando se trata de áreas em que a intensidade de dissecção do relevo é elevada, as cartas topográficas tendem a apresentar a rede de drenagem simplificada, o que impede utilizá-las

com exclusividade. Nesses casos, é imprescindível a utilização das fotos aéreas.

Outra situação que também dificulta a aplicação dessas medições é quando a escala é pequena, como 1:100.000 ou 1:250.000 em relevo de elevada dissecção. Nessas escalas, tanto imagens de radar quanto imagens de satélites oferecem grande dificuldade de identificação da rede de drenagem devido à sua elevada densidade. Isso praticamente torna impossível a aplicação, seja de medidas de densidade de drenagem (Dd), frequência de rios (Fr) ou razão de textura (T). Entretanto, nesses casos, pode-se aplicar a mesma fórmula de razão de textura (T), substituindo-se o número total de canais (NT) pelo número total de crênulas, ou seja:

$$T = \frac{NC \text{ (número total de crênulas)}}{A \text{ (área)}}$$

Assim, a rugosidade topográfica fica representada por meio da razão de textura em vez do

3 Para calcular o perímetro também se utiliza o curvímetro ou *software* de mapeamento.

número total de canais, utilizando-se o número total dos pequenos divisores ou espaços interdrenos, que representam as formas do relevo. Para facilitar a operacionalização do trabalho, deve-se optar pela utilização de amostras circulares de área conhecida e proceder à contagem dentro de cada amostra para cada uma das tipologias de padrão de forma do relevo representadas por "manchas" pré-identificadas de "padrões de formas semelhantes".

Essas propostas de mensuração para estabelecimento dos índices de dissecação do relevo são mais apropriadas para escalas pequenas e médias (1:250.000, 1:100.000, 1:50.000). Para as escalas maiores que ressaltam maiores detalhes (1:25.000, 1:10.000, 1:5.000) deve-se trabalhar o relevo por meio do mapeamento de elementos das formas, ou seja, identificando a tipologia de segmentos de vertentes. Nesses casos, os índices de dissecação serão dados pelas classes de declividade e não mais pelas técnicas anteriormente discutidas.

## EXPERIMENTOS DE CAMPO

Entre os experimentos mais utilizados em campo estão as parcelas para medir erosão dos materiais particulados dos solos pela ação mecânica das águas das chuvas.

Esses experimentos devem ser instalados em diferentes condições de relevo, solos e cobertura vegetal para que os dados possam ser comparados. Deve-se sempre tomar variáveis fixas e promover a variação das demais. Por exemplo, toma-se como variáveis fixas a morfologia da vertente, a declividade uniforme do setor da vertente escolhida e o tipo de solo, como, por exemplo, uma vertente côncava, com declividade de 20% e solo de textura média (argiloarenosa). Os experimentos são instalados nos terrenos que tenham essas características de relevo e solo e os sítios devem variar em função da cobertura vegetal e do uso da terra. Pode-se instalar uma

parcela sob a mata natural, outra sob um bosque de silvicultura, outra em terrenos com pastagem, outra com agricultura de ciclo curto (soja, milho, trigo, algodão etc.), outra com agricultura de ciclo longo (citricultura, café, cacau, pimenta do reino, frutas arbóreas etc.). Essas variações podem ser trabalhadas em função das estações climáticas ao longo do ano ou dos tipos climáticos regionais. Enfim, há uma grande gama de possibilidades para se trabalhar com os experimentos de campo. A seguir, apresentam-se algumas técnicas de medição de erosão.

### Calhas de Gerlach

Os experimentos com parcelas delimitadas e fechadas com calhas para coletas de sedimentos e água constituem-se por lâminas ou placas de metal galvanizado que fecham três lados de um retângulo com um quarto lado posicionado na parte mais baixa da área de amostragem, onde se instala a calha coletora, também construída por lâmina de ferro. A calha, por sua vez, é conectada a tambores por saídas laterais de água, conforme a Figura 2.8. O trabalho do pesquisador e seus auxiliares é coletar, a cada chuva, o volume de água e sedimentos armazenados na calha e nos tambores, medindo-os, secando-os e pesando-os em balança de precisão.

Importante lembrar que ao lado do experimento é preciso instalar um pluviômetro ou pluviógrafo para se ter simultaneamente os dados sobre o volume das chuvas que ocorrem no episódio que transportou aquela quantidade de sedimentos contidos nas águas da calha e dos tambores. Esse procedimento deverá ser feito permanentemente ao longo de toda a fase de experimentação, que poderá ser de pelo menos um ano, para se ter melhor percepção da dinâmica processual em função dos períodos chuvosos e secos.

Se, ao final de um experimento, constatar-se que a parcela instalada em uma cultura X acumu-

lou mais sedimentos que aquela instalada em cultura Y, pode-se concluir que a cultura Y protege mais o solo e a X o deixa mais suscetível à erosão.

## Pinos de erosão

Os pinos de erosão devem ser instalados utilizando-se os mesmos critérios adotados para as parcelas com as calhas de Gerlach, ou seja, escolhem-se os sítios para experimentação e tomam-se variáveis fixas (relevo, solo) variando o uso da terra. Pode-se, também, tanto para as calhas como para os pinos de erosão, utilizar como variável fixa a cobertura vegetal/uso da terra e variar o relevo e o solo, dependendo do que se queira testar. Pode-se ter como variáveis fixas, por exemplo, o relevo e a cobertura vegetal, variando o tipo de solo. Neste caso, o resultado indicará qual tipo de solo é mais suscetível à erosão. Variando-se as formas de vertente, irá se concluir pelas formas mais instáveis, e assim por diante (ver Figura 2.9).

A quantidade e a distribuição dos pinos de erosão nos sítios de experimentação pode ser variável, mas acredita-se que é sempre bom dis-

por de alguns pinos por área, mais que três ou quatro por unidade de área preestabelecida. Por exemplo: cinco pinos regularmente distribuídos instalados em dois metros quadrados.

Os pinos devem ser graduados de um em um centímetro e introduzidos no solo por impacto até atingir certa medida, igual para todos. A partir disso, monitora-se ao longo de um tempo preestabelecido (dias, meses, ou um ano), verificando-se o quanto a erosão retirou sedimentos, pela maior exposição dos pinos na superfície. Pode-se também utilizar esta técnica para verificar se houve acúmulo de sedimentos (fundo de vale, por exemplo), quando os pinos são gradativamente encobertos. O rebaixamento ou a elevação do terreno são medidos sempre em centímetros (graduação dos pinos).

É importante verificar o comportamento do rebaixamento erosivo nos espaços entre os pinos e nos mais afastados destes, porque há uma tendência da ação de turbilhonamento da água ao redor de cada pino e isso promove mais erosão do que nas partes nas quais não há pinos. Esse procedimento pode ser executado com uma linha nivelada nos topos dos pinos e medindo-se ao longo dela a altura da mesma em relação à

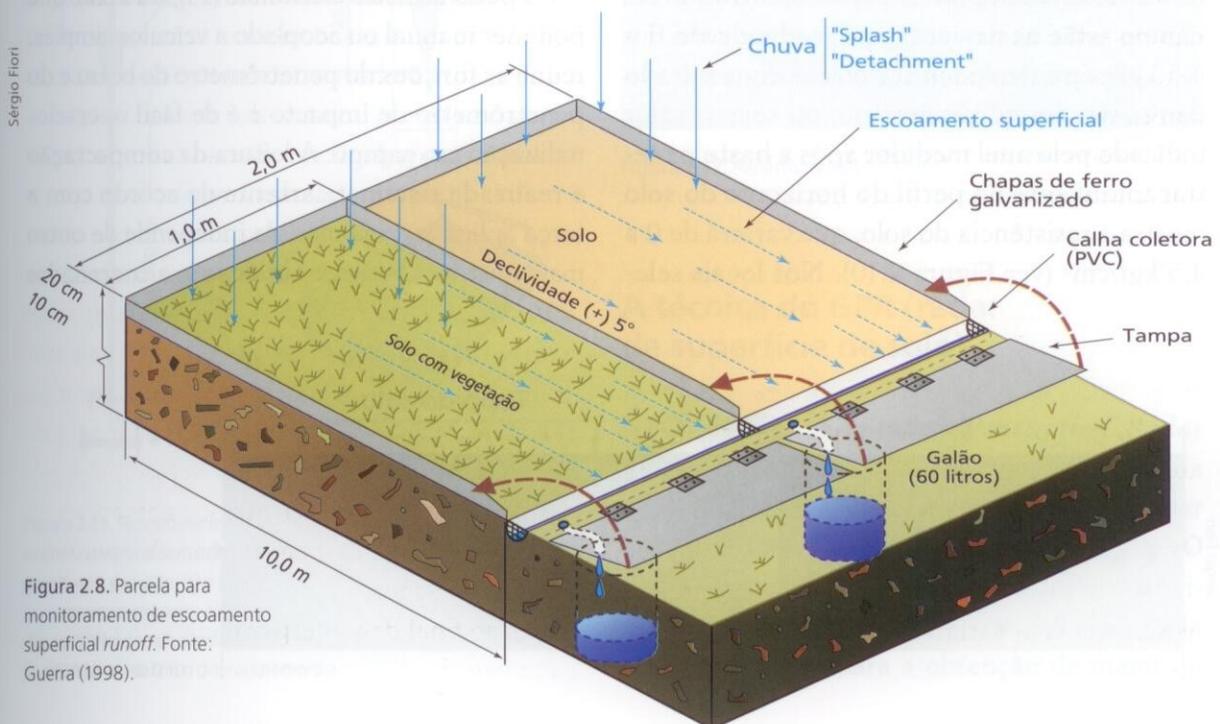


Figura 2.8. Parcela para monitoramento de escoamento superficial runoff. Fonte: Guerra (1998).

superfície do terreno em vários pontos. Após as medidas, extrai-se o valor médio das alturas, do qual se subtrai o valor inicialmente deixado para cima da superfície do terreno, quando os pinos foram fixados.

## Penetrômetros

Os testes com penetração de hastes metálicas servem para medir o grau de resistência que os solos oferecem à penetração sob impacto ou sob pressão. Esses testes indicam o estado de compactação em que os solos se encontram e são usualmente utilizados em área de agricultura, por engenheiros agrônomos, para medir a compactação dos solos em áreas agrícolas. Os valores são dados por  $\text{kgf}/\text{cm}^2$  e podem ser aplicados utilizando-se aparelhos denominados *penetrômetro portátil* ou *de bolso*, *penetrômetro de impacto* e *penetrômetro eletrônico*.

O penetrômetro portátil é normalmente utilizado para medir a resistência dos horizontes dos solos em cortes (ver Capítulo 4 – Técnicas de Pedologia), perfis ou em trincheiras com penetração horizontal. O uso desse equipamento é bastante simples: o penetrômetro portátil tem uma haste metálica graduada de 0 a 4,5  $\text{kgf}$  oferecendo leitura direta do resultado da resistência de penetração, ou seja, o valor indicado pelo anel medidor após a haste penetrar totalmente no perfil do horizonte do solo mostra a resistência do solo, que variará de 0 a 4,5  $\text{kgf}/\text{cm}^2$  (ver Figura 2.10). Nos locais sele-

cionados para se executar as medições, deve-se fazer várias medidas (em torno de cinco) para cada horizonte de solo. Esse procedimento é necessário para avaliar a tendência comportamental da resistência de cada horizonte de solo, de cada um dos lugares selecionados para as medições.

Os testes com o *penetrômetro de impacto* são efetuados aplicando-se verticalmente a haste metálica que recebe impactos de 4  $\text{kg}$  de um cilindro de aço, que se desloca por 40  $\text{cm}$  apoiado em vareta metálica, conforme ilustra a Figura 2.11. Esse equipamento, desenvolvido por pesquisadores do antigo Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), é conhecido pelo nome de seu criador: *penetrômetro de Stolf*. A haste metálica tem comprimento de 70  $\text{cm}$  e imprimem-se quantos impactos forem necessários para fazer penetrar a haste até o limite do comprimento da mesma. A haste é graduada de 10 em 10  $\text{cm}$ , e deve-se contar quantos impactos são necessários para penetrar cada 10  $\text{cm}$ . Deve-se proceder vários ensaios (no mínimo três) em cada local escolhido para os testes. Os testes devem ser efetuados com o solo úmido, portanto, no período chuvoso de verão.

O penetrômetro eletrônico (Figura 2.12), que pode ser manual ou acoplado a veículos simples, reúne as funções do penetrômetro de bolso e do penetrômetro de impacto e é de fácil operacionalização em campo. A leitura da compactação é realizada sistematicamente de acordo com a força aplicada, cuja medida independe de outro instrumento. Os dados obtidos são armazenados

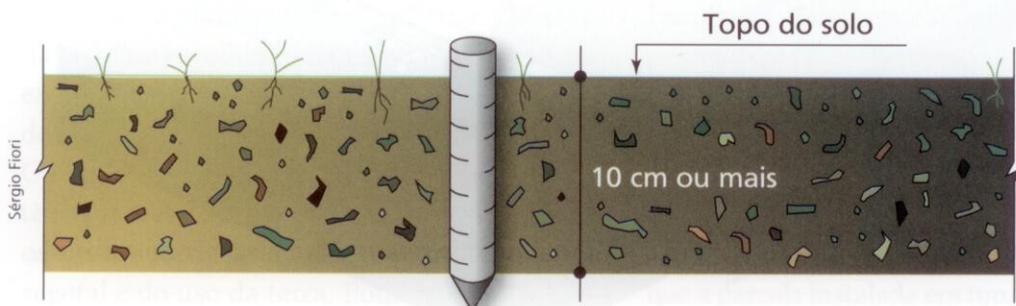


Figura 2.9. Pino de erosão visto em perfil. Fonte: Guerra (1996).



Figura 2.10. Penetrômetro portátil.

automaticamente em um computador acoplado ao equipamento.

Os dados obtidos com os penetrômetros podem ser trabalhados com métodos estatísticos simples tabulados em *softwares* especializados, por exemplo, em planilhas (tabelas) para elaboração de gráficos, os quais permitirão a análise das evidências e das diferenças de resultados das

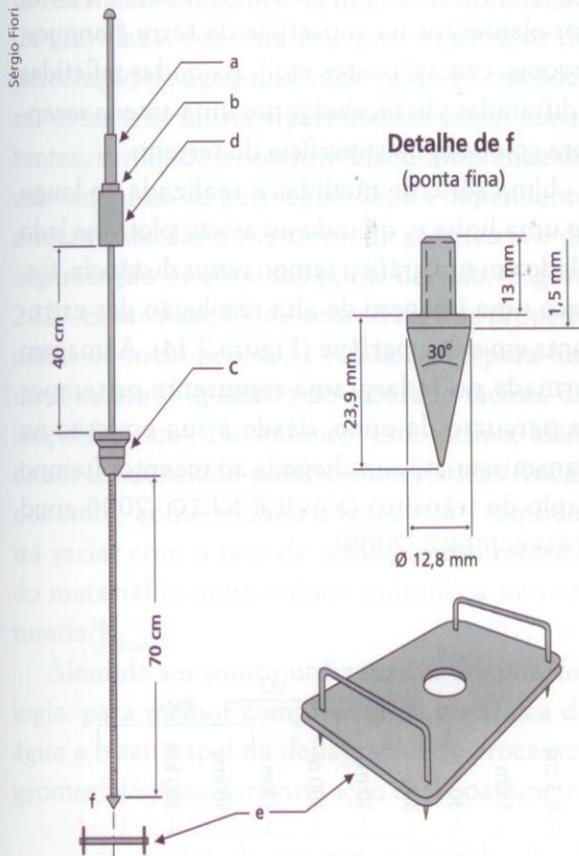


Figura 2.11. Penetrômetro de impacto: a) luva móvel para o operador manter na vertical sem interferir na força resultante durante a penetração da haste; b) e c) limitadores superior e inferior; d) peso que provoca o impacto; e) chapa para ser fixada na superfície do solo, dando o nível de referência da leitura de profundidade; f) ponta.

Fonte: Manual técnico do equipamento.

medições de um mesmo lugar (ponto) e as diferenças entre outros pontos mensurados. Pode-se ainda aplicar testes estatísticos para verificar o desvio-padrão entre os resultados das medições aplicadas. Os resultados gerais devem ser correlacionados com os tipos de relevo, solo, e coberturas vegetais para avaliar as diferenças de resultados comportamentais. A maior ou menor resistência do solo pode representar maior susceptibilidade à erosão, o que evidencia, desta vez, a estreita relação entre Pedologia e Geomorfologia.



Figura 2.12. Penetrômetro eletrônico.

## A técnica do GPR (radar de superfície de solo)

O sistema *Grounded Penetrating Radar* (GPR) consiste em adquirir informações da subsuperfície da Terra com um sensor de radar que tem a capacidade de rastrear o subsolo. O alcance, que pode chegar a 50 m de profundidade, depende do tipo de antena que se acopla ao equipamento para a obtenção de maior ou

menor profundidade, bem como de resolução na diferenciação das camadas de deposição de material sedimentar.

Essa técnica pode auxiliar na obtenção das informações do subsolo, quando na Geomorfologia leva-se em consideração que as formas estão diretamente ligadas ao tipo de material que as sustenta. Assim, o GPR é utilizado para determinar o comportamento e o tipo de material, bem como sua disposição na subsuperfície do relevo.

O GPR é uma técnica geofísica que utiliza ondas eletromagnéticas na faixa de VHF/UHF irradiadas por uma antena emissora colocada na superfície do solo (XAVIER NETO, 2006 apud MATOS FIERZ, 2008), conforme Figura 2.13. Essa é a técnica geofísica mais indicada para investigações rasas, pois tem gerado excelentes resultados de alta precisão em certos tipos de ambientes geológicos, com vasta aplicação em estudos de áreas costeiras (GANDOLFO et al., 2001 apud MATOS FIERZ, 2008). A alta resolução das imagens permite mais detalhes das heterogeneidades da geologia (PESTANA & BOTELHO, 1997 apud MATOS FIERZ, 2008).

De acordo com Pestana e Botelho (1997), a técnica do GPR é, em princípio, bastante similar às técnicas de sísmica de refração e de sonar (ver Figura 2.13). No caso do GPR, um pulso de energia eletromagnética de alta frequência (10-1.000 MHz) para investigações detalhadas

de porções rasas do subsolo é enviado através do solo por meio de uma antena transmissora Tx. O sinal emitido sofre reflexões e difrações em descontinuidades presentes no meio de propagação e é, então, captado ao retornar à superfície por uma antena receptora, Rx (GANDOLFO et al., 2001 apud MATOS FIERZ, 2008).

De acordo com Xavier Neto (2006 apud MATOS FIERZ, 2008), a transmissão do sinal do GPR depende das propriedades elétricas do meio, sobretudo condutividade e permissividade elétrica, sob condições de alta frequência. Essas propriedades sofrem forte influência do conteúdo de água presente no solo. O pulso eletromagnético gerado em superfície é refletido e difratado, tanto pelas estruturas geológicas e feições anômalas, que podem estar presentes no terreno, quanto por elementos na superfície da terra (tanques, árvores, cercas, postes etc.). As ondas refletidas e difratadas são recebidas por uma antena receptora colocada na superfície do terreno.

Uma série de medidas é realizada ao longo de uma linha e, quando estas são plotadas lado a lado em um gráfico tempo *versus* distância, fornece uma imagem de alta resolução das estruturas em subsuperfície (Figura 2.14). A imagem formada no radargrama representa os tempos de percurso da onda, desde a sua emissão no transmissor até sua chegada ao receptor (tempo duplo de trânsito) (XAVIER NETO, 2006 apud MATOS FIERZ, 2008).

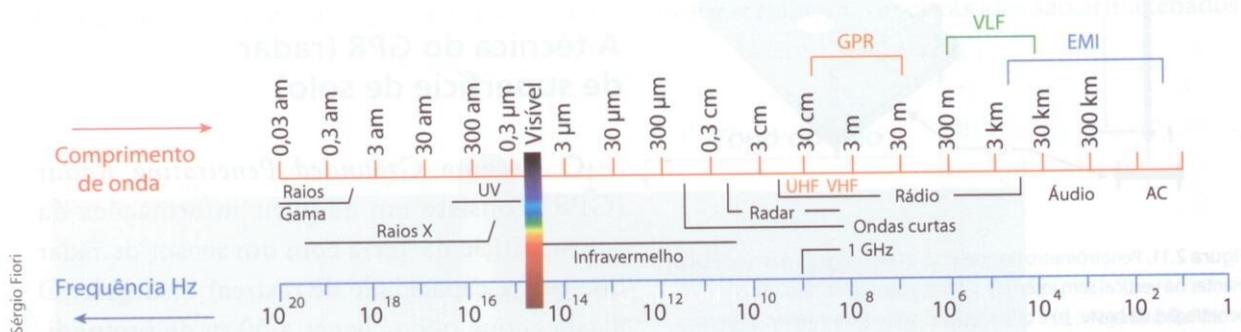


Figura 2.13. Espectro eletromagnético situando as faixas de frequências de trabalho de diversas tecnologias. O GPR trabalha com frequências entre 10 MHz e 1 GHz, correspondendo a comprimentos de onda de ordem de 30 m a 0,3 m, respectivamente. Fonte: Xavier Neto (2006).

## CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A condutividade hidráulica ( $K$ ) representa a habilidade com que um fluido é transportado em um meio poroso. Em ambientes tropicais úmidos, muitos processos geomorfológicos, tais como erosão e movimentos de massa, são responsáveis pela modelagem e evolução do relevo, possuindo uma estreita relação com a variabilidade espacial desse parâmetro. Assim, conhecer o comportamento da condutividade hidráulica dos solos, em uma paisagem suscetível a tais processos, torna-se uma importante ferramenta para o conhecimento da dinâmica do relevo.

Essa propriedade depende diretamente da permeabilidade dos solos, da viscosidade do fluido, da massa específica da água e da aceleração da gravidade. No entanto, para os estudos de percolação da água nos solos, pode-se considerar estes três últimos parâmetros como constantes, tornando a condutividade hidráulica do solo sinônimo de permeabilidade e dependente diretamente das dimensões, da geometria e da organização interna dos poros do solo (Figura 2.15). Essa variação, de acordo com as propriedades do meio poroso, é válida tanto para um meio saturado quanto não saturado (acima do lençol freático). No entanto, este último, além de ser influenciado pelas características físicas dos solos, como textura e estrutura<sup>4</sup>, também irá variar com o teor de umidade volumétrica do material (condutividade hidráulica não saturada/ $K_{nsat}$ ).

Além de ser muito utilizada na Geomorfologia, para melhor compreender a dinâmica da água e o seu papel na deflagração de processos geomorfológicos, a mensuração desse parâmetro

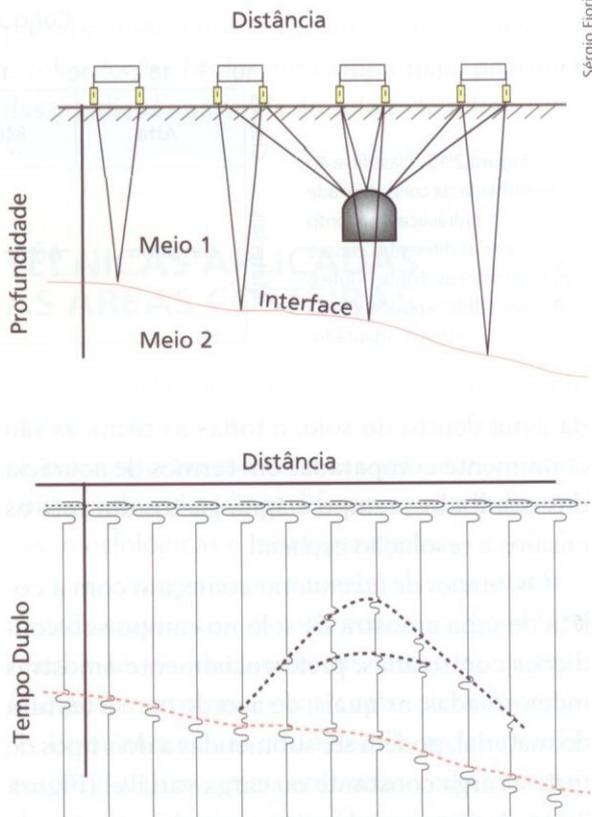


Figura 2.14. Princípio de formação da imagem no GPR.  
Fonte: Xavier Neto (2006).

é fundamental durante a construção e a manutenção dos aterros sanitários, por exemplo. Nessas áreas são feitas medidas de condutividade hidráulica nas camadas “impermeabilizantes”, com o objetivo de verificar e garantir valores muito baixos (entre  $10^{-7}$  cm/s e  $10^{-9}$  cm/s), impedindo ou até mesmo evitando que o fluxo dos resíduos líquidos, provenientes da decomposição das camadas de lixo sobrejacentes, contamine os solos e o lençol freático.

### Técnicas de mensuração

A condutividade hidráulica saturada e não saturada dos solos pode ser estimada por meio de técnicas realizadas *in situ* e em laboratório. A efetividade da técnica depende das limitações da teoria proposta para descrever o movimento

4 Veja o Capítulo 4 – Técnicas de Pedologia. Atente também para o Capítulo 3 – Técnicas de Hidrografia. As inter-relações entre os capítulos reforçam a ideia da paisagem geográfica como resultado da integração de seus componentes (solo, relevo, água, vegetação, clima, substrato e ação antrópica).

Condutividade Hidráulica (cm/s) – Água a 20°C

	10 <sup>1</sup>	10 <sup>0</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>
Classes	Alta		Média			Baixa	Muito Baixa		Praticamente Impermeável		
Materiais	Cascalho		Areia		Areia Fina	Argilo-Arenoso	Argilas Estruturais		Argilas Homogêneas		
	Silte Mistura de Areia, Silte e Argila										

Figura 2.15. Classificação aproximada da condutividade hidráulica de acordo com as diferentes classes granulométricas. Fonte: Klute e Dirksen (1986) apud Stephens (1996), adaptado.

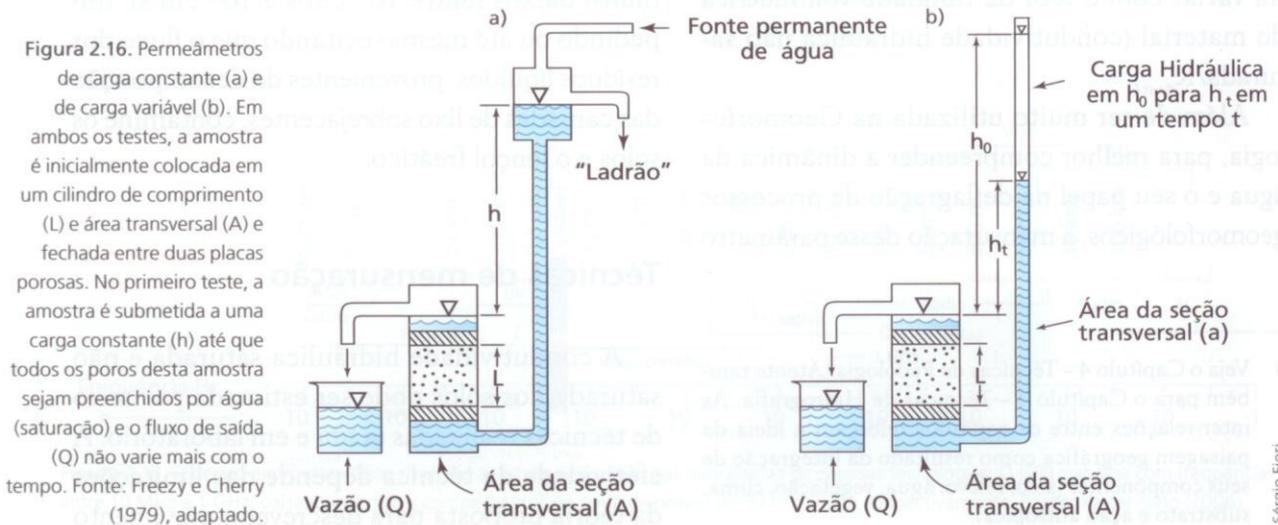
da água dentro do solo, e todas as técnicas são comumente comparadas em termos de acurácia dos resultados, tempo e água gastos durante os ensaios e resolução espacial.

Os ensaios de laboratório começam com a coleta de uma amostra de solo no campo sob condições controladas, preferencialmente amostras indeformadas, as quais, de acordo com a textura do material, podem ser submetidas a dois tipos de testes: carga constante ou carga variável (Figura 2.16). A principal desvantagem dos ensaios de laboratório consiste em sua pequena representatividade espacial devido ao tamanho da amostra, que poderá não englobar algumas estruturas do solo, como macroporos, raízes, fendas e feições reliquiais, que estão diretamente relacionadas aos valores da condutividade hidráulica.

Quanto às medidas de campo para estimar condutividade hidráulica saturada de campo

( $K_{sat}$ ), existem vários tipos, dentre eles os ensaios de poços, bastante utilizados pela Geologia de Engenharia. Tais ensaios podem ser realizados por meio da aplicação de cargas constantes e variáveis e também por meio do bombeamento (descarga) de água. No ensaio de infiltração (carga), inicialmente, abre-se um poço até o horizonte de solo desejado, preenchendo-o com água e mantendo o nível de carga constante dentro do poço. A partir daí, faz-se uma leitura da vazão durante um determinado tempo, até que esta se torne constante, sendo esse valor utilizado no cálculo final da  $K_{sat}$ .

A estimativa da condutividade hidráulica não saturada ( $K_{nsat}$ ) também pode ser realizada tanto no campo quanto em laboratório, sendo que seu valor estará associado ao conteúdo de água do meio e à carga de pressão estabelecida na amostra, mensurada por meio de tensiômetros. As técnicas utilizadas para mensurar a conduti-



vidade hidráulica não saturada ( $K_{nsat}$ ) no campo podem ser realizadas por meio de cargas constantes ou variáveis. Nesses ensaios, um fluxo de água constante (ou variável) é aplicado no solo até que o perfil se apresente em equilíbrio. Assim, a condutividade hidráulica não saturada é calculada pela relação entre a taxa de volume constante e o gradiente hidráulico mensurado na amostra (STEPHENS, 1996).

### Permeâmetro de Guelph

O permeâmetro de Guelph (PG) é um tipo de permeâmetro de carga constante que mede a condutividade hidráulica saturada de campo ( $K_{sat}$ ) acima do lençol freático. Foi desenvolvido por Reynolds et al. (1983) na Universidade de Guelph (Canadá). Basicamente, ele é composto por uma garrafa de Mariotte, que controla o nível constante de água dentro do furo; um tubo de acrílico no qual a água é introduzida; e um tripé que pode ser adaptado para altas declividades (Figura 2.17). Na extremidade inferior do tubo de acrílico, a água é distribuída no solo através de uma ponta perfurada que é preenchida com areia fina para reduzir a turbulência do fluxo de saída do permeâmetro durante a recarga de água.

O sistema de funcionamento do PG consiste na aplicação de uma carga constante de água ( $H$ ) em um furo de raio determinado ( $a$ ), medindo-se, em intervalos de tempo ( $t$ ) constantes, o caimento do nível de água ( $R$ ), que passa em uma determinada área transversal ( $A$ ) do tubo de acrílico graduado, ou seja, medindo-se o fluxo  $Q$ . Depois de determinado período, que dependerá, dentre outros fatores, da umidade antecedente do solo e da sua textura, uma pequena área em torno do furo estará saturada (bulbo saturado) e o fluxo  $Q$  ficará constante. Este mesmo valor é inserido no cálculo da condutividade hidráulica dos solos. O permeâmetro de Guelph destaca-se frente aos menores volumes de água utilizados em cada ensaio, a maior

portabilidade e uso em locais de difíceis acessos e aos valores obtidos em campo mais próximos das condições naturais do solo e do relevo.

## TÉCNICAS APLICADAS ÀS ÁREAS COSTEIRAS

As técnicas de análise geomorfológicas aplicadas às regiões litorâneas são, em grande parte, diferenciadas das técnicas aplicadas às áreas continentais, devido às diferenças morfodinâmicas, morfológicas e morfogenéticas.

As áreas costeiras encontram-se na interface de três ambientes: o continental, o marinho e o atmosférico, enquanto nas terras interiores a interação ocorre mais entre atmosfera-litosfera.

Entre as técnicas de análise da geomorfologia costeira, algumas mais utilizadas podem ser destacadas. Na pesquisa voltada para análise granulométrica de amostras de areias, por exemplo, a técnica utilizada é a descrita a seguir.

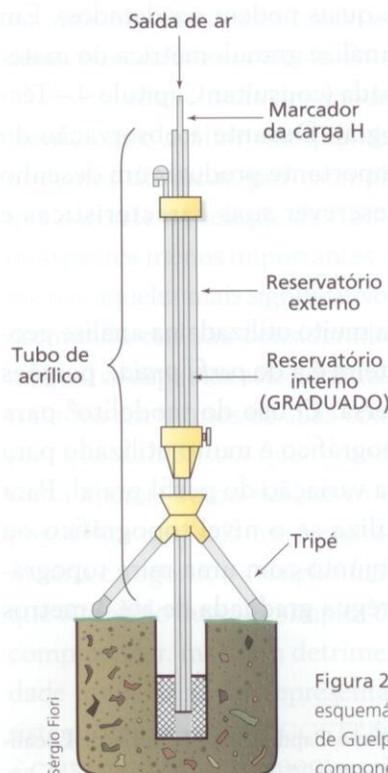


Figura 2.17. Desenho esquemático do permeâmetro de Guelph e seus principais componentes.

➤ *Coleta em campo.* Para coleta do material em campo, é necessário abrir trincheiras no sentido transversal à praia para identificar as camadas de sedimentação, como apresenta Muehe (1996). Pode-se aproveitar as trincheiras para estudar, desenhar, fotografar a disposição dos estratos com a possibilidade de identificação dos paleo-ambientes de rio, dunas e praias. Se o objetivo principal da pesquisa for apenas identificar a granulometria do material, então não será necessário preservar as camadas. Caso contrário, é necessário utilizar um tubo de PVC ou de alumínio para testemunhar (coletar) a amostra. O tamanho do tubo vai depender da profundidade que se deseja atingir.

➤ *Em laboratório.* As amostras coletadas em testemunhos precisam ser congeladas no tubo para que, no momento da abertura do mesmo, as camadas não se desfaçam. O tubo deve ser partido ao meio para facilitar a observação das camadas, porque as laterais junto a ele ficam alteradas e há migração de material. Após a abertura do testemunho, inicia-se a observação visual dos padrões de textura, cor, estrutura, presença de materiais biotétricos (os quais podem ser datados). Em seguida, faz-se análise granulométrica do material de cada camada (consultar Capítulo 4 – Técnicas de Pedologia). Durante a observação do testemunho é importante produzir um desenho com escala e descrever suas características e fotografá-lo.

Outra técnica muito utilizada na análise geomorfológica costeira é a do *perfil praiial*, porções emersa e submersa. O uso do teodolito<sup>5</sup> para nivelamento topográfico é muito utilizado para determinação da variação do perfil praiial. Para esta técnica, utiliza-se o nível topográfico ou teodolito em conjunto com uma mira topográfica, espécie de régua graduada de até 4 metros

5 Consultar também o Capítulo 10 – Técnicas de Localização e Georreferenciamento.

de altura que possibilita a visualização com o teodolito. Segundo Muehe (1996), o nivelamento é feito medindo-se a diferença de altura entre o nível, ou teodolito cuja altura é previamente determinada, e a superfície do terreno ao longo do perfil.

As distâncias entre os pontos de amostragem são predeterminadas e podem ser medidas em campo com uma trena ou, ainda segundo Muehe (1996), as medidas de distância podem ser feitas por leitura ótica por meio do *método de estadimetria*<sup>6</sup>.

Outra técnica mais simples de determinação do perfil praiial ou *perfil subaéreo* citado por Muehe (1996, p. 224) é a *técnica das balizas de Emery*, que consiste em duas balizas de 1,5 m de altura, pintadas em faixas de cores alternadas, com largura de 2 cm. A medida se dá pela diferença entre dois pontos, ao longo do perfil, determinada pelo observador da baliza de ré, sendo obtida pela projeção de uma linha imaginária que liga a linha do horizonte com o topo da baliza mais baixa. A diferença de altura é determinada por contagem das faixas de 2 cm pintadas nas balizas e permite uma aproximação de até 1 cm, precisão suficiente para esse tipo de ambiente. A distância horizontal, entre as balizas, é medida com uma trena, tal como mostra a Figura 2.18.

Os dados obtidos com as medições em campo podem ser anotados em forma de tabela e transferidos para uma planilha eletrônica, o que

6 "O método é baseado na semelhança de triângulos, em que a relação entre a distância focal (altura do triângulo) e a distância entre duas marcações (retículos) na ocular do nível do teodolito (base do triângulo) serve para a determinação da distância entre o aparelho e a mira. Para isso, basta determinar a altura da base do novo triângulo na posição da mira através da diferença das leituras na mira, do retículo superior e inferior. Esta diferença, multiplicada por 100, que é a relação distância focal/base do triângulo na ocular, fornece a distância em metros. Equipamentos topográficos modernos permitem a determinação de distâncias por emissão e recepção de ondas eletromagnéticas na faixa do infravermelho, mas são de custo relativamente elevado" (MUEHE, 1996, p. 224).

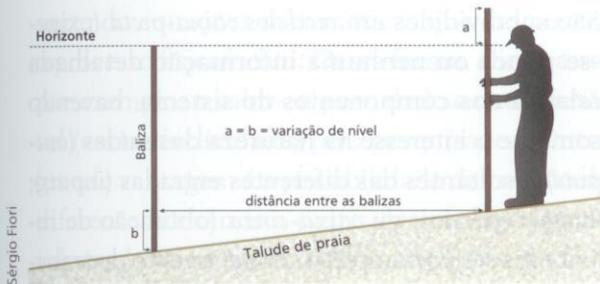


Figura 2.18. Balizas de Emery. Fonte: Komar, Paul D. (1998).

possibilita a elaboração de gráficos. Os gráficos dotados com as cotas de altitude e distância mostram o perfil da praia. Observe que o mesmo pode ser feito para qualquer perfil, praiado ou não.

Para a determinação do perfil da região submersa adjacente ou continuação do perfil de praia, é necessária a utilização de um equipamento chamado ecobatímetro acoplado a um barco, assim como explica Muehe (1996, p. 228). Para tanto, é preciso fazer uma calibragem do aparelho no ponto em que se encerrou a medição do perfil praiado com o método de estadimetria. As leituras angulares são feitas em intervalos de tempo constante, por exemplo, de 3 em 3 minutos, sendo o instante da leitura transmitida via rádio para a embarcação, quando o operador do ecobatímetro efetua uma marcação no perfil com registro do horário da leitura.

## MODELAGEM MATEMÁTICA NA ANÁLISE GEOMORFOLÓGICA

Durante a chamada Revolução Quantitativa e Teorética ocorreram importantes transformações na tentativa de incluir a Geografia no contexto científico global por meio de maior rigor na aplicação da metodologia científica, do desenvolvimento de teorias, do uso de técnicas estatísticas e matemáticas, da abordagem sistêmica e do uso de modelos. Um exemplo desta revolução é o

questionamento do “modelo” de ciclo de erosão, desenvolvido por William Morris Davis, que passou a ser testado por meio de diferentes técnicas e pelo desenvolvimento de outros modelos da evolução da paisagem, que tentam, dessa forma, conhecer e explicar as variáveis envolvidas neste sistema (CHRISTOFOLETTI, 1985).

### Modelos: conceitos e principais características

Modelo pode ser definido como sendo uma estruturação simplificada do funcionamento de um aspecto do mundo real, sendo uma aproximação altamente subjetiva, porque não inclui todas as observações ou medidas associadas, podendo obscurecer detalhes acidentais e destacar somente os aspectos fundamentais da realidade (HAGGETT & CHORLEY, 1967). A definição de modelo pode também contemplar a sua relação com a teoria, uma vez que é uma formalização e/ou estruturação simplificada de uma teoria que pode, por sua vez, ser representada por um ou mais modelos, permitindo a manipulação de deduções complexas (HARVEY, 1969).

As características dos modelos possibilitam identificar e avaliar sua qualidade. Dentre elas podemos destacar, por exemplo, a *seletividade*, que consiste na seleção das informações em que os aspectos menos importantes são descartados e apenas aqueles mais significativos e fundamentais do mundo real são considerados; a *estruturação*, na qual os aspectos selecionados da realidade são tratados em termos de suas conexões; a *reaplicação*, que demonstra que o modelo não se apresenta apenas como descritivo de um caso, mas possibilita que seja usado para outros casos da mesma categoria; e a *simplicidade*, que demonstra que o modelo deve ser simples de manipular e de compreender, mas sem detrimento da complexidade necessária para representar com precisão o sistema em estudo (HAGGETT & CHORLEY, 1967 e CHRISTOFOLETTI, 1999).

## Tipos de modelos

Os diferentes tipos de modelos têm uma relação direta com o grau de abstração da realidade, ocorrendo desde formas mais simples, em que a realidade é transformada apenas em nível de escala, até a elaboração de modelos conceituais pela aplicação de modelos matemáticos, sendo estes últimos mais abstratos e gerais (THOMAS & HUGGET, 1980). Segundo Chorley (1967), os modelos (sistemas) geomórficos podem ser classificados em Naturais ou Análogos, Físicos e Gerais.

a) *Sistemas (modelos) naturais ou análogos*: esses modelos consistem na tradução dos aspectos importantes de um determinado fenômeno em um sistema análogo natural, considerado mais simples e mais conhecido. Envolvem a procura de situações ou eventos análogos em diferentes locais e/ou tempo.

b) *Sistemas (modelos) físicos*: são baseados na perspectiva de que a pesquisa pode ser melhor realizada pela dissecação da estrutura do problema geomórfico em suas partes supostamente componentes, de modo que o funcionamento de cada parte e as interações entre elas possam ser examinadas convenientemente, levando-se a uma síntese completa dos componentes num todo funcional. Neste grupo destacam-se os modelos matemáticos (determinísticos e estocásticos). Os *modelos determinísticos* são baseados nas noções matemáticas clássicas de relações exatamente previsíveis, entre variáveis independentes e dependentes, e consistem num conjunto de afirmações matemáticas exatamente especificadas, a partir das quais as consequências únicas podem ser deduzidas pela argumentação matemática lógica. Nos *modelos estocásticos*, para cada entrada (*input*) existirão várias saídas (*output*) refletindo as incertezas do sistema.

c) *Sistemas (modelos) gerais*: são modelos que tentam fornecer um quadro global da totalidade do sistema, estabelecendo o grau de conhecimento sobre as partes componentes, interações entre os elementos e o funcionamento interativo entre as entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) do sistema.

São subdivididos em *modelos caixa-preta* (exige-se pouca ou nenhuma informação detalhada relativa aos componentes do sistema, havendo somente o interesse na natureza das saídas (*outputs*) resultantes das diferentes entradas (*inputs*); *modelos parciais* ou *caixa-cinza* (obtenção de resultados sem o completo conhecimento do trabalho interno do sistema, mas a obtenção de informações específicas sobre as inter-relações entre os subsistemas permite identificar e prever o comportamento de todo o sistema, sob diferentes condições de entrada); e *modelos caixa-branca* (a estrutura do sistema é construída pelo conhecimento das variáveis envolvidas e das suas relações. Os modelos baseados em processos (*process models*), por exemplo, descrevem os mecanismos de operações particulares que ocorrem no mundo, e a partir do conhecimento dos processos pode-se direcionar a escolha das variáveis).

## Exemplo do uso de modelo matemático determinístico em bases físicas em estudos de movimentos de massa

Os modelos matemáticos em bases físicas são cada vez mais utilizados na Geomorfologia. A partir da década de 1970, especialmente na década de 1990, com o desenvolvimento dos Sistemas de Informação Geográfica (ver Capítulo 11 – Sistema de Informação Geográfica) e o avanço do geoprocessamento, tais técnicas ganharam maior destaque e utilidade devido à maior facilidade de manipulação dos dados ambientais. Atualmente, existem muitos modelos aplicados em diferentes áreas da Geomorfologia, por meio dos quais é possível, por exemplo, simular a evolução do relevo ao longo de um tempo geológico e identificar áreas instáveis a processos erosivos e a movimentos de massa.

Dentre as principais vantagens do uso desses modelos matemáticos em bases físicas, destaca-se seu baixo grau de subjetividade, pois os parâmetros envolvidos e suas interações, para cada tipo de processo (como corridas de detritos) são avaliados

segundo equações matemáticas que descrevem o processo fisicamente. Dessa forma, elimina-se, por exemplo, o valor ou peso dado a cada variável (como declividade) pelo pesquisador. Outra grande vantagem é a possibilidade de criação de diferentes cenários a partir da combinação de valores dos elementos considerados pelo modelo.

Referente ao estudo de escorregamentos translacionais rasos, por exemplo, inúmeros modelos matemáticos em bases físicas foram desenvolvidos com o objetivo de avaliar a suscetibilidade por meio da combinação de modelos de estabilidade e hidrológico. Nessa linha, destacam-se os seguintes modelos: SINMAP (*Stability INDEX MAPping*) (PACK et al., 1998), SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability Analysis*) (MONTGOMERY & DIETRICH, 1994 e MONTGOMERY et al., 1998); SHETRAN (EWEN et al., 2000) e TRIGRS (*Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope Stability*) (BAUM et al., 2002).

Como exemplo do uso de modelos matemáticos, o modelo TRIGRS foi aplicado em uma bacia hidrográfica da Serra do Mar paulista, região frequentemente afetada por movimentos coletivos de massa, principalmente do tipo escorregamentos rasos. A partir da equação que reflete matematicamente a junção de um modelo de estabilidade de vertentes e um modelo hidrológico, o qual avalia a dinâmica da água em cada porção da bacia, foram definidas as áreas instáveis (Fator de segurança  $\leq 1$ ) e as áreas estáveis (Fator de segurança  $> 1$ ). Neste exemplo, foi gerado um mapa de suscetibilidade a escorregamentos rasos utilizando os seguintes valores hidrológicos e geotécnicos: coesão do solo ( $c$ ) = 1000 Pa; peso específico do solo ( $\rho_s$ ) = 17,1 kN/m<sup>3</sup>; espessura máxima do solo ( $Z_{max}$ ) = 3 m; ângulo de atrito interno ( $\Phi$ ) = 34°; altura inicial do lençol freático ( $d$ ) = 3 m; taxa de infiltração inicial ( $I_{LT}$ ) = 1.0x10<sup>-9</sup> m/s; difusividade hidráulica ( $D_0$ ) = 5.5x10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s e condutividade hidráulica saturada vertical ( $K_s$ ) = 1.0x10<sup>-6</sup> m/s.

Posteriormente, o mapa de suscetibilidade (Figura 2.19) foi confrontado com um mapa de cicatrizes, gerado por meio de ortofotos em es-

cala 1:25.000. Essa combinação, além de avaliar a eficiência dos resultados finais do modelo, contribui para o entendimento da tipologia do mecanismo de ruptura da área, uma vez que este é considerado na estrutura teórica do modelo. Os resultados encontrados foram bastante satisfatórios, comprovando a grande potencialidade do uso dessas ferramentas em estudos de previsão dos escorregamentos rasos na paisagem, uma vez que o modelo previu 43% da área como sendo instável ( $FS \leq 1$ ) e cerca de 67% de cicatrizes dos escorregamentos concentraram-se nessas áreas.

$$FS = \frac{\tan\Phi}{\tan\Theta} + \frac{c' - \Psi(Z,t)\rho_w \tan\Phi}{\rho_s \text{sen}\Theta \cos\Theta}$$

Onde:

- FS = fator de segurança
- $\Phi$  = ângulo de atrito interno [°]
- $\Theta$  = ângulo da encosta [°] (valor retirado do mapa a partir do Modelo Digital de Elevação)
- $c'$  = coesão efetiva [Pa]
- $\Psi$  = carga de pressão [Kpa]
- Z = profundidade do solo [m]
- t = tempo [s]
- $\rho_w$  = peso específico da água [kN/m<sup>3</sup>]
- $\rho_s$  = peso específico do solo [kN/m<sup>3</sup>]

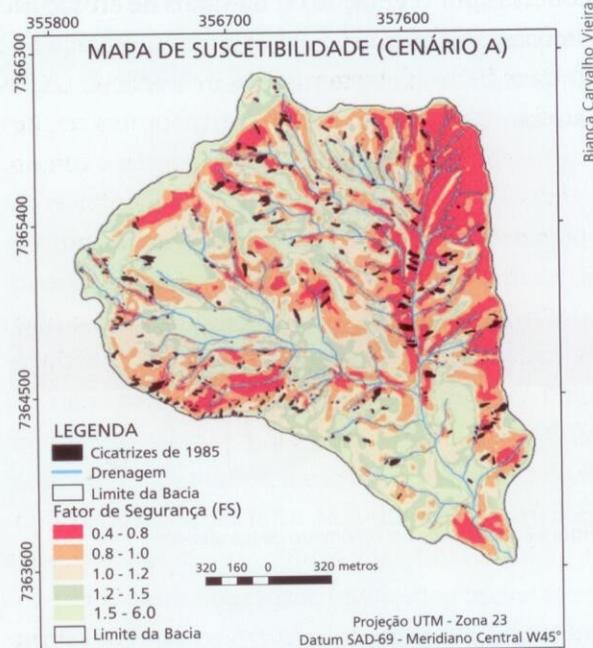


Figura 2.19. Mapa de suscetibilidade (Cenário A) gerado pelo modelo matemático TRIGRS.

## NA SALA DE AULA

Na sala de aula, ou melhor, no entorno da escola, em estudo do meio ou trabalho de campo, há diversos exercícios geomorfológicos com base em técnicas e instrumentos simplificados que o professor pode empreender com os alunos. Eis alguns exemplos.

### Atividade 1: clinometria

Um clinômetro<sup>7</sup> pode ser construído com uma régua fixada em um transferidor de plástico e um fio com um peso amarrado à ponta (Figura 2.20). Em ambiente externo, alinha-se a régua a uma vertente visível, com os braços esticados e verifica-se, pelo fio pendente, quantos graus de inclinação ela apresenta. Faz-se essas medidas diversas vezes, anotando-se os resultados que serão discutidos em torno das seguintes questões:

a) A declividade média da região é alta (acima de  $30^\circ$ ), caracterizando uma modelagem de relevo dissecado (serrano)? As vertentes estão recobertas por vegetação ou há sinais de erosão ou escorregamentos?

Eduardo Justiniano

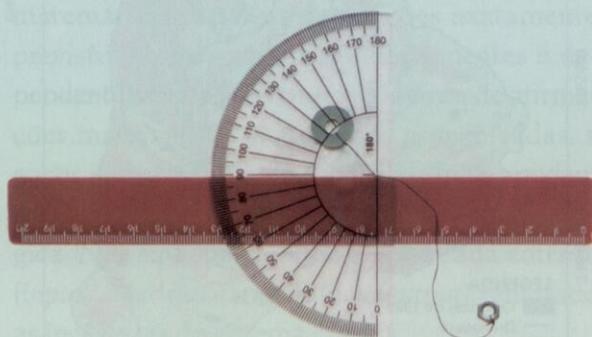


Figura 2.20. Foto de um clinômetro de transferidor.

7 Sobre a construção e uso de clinômetro, ver também o Capítulo 7 – Técnicas de Cartografia.

b) A declividade média é baixa, caracterizando relevo mais aplanado, provavelmente esculpido em bacia sedimentar? A superfície está coberta por vegetação ou há sinais de erosão, como ravinas, voçorocas e assoreamento?

c) Nas declividades verificadas, que tipo de uso seria mais apropriado: cultivo de espécies perenes (café, laranja...), temporárias (cana-de-açúcar, milho...), criação de um parque, represamento de rios, assentamento urbano...?

### Atividade 2: erosão

O professor pode escolher com os alunos duas áreas no entorno da escola (com mesma inclinação) para instalar uma calha de erosão (Gerlach) ou os pinos de erosão, como mostrados neste capítulo. O interessante desta atividade é o envolvimento total dos alunos, os quais podem ser escalados para, periodicamente, medir os pinos ou recolher e pesar os sedimentos da calha. Ao final de um período, o professor pode, a partir dos resultados, discutir questões como:

a) Em qual ambiente houve menos e em qual houve mais erosão?

b) Qual a importância das variáveis vegetação e clima no conjunto da paisagem? E do solo, especificamente, como recurso natural?

### Atividade 3: infiltração

O professor pode escolher com os alunos duas áreas para fazer testes de infiltração. Retira-se o fundo e a tampa de uma lata (tipo galão de tinta) e afunda-se esta lata cerca de 5 cm no solo. Adiciona-se água, de litro em litro, cronometrando quanto tempo leva para o solo infiltrar cada litro. Repete-se isso até que o solo fique saturado, ou seja, quando a água parar de infiltrar. Isso pode ser feito em época

de chuva (a saturação será mais rápida) ou em época de seca. Discutem-se os resultados das duas áreas em torno das seguintes questões:

- a) Em que área a água infiltrou-se mais rapidamente e por quê? A vegetação ajuda ou obstaculiza a infiltração da água?
- b) Qual a importância da permeabilidade dos solos para o desenvolvimento das plantas? (Observe que na área do campo de futebol em que ficam os goleiros a grama tem mais dificuldade de se desenvolver; depois, tire suas conclusões). Acrescente-se a isso a necessidade de se arar os solos antes dos plantios.
- c) Solos que infiltram mais água são mais frágeis, ou isso depende também da declividade do terreno e da cobertura vegetal?

#### Atividade 4: topografia

Em uma área de certa declividade próxima da escola, o professor pode, junto aos alunos, empreender medidas topográficas com a técnica das balizas de Emery. As balizas podem ser construídas com taquaras retas e pintadas de acordo com as medidas mostradas neste capítulo. Há outras formas simples de se fazer medidas topográficas no terreno. Pesquise na internet sobre a “mangueira de pedreiro”, por exemplo, que requer materiais simples (mangueira transparente, água e metro) e é de fácil utilização. Os resultados podem ser discutidos em torno das questões apresentadas a seguir. Observação: este exercício pode ser feito conjuntamente com aqueles do Capítulo 7 – Técnicas de Cartografia, nos quais se medem alturas e distâncias em campo.

- a) Para que servem essas medidas? Que profissionais a utilizam e para que fins?
- b) E no seu cotidiano, elas exercem alguma influência?

#### Avaliação de riscos

O professor, junto com os alunos, pode fazer observações na paisagem na tentativa de se identificar riscos de deslizamento de encostas (se houver áreas com essas características por perto), erosão e enchentes. Alguns indicadores de risco que podem ser observados são:

- adernamento (inclinação) de árvores e postes no sentido da baixa vertente;
- ausência de vegetação, o que pode aumentar a erosão;
- rachaduras no solo perpendiculares à inclinação da vertente;
- encanamentos soltos que despejam água na vertente, ocasionando erosão, como ravinas e valetas;
- lixo acumulado na vertente, que pode juntar água e aumentar o peso do material;
- cortes na vertente (para construção de casas, ruas) sem a devida proteção (contenções, muros de arrimo);
- arruamentos e ladeiras sem pavimentação no sentido da vertente, aumentando a velocidade da água;
- casas construídas em planícies fluviais (várzeas) de rios e rios assoreados com sedimentos ou lixo, o que diminui a capacidade de escoamento e aumenta a possibilidade de enchente.

Enfim, após essas e outras observações, a depender do contexto da escola, pode-se discutir os resultados em torno das seguintes questões:

- a) As áreas observadas apresentam indicadores de risco para deslizamento, erosão ou enchente?
- b) Se sim, de quem é a responsabilidade? Que papel tem o morador, a escola, o poder público?
- c) O que pode ser feito para diminuir os riscos?

Com essas sugestões, queremos mostrar ao professor que os estudos geomorfológicos têm muito a ver com nosso cotidiano e que várias técnicas podem ser empreendidas na escola, mesmo com poucos recursos.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

As proposições inseridas neste capítulo não têm a pretensão de esgotar o assunto, sobretudo porque são numerosas as técnicas utilizadas na pesquisa geomorfológica, desde as mais simples até as mais complexas. Em Geomorfologia, os estudos promovem articulações com várias outras áreas do conhecimento, como Hidrografia, Climatologia, Biogeografia, Pedologia e até Cartografia, além da sua relação direta com a forma como as sociedades ocupam o território.

A escolha de aplicação de um experimento ocorre em função dos objetivos da pesquisa e da escala de análise; a preocupação central é aplicar os experimentos mais adequados a cada tipo de pesquisa, para que se crie base empírica sistematizada para a sustentação dos argumentos e hipóteses de pesquisa.

Os procedimentos podem ser aplicados de forma mais simples em sala de aula, na escola e em trabalhos de campo, de modo que a prática da técnica e o uso de instrumentos auxilie na fixação de conceitos. O ensino de Geomorfologia será mais interessante se relacionado ao cotidiano do aluno e da escola, envolvendo questões como conservação, riscos, usos adequados e planejamento territorial. E o trabalho de campo será muito mais envolvente, se contemplar a realização de exercícios práticos.

## REFERÊNCIAS DE APOIO

### Glossário

**Crênulas:** representam a textura do relevo em uma imagem aérea (imagem de satélite, imagem de radar), por meio das rugosidades topográficas que resultam da combinação da densidade de canais de drenagem e do grau de entalhamento dos vales.

**Relevo dissecado:** relevo com fortes inclinações (altas declividades) e com vales fortemente entalhados (profundos).

**Runoff:** escoamento superficial da água pluvial que não é absorvida e/ou infiltrada no solo.

**Tensiómetro:** instrumento que mede a tensão da água do solo.

**Movimento de massa:** movimento coletivo de material terroso/rochoso vertente abaixo, independente de processos, causas, velocidades, formas e outras características.

### Bibliografia

- BAUM, R. L. et al. TRIGRS-A fortan program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis. *U. S. Geological Survey Open-File Report*, 2002.
- BURTON, I. The quantitative revolution and theoretical geography. In: DAVIES, W. K. D. (Ed.). *The conceptual revolution in geography*. Londres: University of London Press, 1992.
- CHORLEY, R. J. Models in Geomorphology. In: CHORLEY, R. J. & HAGGETT, P. (Ed.). *Models in geography*. Londres: Methuen & Co., 1967.
- CHORLEY, R. J.; KENNEDY, B. A. *Physical geography: a systems approach*. London: Prentice-Hall International, 1971.
- CHRISTOFOLETTI, A. As perspectivas dos estudos geográficos. In: A. CHRISTOFOLETTI (Ed.). *Perspectivas da geografia*. São Paulo: Difel, 1985.
- CHRISTOFOLLETTI, A. *Modelagem de sistemas ambientais*. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.
- De BIASI, M. A carta clinográfica: os métodos de representação e sua confecção. *Revista do Departamento de Geografia FFLCH/USP*. São Paulo, n. 6, pp. 45-60, 1992.
- DIETRICH, W. E.; WILSON, C. J.; MONTGOMERY, D. R.; J. MCKEAN. Analysis of erosion thresholds, channel networks and landscape morphology using a digital terrain model. *Journal of Geology*. n. 3, pp. 161-180, 1993.
- EWEN J.; PARKIN G.; O'CONNELL P. E. SHETRAN: distributed river basin flow and transport modeling system. *Journal of hydrologic engineering*. v. 5, n. 3, pp. 250-258, 2000.
- FIERZ, M. S. M. *As abordagens sistêmica e do equilíbrio dinâmico na análise da fragilidade ambiental: contribuição à geomorfologia das planícies costeiras*. Tese (Doutorado). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. *Groundwater*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1979.
- GANDOLFO, O. C. B. et al. Estratigrafia da Ilha Comprida (SP): um exemplo de aplicação do GPR. *Revista Brasileira de Geofísica*. São Paulo, v. 19, n. 3, pp. 1-22, set./dez. 2001.
- GUERRA & CUNHA (Orgs.) *Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.
- HAGGETT, P. & CHORLEY, R. J. Models, paradigms and the new geography. In: CHORLEY, R.; HAGGETT, P. (Ed.). *Models in geography*. Londres: Methuen & Co., 1967.
- HARVEY, D. *Explanation in geography*. Londres: Edward Arnold, 1969.
- IBGE. *Manual técnico de Geomorfologia*. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1995.
- KOMAR, P. D. *Pacific northwest coast living with the shores of Washington and Oregon*. Coleção Living with the shore. Duke University Press, 1998.
- LIBARDI, P. L. *Dinâmica da água no solo*. Piracicaba: Edição do Autor, 1995.
- MONTGOMERY, D. R.; SULLIVAN, K.; GREENBERG, M. H. *Regional test of a model for shallow landsliding*. pp. 943-955, 1998.
- MONTGOMERY, D. R.; W. E. DIETRICH. A physically based model for the topographic control on shallow

landsliding. *Water Resources Research*. n. 30, pp. 1153-1171, 1994.

MUEHE, D. Geomorfologia costeira. In: GUERRA, A. J. T. & CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand, 1996.

PACK, R. T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN, C. N. **Terrain Stability mapping with SINMAP, Technical description and users guide for version 1.00**. Report and software available from <<http://www.engineering.usu.edu/dtarb/>>. Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis. USGS, Colorado, 1998.

PESTANA, R. C.; BOTELHO, M. A. B. Migração de dados de radar (GPR) com correção topográfica simultânea. *Revista Brasileira de Geofísica*. São Paulo, v. 15, n. 1, pp. 1-17, mar. 1997.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E.; TOPP, G. C. A reexamination of the constant-head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. *Soil Science*, v. 136, n. 4, pp. 250-268, 1983.

ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo. *Revista do Departamento de Geografia*. São Paulo: FFLCH/USP, n. 6, pp. 17-29, 1992.

\_\_\_\_\_. Análise empírica da fragilidade dos ambientes antropizados. *Revista do Departamento de Geografia*. São Paulo: FFLCH/USP, n. 8, pp. 63-74, 1994.

\_\_\_\_\_. & MATOS FIERZ, M. S. Algumas técnicas de pesquisa em geomorfologia. In: VENTURI, Luis Antonio Bittar (Org.). **Praticando Geografia – técnicas de campo e laboratório**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

STEPHENS, D. B. **Vadose zone hydrology**. Lewis Publishers, 1996.

THOMAS, R. W.; HUGGETT, R. J. **Modelling in Geomorphology: a mathematical approach**. London: Harper and Row, 1980.

TRICART, J. **Principes et méthodes de l geomorphologie**. Paris: Masson, 1965.

XAVIER NETO, P. **Processamento e interpretação de Dados 2D e 3D de GPR: aplicações no imageamento de feições cársticas e estruturas de dissolução no campo de petróleo da Fazenda Belém (CE)**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal (RN), 2006.

## SOBRE OS AUTORES

**Jurandyr Luciano Sanches Ross** é bacharel em Geografia (1972), mestre e doutor em Geografia Física (1987) pelo Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, do qual é chefe e professor titular. Recebeu o Prêmio Jabuti pela organização do livro *Geografia do Brasil* (Edusp, 1986) e é membro de diversos conselhos editoriais. Atua na área de Geomorfologia, com ênfase nos seguintes temas: Geomorfologia e planejamento, Cartografia Geomorfológica, Gestão Ambiental, Zoneamento Ecológico-Econômico, Planejamento Ambiental e Produção do Conhecimento Geocientífico.

**Marisa de Souto Matos Fierz** possui bacharelado e licenciatura em Geografia pela FFLCH/USP, mestrado em Oceanografia Química e Geológica pelo Instituto Oceanográfico da USP e doutorado em Geografia Física pela FFLCH/USP (2008). Atualmente trabalha como técnica, pesquisadora e professora colaboradora da Universidade de São Paulo. Tem experiência na área de ciências da terra, com ênfase em Geografia, atuando principalmente nos seguintes temas: Geomorfologia, Geomorfologia Costeira, Fragilidade Ambiental, Gestão Ambiental e Geoprocessamento.

**Bianca Carvalho Vieira** possui graduação (1998), mestrado (2001) e doutorado (2007) em Geografia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Foi pesquisadora do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo e professora do curso de Geografia da UNESP/Ourinhos. Atualmente é professora doutora do Departamento de Geografia da USP, membro do Comitê Executivo da União da Geomorfologia Brasileira (desde 2004) e da IAG – International Association of Geomorphologists (2009-2013). Recebeu em 2009, durante o 7<sup>th</sup> International Conference on Geomorphology, o prêmio Jean Tricart “Jovem Geomorfólogo” da IAG e do Grupo Francês de Geomorfologia.