

CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS SOLOS RELEVANTES PARA OS ESTUDOS PEDOLÓGICOS E ANÁLISE DOS PROCESSOS EROSIVOS

**Antonio José Teixeira Guerra
- Rosângela Garrido Machado Botelho**

ABSTRACT

This paper regards the role of soil characteristics and properties on pedological surveys and soil erosion investigations. Therefore, the main factors of soil formation are here discussed. Furthermore, the main chemical and physical soil properties are also taken into consideration, in order to approach this subject. Finally, some erosion processes are also carried out, together with the main erosion forms and the environmental impacts caused by these associated processes.

1. Introdução

Este trabalho tem como principais objetivos abordar, de forma didática, algumas características e propriedades dos solos, com o objetivo de fornecer subsídios aos estudos pedológicos e aos processos erosivos. Dessa forma, são destacados, inicialmente, os principais fatores de formação dos solos: clima, material de origem, relevo, seres vivos e tempo, que são os responsáveis pelos diferentes tipos de solos existentes na superfície terrestre.

Além dos fatores formadores dos solos, são abordadas, também, as propriedades químicas e físicas, resultantes da atuação desses fatores, com o intuito de fornecer ao leitor subsídios para a compreensão dos processos de formação e evolução dos solos na paisagem.

Finalmente, na última parte desse trabalho, são analisados alguns processos erosivos, bem como as feições e os impactos ambientais resultantes desses processos. Uma vasta bibliografia é fornecida aos leitores que desejarem se aprofundar nesse tema.

2. Fatores de formação dos solos

Os fatores formadores são: material de origem (M), clima (C), organismos vivos (O), relevo (R) e tempo (T). Modelos conceituais ou expressões simbólicas foram estabelecidas a

fim de representar a relação do solo (S) com seus fatores de formação, como a seguinte equação:

$$S = f(M, C, O, R, T)$$

Sob esta concepção, os fatores são considerados variáveis independentes, onde solos distintos resultam de mudanças em um dos fatores acima, sem que haja variação nos demais. Entretanto, é sabido que a ação conjunta desses fatores é responsável pela direção, velocidade e duração dos processos de formação do solo. Esta interdependência entre os fatores tem sido reconhecida e a apresentação separada de cada um deles não deve contradizer esta relação, mas sim esboçar um teor didático.

2.1. Material de origem

O material de origem representa o estado inicial do sistema, que pode ser uma rocha consolidada, um depósito inconsolidado ou ainda um solo preexistente, constituindo-se em elemento passivo na formação dos solos, sobre o qual atuarão outros fatores que o transformarão.

Através da sua decomposição e desintegração, a rocha matriz fornece matéria-prima para a formação dos solos, assumindo um importante papel na determinação de suas propriedades. As características das rochas que influenciam mais diretamente na gênese dos solos são: composição mineralógica, resistência mecânica e textura. Dependendo das suas características, do clima e do tempo transcorrido, o material parental terá influência maior ou menor nas características do solo, notadamente, cor, textura, estrutura, mineralogia e índice de acidez (pH). Solos derivados de rochas graníticas, granodioríticas e gnáissicas, por exemplo, como os solos desenvolvidos sobre a Unidade Batólito Serra dos Órgãos (Penha *et al.*, 1981) na região serrana do estado do Rio de Janeiro, tendem a apresentar textura média, e sob um clima com alta pluviosidade, são freqüentemente ácidos. Por outro lado, solos derivados de rochas básicas, como o Latossolo Roxo derivado do diabásio no estado do Paraná, tendem a ser argilosos e de pH mais elevado.

Contudo, é preciso considerar o dinamismo dos processos formadores, que, a partir de um mesmo tipo de rocha, sob condições climáticas distintas, formam solos distintos, ao mesmo

tempo em que diferentes tipos de rocha, sob condições climáticas análogas, podem originar solos semelhantes.

2.2. Clima

O clima participa na formação do solo, na medida em que, através da energia solar, da umidade e, principalmente, da precipitação, controla o tipo e a intensidade dos processos formadores. É considerado fator ativo, que age sobre o material de origem consolidado ou não, o relevo, a vegetação e os organismos.

Já foi dado ao fator climático um peso maior do que é atribuído hoje. No final do século passado, Sibirtzev (*in* Porta *et al.*, 1994) formulou a teoria da origem climática dos solos ou lei da zonalidade, tida atualmente como muito genérica, em função da multiplicidade de ações modificadoras devidas a outros fatores.

Entretanto é possível reconhecer propriedades dos solos e processos formadores que apresentam tendências regionais, de acordo com a variedade climática. O teor de matéria orgânica, por exemplo, apresenta-se baixo em regiões desérticas e mais alto em regiões tropicais úmidas, devido ao processo de humificação mais acelerado nestas regiões. Entretanto, o teor de matéria orgânica diminui com a elevação da temperatura, em função do aumento do processo de mineralização. A ausência de água inibe a intemperização das rochas, enquanto que o aumento da temperatura eleva sua velocidade. Em climas muito úmidos, o solo tende a ser profundo, lixiviado de bases, com acumulação residual de óxidos de ferro e alumínio e predomínio de caulinita, como o caso dos Latossolos, freqüentemente álicos, da Amazônia (Vieira, 1988). Em climas áridos e semi-áridos, os solos são rasos, ricos em bases, com acumulação de carbonato de cálcio e presença de salinidade, como os solos do Sertão Nordeste brasileiro.

2.3. Relevo

O relevo é o fator de formação que controla a redistribuição de massa e energia, tornando possível diferenciar na paisagem superfícies de erosão, de deposição e, ainda, superfícies que resultam da ação combinada de tais processos. Dessa forma, admite-se a

existência de uma associação regular entre os diferentes tipos de solos e as posições que ocupam na paisagem, caracterizando topossequências.

Para a identificação de topossequências é indispensável ter conhecimentos de Geomorfologia e Pedologia, os quais são essenciais para a compreensão da evolução das formas de relevo e dos solos que nelas se desenvolvem. Num estudo das relações solo-geomorfologia, o primeiro passo é distinguir três formas principais de relevo: interflúvios, encostas e fundos de vale (Botelho *et al.*, 1995a; Botelho *et al.*, 1995b) Em função do ambiente geomórfico em que o solo se desenvolve, este adquire características que resultam de processos predominantes em cada ambiente, seja ele de acúmulo ou de transporte, de maior ou menor umidade, ou de maior ou menor incidência solar.

A inclinação, comprimento, orientação das encostas e posição topográfica são as características do relevo que influenciam diretamente na formação do perfil de solo. Assim, por exemplo, solos desenvolvidos em áreas planas tendem a ser mais profundos do que aqueles desenvolvidos em encostas íngremes, os horizontes superficiais dos solos localizados em encostas noruegas (sombreadas), geralmente, apresentam um teor de matéria orgânica mais elevado, a velocidade das águas de escoamento torna-se maior em encostas mais declivosas e os processos erosivos são acentuados em encostas mais extensas.

2.4. Organismos

A formação do solo é resultado da ação combinada de fatores abióticos e bióticos. Os fatores bióticos referem-se aos seres vivos, representados pelos animais, vegetais e microorganismos. Alguns autores afirmam que a formação do verdadeiro solo ocorre somente quando, aos elementos derivados da ação dos fatores intempéricos, juntam-se elementos coloidais, que favorecem a instalação dos organismos vivos (Brady, 1974; Vieira, 1988).

A atividade da fauna no solo é intensa e variada. Ela pode atuar em superfície e em profundidade, triturando e misturando materiais do solo, o que contribui para a sua estruturação, permeabilidade e aeração, sendo capaz de destruir horizontes, através da perda de suas características por pedoturbação (Vieira, 1988; Porta *et al.*, 1994). Vale ressaltar aqui os papéis da formiga e da minhoca. A formiga é capaz de inverter as camadas do perfil do solo, trazendo material de subsuperfície para o topo do solo, enquanto a minhoca ingere grande

quantidade de terra (até 15 toneladas por hectare por ano), que é eliminada, após a ação de enzimas digestivas, contendo elementos minerais disponíveis às plantas (Jorge, 1988) e com elevada capacidade de troca catiônica e resistência à desagregação pela água (Kiehl, 1979).

A vegetação possui papel direto como fator de formação do solo, através da sua intervenção no processo de intemperização, fragmentando a rocha, em função do crescimento das raízes; através da ação colonizadora dos líquens; e do aporte de matéria orgânica ao solo. A vegetação atua também como filtro protetor para a radiação solar e a chuva, regulando a temperatura, a umidade e a evaporação, e evitando o *splash* (salpicamento do solo), através da interceptação das gotas de chuva; diminui o escoamento superficial e a erosão hídrica, pelo aumento da infiltração; e serve como barreira natural contra a ação erosiva dos ventos.

A importância da microflora (bactérias, algas, fungos e actinomicetos) reflete-se na decomposição de material orgânico (biodegradação), na transformação de minerais do solo e na fixação do nitrogênio atmosférico (Jorge, 1988; Porta *et al.*, 1994).

Não há dúvida que, em relação à ação formadora e modificadora dos seres vivos, é preciso incluir o homem com um dos seus agentes, sendo talvez o maior modificador de todos eles. Certas práticas de manejo dos solos agem sobre seus atributos, modificando-os, ora com efeitos negativos, ora com efeitos positivos. Para exemplificar, pode-se mencionar: técnicas de drenagem, que podem provocar oxidação do solo e, conseqüentemente, tiomorfismo (formação em condições de abundância de enxofre e seus derivados, originando material rico em sulfetos); plantio em fileiras ou "morro acima", ocasionando aparecimento de sulcos de erosão; e uso intensivo com máquinas agrícolas, compactando o solo e diminuindo seu teor de matéria orgânica.

É válido, ainda, citar a ação indireta do homem, através da possibilidade de modificação nos demais fatores de formação dos solos, aumentando ou diminuindo sua eficiência (Jorge, 1988). Certas ações do homem podem provocar alterações no clima, no relevo e na cobertura vegetal, que, por sua vez, terão ações diferenciadas sobre a pedogênese.

2.5. Tempo

A idade de um solo expressa o tempo durante o qual atuaram os processos formadores. O tempo, neste caso, pode ser absoluto ou relativo. O primeiro caso refere-se à idade

cronológica, ou ao número de anos necessários para a formação do solo, que varia, grandemente, em função do tipo de material de origem e clima. Em linhas gerais, rochas compactas em climas temperados e frios exigirão um período muito mais longo para a formação dos solos do que arenitos, por exemplo, em clima tropical úmido. (Jorge, 1988; Vieira, 1988; Porta, 1994). O segundo diz respeito ao grau de desenvolvimento do solo, analisado de forma qualitativa. Baseando-se em critérios morfológicos, o solo pode ser considerado jovem ou imaturo, quando apresenta pouca espessura e desenvolvimento escasso, ou mais evoluído ou envelhecido ou maduro, quando os horizontes são mais desenvolvidos (Vieira, 1988; Porta, 1994; Prado, 1995).

Dessa forma, é possível comparar solos diferentes e estabelecer cronosseqüências relativas entre eles (Porta, 1994; Resende *et al.*, 1995). Como exemplo de cronosseqüência encontrada nas regiões do Brasil de clima quente e úmido, a partir de solos mais jovens a solos mais evoluídos, tem-se: Solos Litólicos - Cambissolos - Podzólicos - Latossolos. Em áreas de clima mais seco, como o Sertão Nordestino, o Latossolo pode não estar presente, em função da menor intensidade dos processos intempéricos. Atingir a maturidade, contudo, não significa atingir o estágio final do sistema, pois mudanças nos fatores formadores podem causar alterações no perfil já evoluído, iniciando um novo processo de formação (Vieira, 1988; Porta, 1994).

3. Principais propriedades dos solos

Os solos possuem propriedades físicas e químicas, que interagem e podem proporcionar maior, ou menor resistência aos processos erosivos. Algumas dessas propriedades podem ser determinadas em campo, mas na maioria das vezes, são processadas em laboratório. Segundo Daniels e Hammer (1992), muitos aspectos do estudo dos solos e dos processos erosivos podem ser resolvidos no campo, no entanto, para aprofundar a investigação é preciso coletar amostras para serem determinadas suas propriedades físicas e químicas em laboratório. Isso não quer dizer, necessariamente, que a análise de um grande número de amostras vá desvendar problemas sobre os processos erosivos. A propósito disso, Daniels e Hammer (1992) chamam a atenção de que, na maioria dos casos, a coleta de muitas amostras,

de uma determinada área, para serem analisadas em laboratório é um gasto de tempo e de dinheiro, pois não vão acrescentar muito ao estudo.

Nesse item é feita uma breve descrição de algumas propriedades químicas e físicas que afetam os processos erosivos. No entanto, é preciso enfatizar que, a maioria dos trabalhos sobre erosão dos solos, com enfoque geomorfológico (Stocking, 1972; Morgan, 1980, 1983, 1984, 1986; De Ploey, 1981 e 1985; Boardman, 1983, 1984, 1990; Boardman, *et al.*, 1996; Daniels e Hammer, 1992; Guerra, 1991a, 1995a, 1995b, 1996), coloca ênfase nas propriedades físicas dos solos, no sentido de entender como os processos evoluem. Por outro lado, os trabalhos com ênfase na pedologia e na agronomia (Prado, 1995; Palmieri e Larach, 1996) procuram utilizar tanto as propriedades físicas, como as propriedades químicas, de uma forma mais equilibrada, para compreender a dinâmica e os processos atuantes na formação e evolução dos solos.

3.1. Propriedades químicas

São determinadas, em laboratório, uma série de propriedades químicas dos solos. Para caracterizar quimicamente um tipo de solo devem ser analisadas diversas características, como: carbono orgânico, nitrogênio total, pH, cloreto de potássio, fósforo assimilável, carbonato de sódio, sílica, sesquióxido de ferro, óxido de titânio, capacidade de troca de cátions, saturação de bases, etc. (Palmieri e Larach, 1996). No entanto, essas análises são feitas em estudos que procuram compreender os solos, sob o ponto de vista pedológico e agrônomo. Os estudos dos solos, sob a perspectiva geomorfológica, levam em conta, na maioria das vezes, os teores de carbono orgânico e o pH, que juntamente com as outras propriedades químicas, também interferem sobre os atributos físicos dos solos, como o teor e estabilidade de agregados, porosidade, densidade aparente, etc, que serão vistos, a seguir. Dentre as propriedades químicas que mais afetam a erodibilidade dos solos, destaca-se o teor de carbono orgânico. Vários pesquisadores têm utilizado essa variável nos seus trabalhos (Boardman e Robinson, 1985; Davies, 1985; De Ploey e Poesen, 1985; Chaney e Swift, 1986; Morgan, 1986; Guerra, 1991a e 1994; Daniels e Hammer, 1992; Prado, 1995), no sentido de demonstrar sua importância quanto à formação de agregados estáveis e, conseqüentemente, sua maior resistência ao impacto das gotas de chuva. Isso vem contribuir na menor formação de crostas

nos solos e, dessa forma, pode haver um aumento da capacidade de infiltração nos solos, resultando num menor escoamento superficial. Prado (1995) também enfatiza a importância do carbono orgânico nos solos, demonstrando que há uma correlação inversa entre o fator K (fator que estima a erodibilidade dos solos) e o teor de carbono orgânico, em especial quando se excluem os solos de textura argilosa pesada.

As propriedades químicas determinadas em laboratório são também de grande importância para caracterizar as classes de solos existentes, com suas respectivas potencialidades, riscos e limitações. Como afirma Prado (1995), a saturação das bases, por exemplo, é fundamental para determinar se um solo é eutrófico ou distrófico. Prado (1995) destaca, também, a importância da determinação da capacidade de troca de cátions, na caracterização das argilas de baixa e de alta atividade. O pH é outra propriedade indicada por vários autores na classificação dos diversos tipos de solos e na sua maior ou menor susceptibilidade aos processos erosivos. Allison (1973), por exemplo, enfatiza que os solos ácidos, ou seja, deficientes em cálcio, que é um elemento que contribui na retenção de carbono, formando agregados, combinando humus e cálcio, podem apresentar maior erodibilidade. No entanto, é preciso ter cuidado quando se está trabalhando com solos agrícolas, pois podem apresentar um pH mais alto, devido ao processo de calagem, que é empregado para corrigir a acidez.

As propriedades químicas dos solos têm influência sobre sua fertilidade e sua erodibilidade. A propósito disso, Prado (1995) destaca que o grau de flocculação das argilas, é uma das variáveis que tem um papel fundamental nos processos erosivos, pois quanto maior o grau de flocculação maior a resistência dos solos à erosão.

Na realidade, tanto as propriedades químicas como as físicas, devem ser levadas em consideração, em conjunto com as variáveis relacionadas à morfologia do terreno, bem como às características do regime pluviométrico, da cobertura vegetal e, no caso das áreas agrícolas, do tipo de lavoura e do manejo empregado. É a partir da combinação de todos esses fatores, que podem ser compreendidos, com maior precisão, os processos erosivos existentes numa determinada área.

3.2. Propriedades físicas

Essas propriedades possuem um papel significativo para compreender a maior ou menor erodibilidade dos solos. Dentre elas destacam-se: teor de areia, silte e argila; densidade real e aparente; porosidade; e teor e estabilidade dos agregados. Para uma melhor compreensão da erodibilidade dos solos, a seguir será descrita de que forma cada uma delas atua sobre os processos erosivos.

Os teores de areia, silte e argila, por exemplo, atuam sobre a erosão, à medida que podem oferecer maior ou menor resistência ao destacamento (*detachment*) e ao próprio transporte pela água resultante do escoamento superficial, difuso ou concentrado. A areia fina e o silte são as frações granulométricas que apresentam maior facilidade de serem erodidas, pois não possuem muita coesão, nem peso suficiente que dificulte a ação da água, tanto no *splash*, como no escoamento superficial (Farmer, 1973; De Ploey, 1985; Evans, 1990; Daniels e Hammer, 1992; Guerra, 1991a, 1991b, 1995a, 1996). A areia grossa e a argila são as frações granulométricas que oferecem maior resistência à erosão. As areias, devido ao seu diâmetro, apresentam um peso maior que dificulta a ação da água, enquanto as argilas, devido à sua coesão, em especial quando combinadas com matéria orgânica, formam agregados estáveis, que também oferecem resistência à ação da água.

As densidades real e aparente dos solos influenciam de forma significativa a sua erodibilidade e afetam outras propriedades, como a porosidade. A densidade real refere-se à densidade das partículas do solo seco. A grande maioria oscila em torno de $2,65 \text{ g/cm}^3$, entretanto, alguns solos apresentam minerais que possuem densidades maiores, são os chamados minerais pesados. Esses vão oferecer maior resistência aos agentes erosivos, pois, mesmo sendo pequenos, apresentam maior peso e, conseqüentemente, dificultam a ação da água e do vento. A densidade aparente controla a ação dos processos erosivos, porque está relacionada à maior ou menor compactação dos solos, ou seja, quanto maior a densidade aparente, maior a dificuldade das águas se infiltrarem nos solos, aumentando, dessa forma, o escoamento superficial. A densidade aparente varia, quase sempre, entre 0,8 e $2,0 \text{ g/cm}^3$, sendo que a literatura geomorfológica aponta valores menores que $1,3 \text{ g/cm}^3$ como baixos e valores maiores que $1,6 \text{ g/cm}^3$ como altos; os outros valores são intermediários (Hamblin e Davies, 1977; De Ploey, 1981; Morgan, 1984 e 1986; Daniels e Hammer, 1992; Guerra, 1995a

e 1996). A densidade aparente aumenta, geralmente, devido à agricultura, que além de contribuir na diminuição do teor de matéria orgânica dos solos, quando mecanizada, favorece a compactação dos solos (Morgan, 1984; Daniels e Hammer, 1992; Guerra e Almeida, 1993; Guerra, 1995a; Prado, 1995). O pisoteio do gado também contribui de maneira efetiva no aumento da densidade aparente. Além do efeito da mecanização da agricultura e do pisoteio do gado, a densidade aparente pode aumentar, através da própria ação da energia cinética das gotas de chuva, em especial, nos solos sem cobertura vegetal, ou seja, aqueles desmatados para a utilização com lavouras temporárias. Os estudos feitos através dos simuladores de chuva têm demonstrado esse efeito (Tacket e Pearson, 1965; De Ploey, 1985; Guerra, 1994).

A porosidade, que se relaciona de maneira inversa à densidade aparente, também é uma propriedade que afeta os processos erosivos. Ou seja, à medida que aumenta a densidade aparente, diminui a porosidade e, conseqüentemente, dificulta a infiltração das águas nos solos, aumentando o escoamento superficial. Nesse sentido, não se deve imaginar que solos arenosos possuem alta porosidade, em especial aqueles com elevado teor de areia fina, pois a compactação provocada pela mecanização irá aumentar a densidade aparente, reduzindo sua porosidade (Morgan, 1984). Solos argilosos, muitas vezes, possuem maior porosidade, em especial quando essas argilas apresentam elevados índices de floculação, facilitando a penetração das águas, através dos seus poros (Prado, 1995).

O teor e a estabilidade dos agregados dependem de uma série de fatores e afetam diretamente os processos erosivos. O teor refere-se à quantidade de agregados em relação aos outros constituintes dos solos. No entanto, ao entrar em contato com a água, esses agregados podem se romper, ou seja, um solo pode apresentar elevado teor de agregados, mas sua estabilidade pode ser baixa. Dessa forma, os estudos de erodibilidade devem incluir as duas propriedades. No que se refere à estabilidade, esta é influenciada pelas argilas e pelo teor de matéria orgânica dos solos (Farres, 1978; De Ploey e Poesen, 1985; Imeson e Kwaad, 1990; Daniels e Hammer, 1992; Guerra e Almeida, 1993; Guerra, 1994 e 1995a; Prado, 1995), que por sua vez age também sobre a própria estrutura dos solos. Dessa forma, a estabilidade dos agregados age diretamente sobre a erodibilidade dos solos, ou seja, quanto maior for a estabilidade à ação da água, menor as taxas de erodibilidade e vice-versa. Essa estabilidade é dada pela resistência que alguns agregados possuem tanto à ação da água, diretamente através do *splash*, como pela água que se infiltra e encharca os solos. Solos que apresentam baixos

teores de estabilidade de agregados são mais susceptíveis aos processos erosivos. Novamente é bom chamar atenção para a atividade agrícola, que pode reduzir os teores de matéria orgânica dos solos, causando uma diminuição da estabilidade dos agregados (De Ploey e Poesen, 1985; Davies, 1985; Morgan, 1986; Daniels e Hammer, 1992; Guerra e Almeida, 1993; Guerra, 1994 e 1995a).

As propriedades químicas e físicas analisadas nesse item não devem ser levadas em consideração de forma isolada, ou seja, outros fatores interferem no processo erosivo, como as características das encostas, o tipo de cobertura vegetal e, em especial, a ação antrópica, que pode, num curto intervalo de tempo, descaracterizar totalmente as condições naturais acelerando, quase sempre, os processos erosivos, numa determinada área.

4. Processos erosivos

Os processos erosivos podem ocorrer em qualquer parte da superfície terrestre. Para isso, basta que existam solos e agentes transportadores, dentre os quais destaca-se a água resultante do escoamento superficial e subsuperficial. Outros agentes atuam no processo erosivo, como o vento, o gelo e o mar. Os três atuam em áreas mais específicas que a água. No caso brasileiro, a água é o principal agente modelador dos solos e do relevo.

Apesar dos processos erosivos ocorrerem em quase todas as partes do mundo, as áreas mais afetadas são as rurais, pois são responsáveis, quase sempre, pelo desmatamento de extensas áreas para as atividades agro-pastoris. Além disso, quando não utilizam práticas de conservação dos solos e, ao contrário, realizam queimadas, contribuem para o aumento dos processos erosivos, pois diminuem o teor de matéria orgânica dos solos. A mecanização intensa também pode contribuir para a aceleração desses processos, aumentando a densidade aparente, diminuindo a porosidade e, conseqüentemente, reduzindo as taxas de infiltração.

Os processos erosivos causados pela água do escoamento superficial começam a partir da saturação dos solos, bem como da formação de crostas na superfície, que dificultam a infiltração das águas. Dependendo das propriedades dos solos, das características das encostas, do regime das chuvas, bem como do uso da terra e das práticas de manejo, os processos podem evoluir através da erosão em lençol, ravinas e voçorocas, causando uma série de impactos ambientais.

4.1. Principais fatores

As propriedades químicas e físicas, analisadas anteriormente, são importantes fatores no processo erosivo, pois podem acelerar ou retardar esses processos. Além delas, as características das encostas, como forma, comprimento e declividade influenciam de maneira variada, pois é da combinação desses três elementos que as águas vão escoar com maior ou menor intensidade. Apesar da declividade ainda ser considerada como uma das mais importantes variáveis no processo erosivo, vários pesquisadores têm demonstrado que em encostas mais íngremes, a erosão pode ser menor (Luk, 1979; Poesen, 1984; Morgan, 1986; Guerra, 1991a, 1994 e 1995a). Alguns autores, como Poesen e Govers (1986), demonstraram que, à medida que a declividade aumenta, a erosão pode diminuir devido à diminuição do processo de selagem, que é responsável pela formação de crostas no topo do solo. Nesse trabalho, Poesen e Govers (1986) atribuíram a maior resistência à selagem para as encostas acima dos 10° de declividade. O comprimento das encostas também é um importante fator controlador dos processos erosivos, pois quanto mais longas as encostas, maior a capacidade de concentração dos fluxos de água, aumentando, assim, os riscos de erosão. As formas côncavas (mais susceptíveis aos processos erosivos), convexas e retilíneas controlam a erosão de várias maneiras, mas as rupturas entre essas formas podem ser um dos mais importantes fatores, pois os fluxos de água podem ser acelerados ou retardados, a partir dessas rupturas.

De todos os fatores controladores dos processos erosivos, a intervenção antrópica talvez seja a que possui a maior capacidade de aceleração desses processos. Isso ocorre quase sempre em áreas rurais, onde o desmatamento para o uso agrícola da terra abrange extensas áreas, queimadas deixam os solos desprotegidos, monoculturas comerciais descaracterizam ecossistemas e a mecanização intensa compacta os solos, dificultando a infiltração das águas, ou seja, tudo isso rompe o ciclo hidrológico, podendo causar um sério desequilíbrio ecológico.

A partir de tudo que foi visto, pode-se concluir que os processos erosivos são altamente complexos, pois dependem de uma grande variedade de fatores de ordem natural e também da intervenção humana.

A partir do ciclo hidrológico é que se inicia o processo erosivo, pois durante as chuvas, parte da água é retida nas copas das árvores e outra parte chega aos solos, podendo se infiltrar e se escoar, em superfície e em subsuperfície. Outra parte se evapora para a atmosfera,

formando as nuvens que se precipitam, dando continuidade ao ciclo. O uso da terra sem levar em conta os riscos presentes em cada ambiente pode aumentar a ação do *splash*, provocando a formação de crostas no topo dos solos, sendo um dos responsáveis pelo rápido escoamento das águas superficiais, que irão provocar a erosão. O desmatamento e a não construção de terraços, para a atividade agrícola, podem acelerar o escoamento das águas, nas áreas cultivadas, aumentando também a ação dos processos erosivos. A redução das taxas de infiltração, provocadas pelas atividades agrícolas e pelo pisoteio do gado, é um outro fator acelerador do processo erosivo. A combinação de todos esses fatores é que resulta na formação da erosão em lençol, ravinas e voçorocas.

4.2. Formas erosivas

As principais formas erosivas ocorrem a partir do escoamento superficial e subsuperficial. O processo inicia-se com as primeiras gotas de água, que, ao se chocarem contra o solo, podem provocar o *splash*, que é o salpicamento de partículas, causando a ruptura dos agregados. Isso origina o processo de selagem do topo do solo, dificultando a infiltração das águas da chuva, causando o escoamento superficial. Esse escoamento também acontece, quando o solo não suporta mais infiltração das águas da chuva. Nesse primeiro estágio, as águas se escoam de forma difusa, provocando a erosão em lençol. Essas águas podem se concentrar, formando sulcos, dando origem às ravinas. À medida que as ravinas vão de alargando, se aprofundando e aumentando de comprimento, dão origem às voçorocas. Essas podem se formar também a partir do escoamento subsuperficial, provocando o colapso do teto, abrindo grandes buracos na superfície do solo.

A erosão em lençol, também conhecida por erosão laminar, ocorre em função do escoamento das águas sobre a superfície do solo ser difuso, ou seja, nesse estágio da erosão não há concentração de filetes de água (Morgan, 1986; Daniels e Hammer, 1992; Guerra, 1995a e 1996). Para que a erosão em lençol ocorra é necessário que hajam algumas condições, como pouca ou nenhuma cobertura vegetal, chuvas prolongadas, que excedem a capacidade de armazenamento dos solos, saturando as irregularidades existentes no topo do solo e uma declividade superior a 2°. A interação do escoamento que se estabelece com o *splash* pode aumentar mais ainda a erosão em lençol, pois causa uma turbulência no fluxo de água. As

irregularidades existentes no solo podem fazer com que as águas comecem a se concentrar ao longo de determinados planos, formando os primeiros filetes, ou sulcos, que são a origem das ravinas.

A erosão em ravinas pode ser uma evolução da erosão em lençol. Quando se estabelecem as ravinas no solo, o escoamento passa de disuso a concentrado, aumentando a velocidade do fluxo de água que desce pela encosta. A incisão começa a ocorrer no topo do solo, aprofundando em direção aos horizontes subsuperficiais. Na maior parte das vezes, essas feições erosivas, formam um sistema de ravinas, ou seja, raramente ocorrem isoladas numa encosta. Além dos fluxos principais, nesse sistema, aparecem também ravinas menores, que podem ser obliteradas, a cada evento chuvoso, formando uma nova rede de ravinas (Moss *et al.*, 1982; Boardman, 1984; Morgan, 1986; Guerra, 1995a e 1996).

A remoção e o transporte de material em um sistema de ravinas acontece de duas formas distintas: 1. a ação do *splash* tende a destacar partículas da zona denominada interravina (*interrill zone*) para dentro da ravina; 2. o fluxo de água, que corre por dentro da ravina, transporta esses sedimentos que são arremessados em direção aos sulcos erosivos. É por isso que, após terminado um evento chuvoso, encontra-se uma grande quantidade de sedimentos depositados dentro das ravinas, ou seja, material que ficou retido nas depressões existentes, quando o fluxo de água foi diminuindo. As gotas de chuva que caem sobre o fluxo de água que escoam dentro das ravinas fazem aumentar a turbulência desse fluxo, aumentando, assim, sua capacidade de transporte.

Assim como as outras formas erosivas, o desmatamento, acompanhado do uso da terra para a agricultura e a pecuária, sem levar em conta os limites impostos pelas propriedades dos solos, pela forma, pelo comprimento e pela declividade das encostas, bem como pelas características das chuvas, fazem como que os processos de formação de ravinas sejam acelerados, podendo evoluir para voçorocas.

O que diferencia as voçorocas das ravinas é que além das voçorocas serem mais profundas, mais largas e mais extensas, elas são características mais permanentes na paisagem, a não ser que o homem faça obras de engenharia para aterrâ-las ou, pelo menos, para conter sua evolução.

Elas ocorrem tanto em áreas urbanas como rurais, causando prejuízos em ambas as situações. As principais causas do surgimento das voçorocas, nas áreas rurais, é o

desmatamento, o uso agrícola, as queimadas e o superpastoreio (Morgan, 1986; Danniels e Hammer, 1992; Prado, 1995; Guerra, 1995a e 1996). Nas áreas urbanas, o desmatamento, o corte dos taludes e a construção de casas e ruas são as principais causas do surgimento das voçorocas. Aquelas causadas pelo escoamento superficial têm sua origem inicial em pequenas ravinas, que evoluem através do tempo, podendo em poucos anos passarem de pequenos sulcos para cavidades que atingem dezenas de metros de largura, profundidade e comprimento (Guerra e Almeida, 1993; Almeida e Guerra, 1994; Guerra *et al.*, 1995). Esses tipos de voçorocas têm sido documentados ao longo de quase todo o território nacional e pouco tem sido feito para resolver o problema assim que ele surge, ou seja, quando ainda é de pequena expressão, ainda sob a forma de uma ravina. Uma vez estabelecida, a voçoroca tende a evoluir rapidamente, através de desmoronamentos que ocorrem tanto nas laterais, como no seu topo. O escoamento das águas que ocorre dentro das voçorocas se encarrega de transportar os sedimentos que se depositam no seu fundo, em função desses desmoronamentos, ou seja, sua recuperação torna-se mais difícil e de custo elevado, algumas vezes, devido à quantidade de sedimentos que é removida pelo escoamento superficial.

Existem voçorocas que são formadas pela ação do escoamento subsuperficial. Nesse caso, a água que escoar em subsuperfície remove os sedimentos, através da dissolução dos minerais, provocando a formação de dutos (*pipes*) que, uma vez formados, tendem a aumentar em diâmetro, podendo atingir vários metros, tanto em diâmetro, como em comprimento. Essas voçorocas ocorrem tanto em áreas rurais como urbanas e, devido aos vazios deixados em subsuperfície, provocam o colapso do teto situado acima dos dutos. Esse colapso, quando ocorre em áreas urbanas, pode provocar a perda de vidas humanas, bem como destruir ruas, casas e prédios inteiros. Esse tipo de voçoroca ocorre em todo o Brasil e são, quase sempre, gigantescas, podendo atingir quilômetros de extensão e dezenas de metros de largura e profundidade, até atingir o lençol freático. Nas áreas rurais provoca prejuízos nas lavouras e na pecuária, pois os fazendeiros têm que abandonar essas terras e, até mesmo cercá-las, quando se trata de terrenos utilizados para a pecuária (técnica do isolamento). Uma vez formadas, essas voçorocas necessitam de obras de recuperação que envolvem elevados volumes de recursos financeiros, em especial, nas áreas urbanas, pois ruas inteiras podem desaparecer, à medida que as voçorocas evoluem. Cidades como Sorriso, em Mato Grosso, Açailândia, no

Maranhão, e Bauru, em São Paulo são apenas alguns exemplos de áreas urbanas atingidas por esse tipo de voçoroca.

4.3. Impactos ambientais

Os impactos ambientais resultantes dos processos e das formas erosivas são os mais variados possíveis. O simples estabelecimento da erosão em lençol, em ravinas e em voçorocas, numa determinada área, já causa um impacto ambiental aos solos onde essas formas ocorrem.

Quase sempre, os impactos ambientais oriundos da erosão dos solos iniciam-se com o desmatamento e a conseqüente ocupação do solo, sem levar em conta os limites impostos pelos solos e pelo relevo onde o desmatamento é processado. Os impactos podem ser divididos em duas formas de ocorrência: 1. impactos gerados em áreas rurais; 2. impactos ocorridos em áreas urbanas. Nas áreas rurais, a erosão dos solos, que acontece em função do desmatamento, da mecanização intensiva, da monocultura, da não utilização de práticas de conservação dos solos e de outros fatores de ordem natural e humana, tem provocado a formação de erosão em lençol, ravinas e voçorocas, causando o empobrecimento do solo e sua degradação, bem como gerado problemas também em áreas afastadas dos locais onde o processo erosivo ocorre. Um caso típico é o assoreamento de reservatórios, rios e lagos. Além disso, o solo erodido, quase sempre, está empregnado de defensivos agrícolas, que causam a poluição desses corpos líquidos assoreados (Morgan, 1986; Daniels e Hammer, 1992; Guerra, 1995a, Cunha e Guerra, 1996). A erosão dos solos pode também provocar a diminuição, ou mesmo o desaparecimento, de mananciais, que dependem da presença da cobertura vegetal para sua manutenção. Nas áreas urbanas, a erosão dos solos também causa toda uma série de transtornos, em especial, porque essas áreas, geralmente, possuem grandes aglomerados populacionais vivendo em pequenos espaços, em especial nas grandes cidades. Os processos erosivos acelerados que ocorrem nessas áreas, especialmente as voçorocas formadas a partir do escoamento subsuperficial, podem ser responsáveis pela perda de vidas humanas e pela destruição de prédios inteiros. Nesse caso, a formação da voçoroca é muito rápida, não havendo tempo, na maioria das vezes, da população ser retirada da área em perigo (Morgan, 1986; Wild, 1993; Guerra, 1995a).

É importante ressaltar que processos erosivos não causam prejuízos somente na área específica onde acontecem, mas também em áreas que podem estar afastadas do local de ocorrência desses processos (Boardman *et al.* 1996). Nos países desenvolvidos, tem havido uma série de processos judiciais, onde se procura responsabilizar os culpados pela erosão, que provocam prejuízos, não apenas nas suas terras, mas em áreas afastadas, afetando, dessa maneira, outras pessoas. Ou seja, no caso do assoreamento de corpos líquidos, como os reservatórios, ou no caso de ruas e estradas que ficam cheias de sedimentos, após uma tempestade, é o poder público, que tem que fazer a limpeza, gastando recursos que são pagos pela sociedade e não apenas por aqueles que provocaram esses impactos ambientais.

5. Conclusões

O estudo da erodibilidade dos solos e do potencial de risco à erosão exigem o conhecimento detalhado das características do solo, notadamente as propriedades físicas e químicas e suas implicações. Tais características são resultado da atuação dos fatores de formação dos solos em determinado ponto da superfície terrestre. A formação de um tipo de solo, contudo, não representa o fim da atuação desses fatores. Ao contrário, eles continuam agindo sobre o solo, propiciando sua evolução e alterando suas propriedades. Essa evolução ocorre num intervalo de tempo variável, que pode englobar dezenas a centenas de anos, porém o mais importante é atentar para o caráter dinâmico das características do solo, que estão longe de serem elementos estáticos nos estudos dos processos erosivos e impactos ambientais, abordados neste artigo.

Resulta disso, a necessidade de conhecer os agentes formadores dos solos e sua atuação diferenciada no tempo e espaço para auxiliar nos estudos de caracterização, comportamento e mudança dos solos, principalmente frente a ação antrópica não orientada, ou ainda, mal orientada.

A preocupação com todos esses elementos, em especial em regiões tropicais, com ênfase na realidade brasileira, foi uma preocupação constante dos autores, em virtude da erosão dos solos estar assumindo grandes proporções em nosso território. Ou seja, para intervir na paisagem, em especial no que diz respeito às atividades relacionados à agropecuária, é fundamental conhecer, ou reconhecer, os diferentes tipos de solos, como estes são

formados e podem evoluir, suas principais características, e que riscos podem oferecer, quando são desmatados e submetidos a novas condições ambientais.

6. Bibliografia

- ALLISON, F.E. (1973). Soil organic matter and its role in crop production. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 637p.
- ALMEIDA, F.G. e GUERRA, A.J.T. (1994). Erosão dos solos e impacto ambiental na microbacia do rio Lira - MT. *Anais do I Encontro Brasileiro de Ciências Ambientais*. COPPE - UFRJ, Rio de Janeiro, 1.010-1.021.
- BOARDMAN, J. (1983). Soil erosion at Albourne, West Sussex, Inglaterra. *Applied Geography*, 3, 317-329.
- BOARDMAN, J. (1984). Erosion on the South Downs. *Soil and Water*, 12, 1, 19-21.
- BOARDMAN, J. (1990). Soil erosion on the South Downs: A review. In: *Soil erosion on agricultural land*. Editores: J. Boardman, I.D.L. Foster e J. Dearing, 87-105.
- BOARDMAN, J. e ROBINSON, D.A. (1985). Soil erosion, climatic vagary and agricultural change on the South Downs around Lewes and Brighton, autumn 1982. *Applied geography*, 5, 243-258.
- BOARDMAN, J., BURT, T.P., EVANS, R., SLATTERY, M.C., e SHUTTLEWORTH, H. (1996). Soil erosion and flooding as a result of a summer thunderstorm in Oxfordshire and Berkshire, May 1993. *Applied Geography*, 16, 1, 21-34.
- BOTELHO, R.G.M., SILVA, A.S. e ANJOS, O.C. dos. (1995a). Estudo Comparativo Entre Solo e Geomorfologia Para Identificação de Toposseqüências na Microbacia do Rio Cuiabá-Petrópolis-RJ. *Anais do I Encontro de Geomorfologia do Sudeste*, Rio de Janeiro-RJ (no prelo).
- BOTELHO, R.G.M., SILVA, A.S. e SANTOS, A.C.C. (1995b). Relação solo-geomorfologia na Bacia do Rio Cuiabá - Petrópolis/RJ. *Anais do XXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, Viçosa-MG, vol.III.
- BRADY, N.C. (1974). *The nature and properties of soils*. 8ª edição. Nova Yorque, 639p.

- CHANEY, K. e SWIFT, R.S. (1986). Studies on aggregate stability-I. Reformation of soil aggregates. *Journal of Soil Science*, 37, 2, 329-335.
- CUNHA, S.B. e GUERRA, A.J.T. (1996). Degradação Ambiental. In: *Geomorfologia e Meio Ambiente*. Orgs. A.J.T. Guerra e S.B. Cunha, Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 337-379.
- DANIELS, R. B. e HAMMER, R.D. (1992). Soil Geomorphology. John Wiley and sons, Inc. Nova York, 236p.
- DAVIES, P. (1985). Influence of organic matter content, moisture status and time after reworking on soil shear strength. *Journal of Soil Science*, 36, 2, 299-306.
- DE PLOEY, J. (1981). Crusting and time-dependent rainwash mechanisms on loamy soil. In: *Soil Conservation Problems and Prospects*. Editor: R.P.C. Morgan, 139-152.
- DE PLOEY, J. (1985). Experimental data on runoff generation. In: *Soil erosion and conservation*. Editores: S. A. Swaify, W.C. Moldenhauer e A. Lo, 528-539.
- DE PLOEY, J. e POESEN, J. (1985). Aggregate stability, runoff generation and interrill erosion. In: *Geomorphology and soils*. Editores: K.S. Richards, R.R. Arnett e S. Ellis, 99-120.
- EVANS, R. (1990). Water erosion in British farmer's fields - some causes, impacts, predictions. *Progress in Physical Geography*, 14, 2, 199-219.
- FARMER, E.E. (1973). Relative detachability of soil particles by simulated rainfall. *Soil Science Society of American Proceedings*, 37, 629-633.
- FARRES, P. (1978). The role of time and aggregate size in the crusting process. *Earth Surface Processes*, 243-254.
- GUERRA, A.J.T. (1991a). Soil characteristics and erosion, with particular reference to organic matter content. Tese de Doutorado, Universidade de Londres, 441p.
- GUERRA, A.J.T. (1991b). Avaliação da influência das propriedades do solo na erosão, com base em experimentos utilizando um simulador de chuvas. *Anais do IV Simpósio de Geografia Física Aplicada*, 260-266, Porto Alegre, RS.

- GUERRA, A.J.T. (1994). The effect of organic matter content on soil erosion in simulated rainfall experiments in W. Sussex, U.K. *Soil Use and Management*, Harpenden, Inglaterra, 10, 60-64.
- GUERRA, A.J.T. (1995a). Processos erosivos nas encostas. *In: Geomorfologia - uma atualização de bases e conceitos*. Orgs. A.J.T. Guerra e S.B. Cunha, 2ª edição, Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 149-209.
- GUERRA, A.J.T. (1995b). The catastrophic events in Petrópolis City (Rio de Janeiro), between 1940 and 1990. *GeoJournal*, Alemanha, 37, 3, 349-354.
- GUERRA, A.J.T. (1996). Processos erosivos nas encostas. *In: Geomorfologia - exercícios, técnicas e aplicações*. Orgs. S.B. Cunha e A.J.T. Guerra, Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 139-155.
- GUERRA, A.J.T. e ALMEIDA, F.G. (1993). Propriedades dos solos e análise dos processos erosivos no município de Sorriso-MT. *Anais do IV Encontro Nacional de Estudos sobre o Meio Ambiente*, Cuiabá, MT, vol.1, 185-193.
- GUERRA, A.J.T., MARÇAL, M., ALENCAR, A. e SILVA, E. (1995). Monitoramento de voçorocas em Açailândia - Maranhão. *Anais do V Simpósio Nacional de Controle de Erosão*, Bauru - SP, 373-376.
- HAMBLIN, A.P. e DAVIES, D.B. (1977). Influence of organic matter on the physical properties of some East Anglian soils of high silt content. *Journal of Soil Science*, 28, 11-22.
- IMESON, A.C. e KWAAD, F.J.P.M. (1990). The response of tilled soils to wetting by rainfall and the dynamic character of soil erodibility. *In: Soil erosion on agricultural land*. Editores: J. Boardman, I.D.L. Foster e J.A. Dearing, 3-14.
- JORGE, J.A. (1988). *Solo: manejo e adubação*. 2ª ed. 2ª reimp. Nobel, São Paulo, 307 p.
- KIEHL, E.J. (1979). *Manual de Edafologia: relações solo-planta*. Agronômica Ceres, São Paulo, 262p.
- LUK, S.H. (1979). Effect of soil properties on erosion by wash and splash. *Earth Surface Processes*, 4, 241-255.
- MORGAN, R.P.C. (1980). Field studies of sediment transport by overland flow. *Earth Surface Processes*, 5, 307-316.

- MORGAN, R.P.C. (1983). The non-idenpendence of rainfall erosivity and soil erodibility. *Earth Surface Processes and Landforms*, 8, 323-338.
- MORGAN, R.P.C. (1984). Soil degradation and erosion as a result of agricultural practice. *In: Geomorphology and soils*. Editores: K.S. Richards, R.R. Arnett e S. Ellis. Londres, 370-395.
- MORGAN, R.P.C. (1986). *Soil erosion and conservation*. Longman Group, Inglaterra, 298p.
- MOSS, A.J., GREEN, P. e HUTKA, J. (1982). Small channels: their formation, nature and significance. *Earth Surface Processes and Landforms*, 7, 401-415.
- PALMIERI, F. e LARACH, J.O.I. (1996). Pedologia e Geomorfologia. *In: Geomorfologia e Meio Ambiente*. Orgs. A.J.T. Guerra e S.B.Cunha. Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 59-122.
- PENHA, H.M., FERRARI, A.L., JUNHO, M.C.B., SOUZA, S.L.A., BRENNER, T.L. (1981) - Projeto Carta Geológica do Estado do Rio de Janeiro - Convênio DRM/IG-UFRJ: Projeto Folha Itaipava. Rio de Janeiro, V. I, Relatório Final, Texto, 177 p.
- POESEN, J. (1984). The influence of slope angle on infiltration rate and Hortonian overland flow volume. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, 49, 117-131.
- POESEN, J. e GOVERS, G. (1986). A field-scale study of surface sealing and compaction on loam sandy soils. Part II. Impact of soil surface sealing and compaction on water erosion processes. *In: Assessment of soil surface sealing and crusting*. Proceedings of the symposium held in Ghent, Bélgica, 1985. Editores: F. Callebaut, D. Gabriels e M. De Boodt, 183-193.
- PORTA, J., LÓPEZ-ACEVEDO, M. e ROQUERO, C. (1994). *Edafologia para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. 807p.
- PRADO, H. (1995). Solos Tropicais - Potencialidades, limitações, manejo e capacidade de uso. Piracicaba, 166p.
- RESENDE, M., CURTI, N., REZENDE, S. B. e CORRÊA, G. F. (1995). *Pedologia: base para distinção de ambientes*. Viçosa. NEPUT, 304 p.
- STOCKING, M.A. (1972). Relief analysis and soil erosion in Rhodesia using multi-variate techniques. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, 16, 432-443.

TACKET, J.L. e PEARSON, R.W. (1965). Some characteristics of soil crusts formed by simulated rainfall. *Soil Science*, 99, 407-413.

VIEIRA, L.S. (1988). *Manual de Ciência do Solo: com Ênfase aos solos tropicais*. Agronômica Ceres, São Paulo, 464 p.

WILD, A. (1993). *Soils and the environment: an introduction*. Cambridge University Press, Grã-Bretanha, 287p.

Agradecimentos: Os autores desse artigo expressam seu agradecimento à FUJB (Fundação Universitária José Bonifácio) e ao CNPq pelo apoio dado a esse projeto. E aos bolsistas de Iniciação Científica, Anderson Siqueira Lamin e Cláudia Blanco de Dios pela compilação da bibliografia desse trabalho.