

CONSIDERAÇÕES SOBRE A ERODIBILIDADE DOS SOLOS E A EROSIVIDADE DAS CHUVAS E SUAS CONSEQÜÊNCIAS NA MORFOGÊNESE DAS VERTENTES: UM BALANÇO BIBLIOGRÁFICO

Antônio Carlos Vitte [1]
Juliano Pereira de Mello [2]

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar um balanço bibliográfico sobre a erodibilidade do solo e erosividade da chuva, bem como mostrar o uso de técnicas morfométricas para medição das variações nas formas das vertentes e suas relações com os processos erosivos iniciais. Destacam-se, também, a influência do comprimento das vertentes e da sua declividade, além dos diferentes tipos de cobertura vegetal que podem oferecer maior ou menor proteção ao solo. Finalmente, o trabalho apresenta uma tipologia das principais formas de erosão pluvial, com destaque para o processo de voçorocamento.

Palavras-chave: Erodibilidade. Erosividade. Morfometria. Bacia Hidrográfica. Voçorocas. Vertentes.

ABSTRACT

This work presents an approach about the erodibility of soil and erosivity of rain definitions, as well as the use of morphometric techniques to measure the variations in the sidewalls forms and its relations with the initial actives process. Moreover, the study emphasizes the influence of sidewalls length and slope, of the different types of vegetation cover that can offer more or less protection to soil and present a typology of the principal pluvial erosion forms, more specifically, in the gully analysis and making as analysis unit the watershed.

Key words: Erodibility. Erosivity. Morphometric. Watershed. Gullys. Slopes.

INTRODUÇÃO

Botelho (1999) ressalta que diversos pesquisadores chamam a atenção para a bacia hidrográfica como uma unidade natural da superfície terrestre, na qual é possível reconhecer e estudar as inter-relações existentes entre os diversos elementos da paisagem e os processos que atuam na sua esculturação, tal como o de **erosão**. Para Guerra (1975) *apud* Cunha (1997), tais inter-relações estão ligadas

à noção de “dinamismo”, a qual é entendida como a possibilidade de alargamento ou de diminuição da área da bacia, através dos processos erosivos e de capturas.

Segundo Bertoni e Lombardo Neto (1990, p. 68), a erosão é o processo de desprendimento e arraste acelerado das partículas do solo, causado pela água e pelo vento. De acordo com Toy e Hadley (1987) *apud* Cunha (1997), a erosão dos solos é um processo “normal” no desenvolvimento da paisagem, sendo responsável pela remoção do material de superfície por meio do vento, do gelo ou da água. Sob tais condições, a erosão é considerada um processo natural. No entanto, a erosão acelerada dos solos, isto é, aquela que ocorre em intensidade superior à erosão “normal” é, usualmente, conseqüência dos resultados das atividades humanas sob determinadas condições de clima, vegetação, solo e relevo (VILELA FILHO, 2002).

Cunha (1997) destaca que a erosão dos solos é considerada normal, quando ocorre um equilíbrio entre os processos de formação do solo e seu desgaste natural. Quando o processo erosivo é mais intenso, sendo mais veloz que a formação do solo, ocorre a erosão acelerada – chamada de erosão antrópica –, caso tenha sido provocada pela ação humana. Tal situação ocorre quando são encontradas determinadas condições de solo, litologia e relevo que proporcionam o desencadeamento da substituição da vegetação natural por outro tipo de cobertura vegetal, o qual não proporciona proteção eficiente contra a erosão, dificultando o estabelecimento do processo pedogenético que recomporia a camada erodida.

Enquanto morfogênese, a erosão é responsável pela ocorrência da esculturação da crosta terrestre, sendo condicionada por fatores como o regime climático, o relevo, a cobertura vegetal e do tipo de solo. A erosão, enquanto processo, é resultante da dinâmica de um determinado sistema ambiental, ou seja, da dinâmica de uma dada paisagem entendida como sendo a síntese dos diversos componentes que a produzem (DOLLFUS, 1973), e que está em desequilíbrio, provocado por interferências naturais ou antrópicas em um ou mais de seus fatores.

Esse desequilíbrio é resultado do balanço ecodinâmico¹ de um determinado sistema ambiental (TRICART, 1977).

A erosão é causada por forças ativas, como as características da chuva, pois, a água pluvial exerce sua ação erosiva sobre o solo pelo impacto das gotas, que caem com velocidade e energia variáveis, dependendo do seu diâmetro, e pelo escoamento da enxurrada, a qual tem sua velocidade e volume variando segundo a declividade, o comprimento do declive do terreno e a capacidade que tem o solo de absorver água; e por forças passivas, como a resistência que exerce o solo à ação erosiva da água (determinada por diversas de suas características ou propriedades físicas e químicas) e a densidade da cobertura vegetal (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990, p. 45).

Segundo Bertoni e Lombardo Neto (1990, p. 45), a chuva é um dos fatores de maior importância para a erosão, sendo que sua intensidade, sua duração e a sua frequência são as propriedades mais importantes para o processo erosivo.

Lal (1988, p. 141) aponta a erodibilidade do solo e a erosividade da chuva como sendo dois fatores físicos significantes para a magnitude e/ou intensidade da erosão do solo.

Sendo assim, passaremos a abordar cada fator supracitado:

ERODIBILIDADE DO SOLO

Erodibilidade do solo, segundo Lal (1988, p. 141), é o efeito integrado de processos que regulam a recepção da chuva e a resistência do solo para

¹ De acordo com TRICART (1977), um sistema ambiental está em desequilíbrio, quando a morfogênese, ou erosão, predomina sobre a pedogênese, caracterizando um meio ecodinâmico instável. Por outro lado, nos meios em que ocorre o domínio da pedogênese sobre a morfogênese, estes se caracterizam pelo equilíbrio dinâmico estável. Na concepção de TRICART (1997), o desequilíbrio de um sistema ambiental ocorre em função de condições naturais, como mudanças climáticas ou estruturais, ou pela intervenção humana, com a organização do espaço.

desagregação de partículas e o transporte subsequente. Esses processos são influenciados pelas propriedades do solo, assim como a distribuição do tamanho das suas partículas, estabilidade estrutural, conteúdo de matéria orgânica, natureza dos minerais de argila e constituintes químicos. Além desses, consideram-se que, os parâmetros do solo que afetam a sua estrutura, hidratação, e as características da circulação da água que afetam a erodibilidade do solo.

Essas características do solo são propriedades dinâmicas, pois podem ser alteradas a todo tempo e sob diferentes usos da terra, manejo superficial do solo, e sistemas de agricultura e, assim, conseqüentemente, sua erodibilidade também muda ao longo do tempo.

A partir daí, Lal (1988, p. 141-142) ressalta a textura do solo como um fator importante que influencia a erodibilidade por afetar os processos de desagregação e transporte, uma vez que, enquanto grandes partículas de areia resistem ao transporte, solos de textura fina (argilosos) também resistem à desagregação, sendo a areia fina e o silte as texturas mais suscetíveis à desagregação e ao transporte. Assim, solos derivados de materiais originados de transporte eólico, por exemplo, são muito susceptíveis à erosão.

Propriedades texturais e estruturais também influenciam a interação com a chuva (solo-chuva) e, conseqüentemente, sua capacidade de infiltração. A taxa de equilíbrio de infiltração é uma função da porosidade total, a proporção relativa de macroporos, e a estabilidade e continuidade de macroporos, além do que, os bio-canais criados por raízes deterioradas e pela fauna do solo têm maiores efeitos na capacidade de infiltração (LAL, 1988).

Ainda segundo Lal (1988, p. 142), vários pesquisadores têm usado índices baseados em medidas rotineiras das propriedades do solo para avaliar a sua relativa suscetibilidade à erosão, tendo sido criados vários índices, como medidas de desagregação do solo ou de sua resistência à desagregação. Tais índices são baseados em propriedades que governam a agregação e a estabilidade de agregação, infiltração da água e propriedades de retenção, impacto das gotas da chuva, e processos termodinâmicos que governam o enfraquecimento e/ou a quebra de agregados. Tais índices são medidas relativas de desagregação e, sendo assim, talvez não reflitam o comportamento de campo do solo, em resposta à chuva e ao seu uso e ocupação.

A escolha de um índice apropriado depende de muitos fatores; o mais importante deles está na sua relevância em relação aos processos que governam a erosão sob condições naturais ambientais (ULEESCHAWER; LAL; DE BOODT, 1978 *apud* LAL, 1988, p. 142). Além disso, ressalta-se que um índice conveniente deve apresentar as seguintes características:

- a) ser simples e facilmente adaptado para medidas rotineiras;
- b) ser relacionável a outras propriedades quantificáveis do solo;
- c) ser facilmente usado para classificar solos dentro de categorias de erodibilidade.

Considerando tais características, talvez não exista um único índice que os pesquisadores possam usar para todos os solos na representação do comportamento de campo. Então, um fator composto ou a combinação de vários índices pode ser mais adequado para descrever, aproximadamente, o comportamento de campo.

EROSIVIDADE DA CHUVA

Lal (1988, p. 150) coloca que a força dirigente dos agentes de erosão, os quais causam a desagregação do solo e seu transporte é chamada de erosividade. A erosividade da chuva é devida, parte ao impacto direto das gotas de chuva, e parte ao escoamento que a chuva gera. A capacidade de a chuva causar erosão do solo é atribuída à proporção e distribuição dos pingos d'água, segundo a carga de energia da chuva. A erosividade de uma chuva é atribuída à sua energia cinética ou *momentum*, parâmetros facilmente relacionados à intensidade da chuva ou à sua quantidade total.

O *momentum* pode ser definido como um produto da massa pela velocidade. Trata-se de uma medida da pressão exercida pela chuva sobre o solo. Pressão, ou força por unidade de área, a qual tem a natureza de um *stress* mecânico que causa a desagregação dos agregados do solo.

A energia cinética da chuva, para Lal (1988, p. 150), é um dos principais fatores iniciantes da desagregação do solo. Medidas diretas da energia cinética de suas gotas podem ser feitas com o uso de aparelhos acústicos. A energia cinética também pode ser avaliada pela medição da distribuição do tamanho das gotas da chuva, assumindo velocidade terminal correspondente a um dado tamanho de gota. Existem vários métodos de determinação da distribuição dos tamanhos das gotas, como, por exemplo, o de “bola de farinha”, técnica da mancha, ou métodos de captura no óleo. Além disso, muitas equações empíricas têm sido desenvolvidas relacionando energia cinética à intensidade da chuva ou ao total da chuva. Kinnel (1981) *apud* Lal (1988, p. 150) descreve a intensidade da energia cinética relacionando-a de duas maneiras:

- a) A proporção de gasto da energia de impacto da chuva (*rainfall kinetic energy*) (ERR), a qual tem as unidades de energia por unidade de área por unidade de tempo;
- b) O total da energia de impacto da chuva gasto por unidade de quantidade de chuva (ERA), a qual tem as unidades de energia por unidade de área por unidade de profundidade (mm).

ERA e ERR são relatadas a seguir:

ERA= C ERR I/1, onde I é a intensidade da chuva (mm/tempo) e C é uma constante empírica. Geralmente, usam-se equações algébricas que relacionam a energia de impacto e a intensidade da chuva:

$$\text{ERA} = a + b \log_{10} I$$

$$\text{ERA} = c(b - a I/1)$$

$$\text{ERA} = bI - a, \text{ onde } I \text{ é a intensidade da chuva e } (a) \text{ e } (b) \text{ são constantes empíricas.}$$

Segundo Bertoni e Lombardo Neto (1990), somente cerca de quarenta anos após diversos estudos realizados no campo e em laboratório, tornou-se clara a compreensão de que o impacto das gotas da chuva em um terreno descoberto e o conseqüente desprendimento das partículas do solo é, realmente, a principal causa da erosão provocada pela água.

De acordo com Guerra (1999, p. 18), no momento em que as gotas de chuva atingem o solo, começa o *splash*, também conhecido como erosão por salpicamento, o qual se trata do estágio inicial do processo erosivo, em que as partículas que compõem o solo são preparadas para serem transportadas pelo escoamento superficial. Essa preparação se dá tanto pela ruptura dos agregados, como pela própria ação transportadora que o salpicamento provoca nas partículas. O *splash* pode variar em função da resistência do solo ao impacto das gotas da chuva e da

energia cinética provocada por elas, que, em função de sua intensidade, como supracitado, provocarão a ruptura dos agregados.

As medições diretas da erosividade, segundo Lal (1988), envolvem monitoramento da carga de energia e *splash* simultaneamente. O *splash* de grãos causados por uma chuva relaciona parâmetros monitorados simultaneamente, a saber: energia cinética (de impacto), *momentum*, tamanho médio das gotas, intensidade da chuva (LAL, 1988, p. 150).

RELEVO

Quanto ao relevo, a maior influência está no comprimento e na declividade das vertentes. As mais íngremes facilitam a erosão dos solos, na medida em que aumentam o escoamento superficial. Roose (1977) *apud* Tavares e Vitte (1993) cita trabalhos de diversos pesquisadores, demonstrando que as perdas de terra crescem de modo exponencial em função do aumento da inclinação das vertentes. Experimentos de campo realizados por Bertoni *et al.* (1972) *apud* BERTONI; Lombardi Neto (1990, p. 55), apresentados na tabela 01, demonstram, por sua vez, que quanto maior o comprimento das rampas (vertentes) maior a perda de solo por hectare.

Tabela 01 – Efeito do comprimento de rampa nas perdas de solo (toneladas/hectare).

Comprimento de rampa	1º segmento 25m	2º segmento 25m	3º segmento 25m	4º segmento 25m	Média
m	Perdas em t/ha	Perdas em t/há	Perdas em t/ha	Perdas em t/ha	Perdas em t/ha
25	13,9	-	-	-	13,9
50	13,9	25,9	-	-	19,9
75	13,9	25,9	38,8	-	26,2
100	13,9	25,9	38,8	51,4	32,5

Fonte: Bertoni *et al.* (1972) *apud* BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

COBERTURA VEGETAL

Os diferentes tipos de cobertura vegetal podem oferecer maior ou menor proteção ao solo e, assim, conseqüentemente, interferindo na intensidade do processo erosivo. Tal constatação é demonstrada segundo os dados obtidos pela Seção de Conservação do Solo do Instituto Agrônômico de Campinas (IAC), nos quais, Bertoni e Lombardo Neto (1990) apontam que as perdas variam de acordo com o tipo de uso do solo, o que é mostrado no quadro 01:

Quadro 01 – Efeito do tipo de uso do solo sobre as perdas por erosão. Médias ponderadas para três tipos de solo do Estado de São Paulo.

Tipo de uso	Perdas de solo (t/ha)
Mata	0,004
Pastagem	0,4
Cafezal	0,09
Algodão	26,6

Fonte: BERTONI *et al.* (1972) *apud* BERTONI; LOMBARDI NETO, (1990).

EFEITOS AMBIVALENTES

É importante que se ressaltem, para efeito de enriquecimento da análise aqui proposta, as considerações feitas por De Ploey (1981) com relação a possíveis efeitos ambivalentes de alguns fatores diretamente relacionados aos processos erosivos acima tratados, mais especificamente, com relação à cobertura vegetal, e a interferência do embasamento rochoso nas vertentes que apresentam processos erosivos.

De Ploey (1981, p. 171) afirma que a origem de todas as forças geomorfológicas é, primeiramente, derivada da gravidade e do clima. A gravidade pode ser considerada como força constante, como um componente da declividade. O clima fornece quantidades de energia, as quais são fortemente variáveis no tempo e no espaço. Porém, nessa abordagem, o fenômeno de dependência do tempo será, preferencialmente, desconsiderado, para enfatizar a distribuição espacial das forças de erosão e resistências ao longo das vertentes. A resistência interna à gravidade de um manto de alteração (regolito) é analisada em termos de sua plasticidade.

Sendo assim, De Ploey (1981, p. 171) aponta que as variações espaciais dos limites de plasticidade (resistência) são, primeiramente, condicionadas pela variação dependente do tempo de resposta dos sistemas das estruturas minerais e suas propriedades físico-químicas, além do que, a presença ou não de vegetação deve ser analisada quanto à estabilidade das vertentes.

Uma opinião comum é a de que a vegetação e o embasamento rochoso protegem as vertentes contra a erosão. Essa opinião é baseada, principalmente, na suposição de que a força da gravidade é neutralizada pela resistência oferecida pelos afloramentos rochosos e que a vegetação e a cobertura rochosa desviam a

água da superfície do solo, absorvem a água e parte da energia erosiva de origem climática (DE PLOEY, 1981, p. 171).

Porém, segundo De Ploey (1981), resultados experimentais apontaram para um efeito ambivalente desses fatores. De fato, parece que a vegetação e o embasamento rochoso poderiam, também, ativar erosão sob circunstâncias específicas, ou, no mínimo, que um balanço delicado pode ser obtido entre efeitos opostos, os quais, no entanto, ainda não são bem conhecidos.

FORMAS EROSIVAS

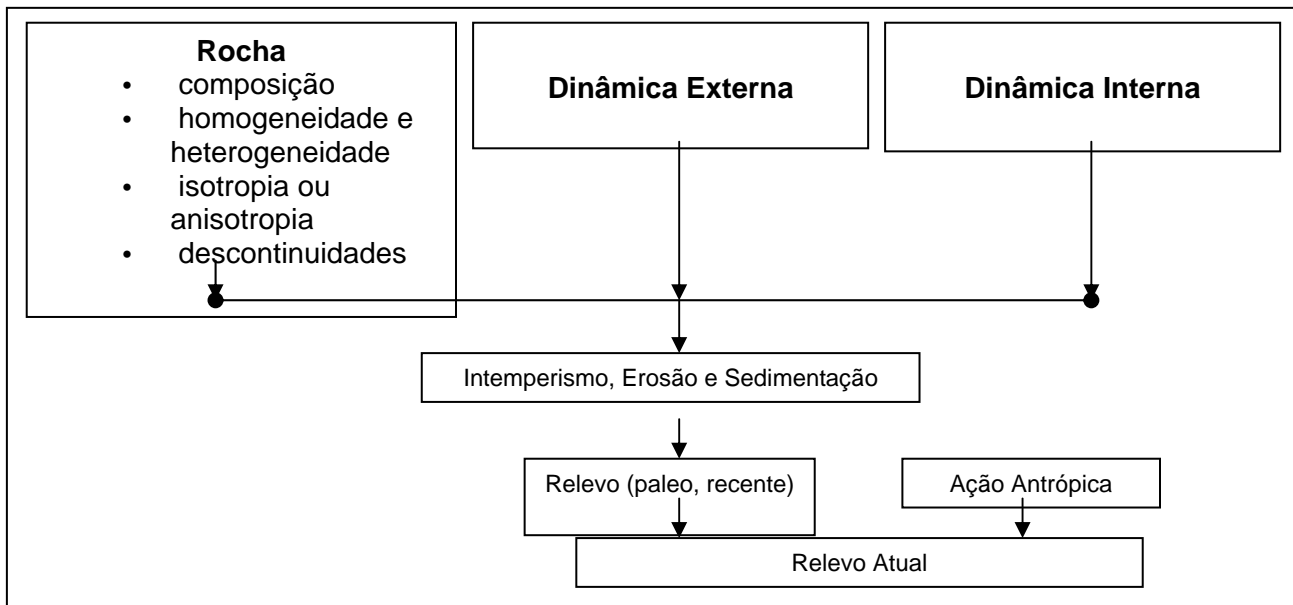
As principais formas de erosão hídrica pluvial podem ser classificadas como: a) Erosão pelo impacto da chuva ou *splash*; b) Erosão em lençol ou laminar; c) Erosão em ravinas; d) Erosão em voçorocas.

Usando essa classificação, vamos nos deter, de maneira mais específica, na análise dos processos erosivos em voçorocas, termo que provém etimologicamente do tupi-guarani *ibiçoroc* e tem o significado de terra rasgada (PICHLER, 1953 *apud* FACINCANI, 1995), ou então de *mbaê-çorogca*, traduzível por “*coisa rasgada*” (FURLANI, 1980 *apud* FACINCANI, 1995, p. 1). Boçoroca é a forma paralela do termo voçoroca que aqui usaremos.

Segundo Vieira (1975), a voçoroca é caracterizada como uma forma de relevo gerada por um conjunto de processos morfogenéticos, os quais estão subordinados tanto a fatores climáticos, litológicos, pedológicos, topográficos, fitogeográficos e antrópicos, como à dimensão, à forma e ao estágio evolutivo em que se encontra essa forma erosiva. Sendo assim, à medida que ela aumenta de tamanho e modifica a sua forma, os processos atuantes tendem, também, a mudar qualitativa e quantitativamente.

Facincani (1995, p. 20) ressalta que diversos fatores controlam direta ou indiretamente o processo e a formação de voçorocas, os quais estão representados no fluxograma a seguir (figura 01):

Figura 01 – Fluxograma de fatores condicionantes na modelagem do relevo atual



Fonte: FACINCANI (1995).

Segundo Guerra (1999, p. 59), para esclarecer o que distingue uma ravina de uma voçoroca, diversas definições podem ser encontradas na literatura internacional e nacional, como designados por Heede (1970) *apud* Ebisemiju (1988, p. 308); Imenson e Kaad (1980) *apud* Crouch e Blong (1989, p. 291) e Ponçano e Prandini (1987) *apud* Guerra (1999, p. 59). Porém, em geral, predominam as distinções de caráter dimensional, sendo assim, as voçorocas caracterizam-se como incisões no solo com largura e profundidade superiores a cinqüenta centímetros.

Técnicos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) têm veiculado uma definição, segundo a qual ravinas seriam canais criados pela ação do escoamento superficial, e as voçorocas, canais esculpidos pelo afloramento do lençol freático (CAVAGUTI, 1994; CANIL *et al.*, 1995 *apud* GUERRA, 1999, p. 59). Porém, para Guerra (1999, p. 59) apesar de essa classificação ter utilidade técnica facilitadora para o planejamento, opõe, por exemplo, mecanismos que, com frequência, interagem em diferentes estágios do processo erosivo, dificultando, com isto, a compreensão da evolução do processo erosivo a partir de sulcos, passando por ravinas e chegando a voçorocas, além de estar em desacordo com as terminologias utilizadas internacionalmente.

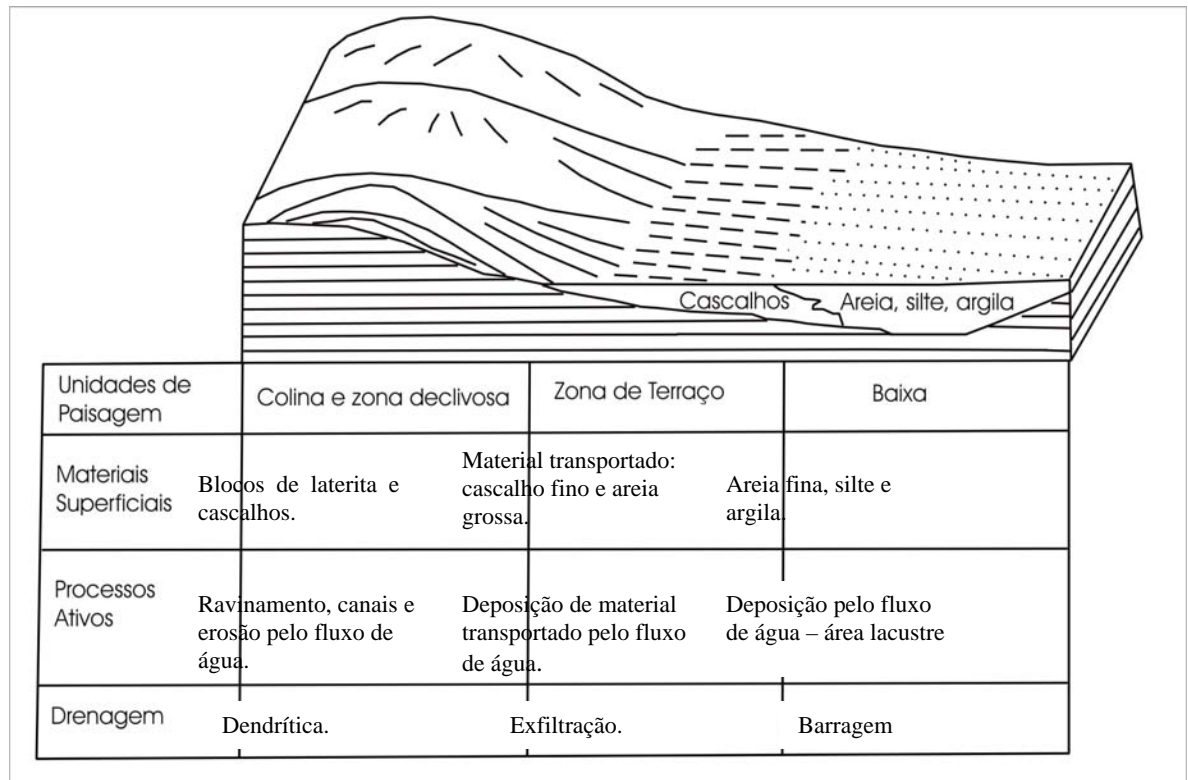
Para Ebisemiju (1989, p.307), uma voçoroca pode ser definida como um canal, formado a partir de uma incisão fluvial em materiais terrestres inconsolidados, sendo caracterizada por transmissão efêmera do fluxo d'água, vertentes íngremes, e verticalização das cabeceiras. Uma voçoroca pode ser diferenciada de uma ravina por sua largura e profundidade, as quais devem ser maiores que 0,3 m e 0,6 m respectivamente (BRICE, 1966, IMESON; KWAAD, 1980 *apud* EBISEMIJU, 1989, p. 307), e a partir de canais de dissecação que apresentem uma proporção entre suas larguras e profundidades menores que a unidade (WILLIANS; MORGAN, 1976 *apud* EBISEMIJU, 1989, p. 307).

Ebisemiju (1989, p. 308) ressalta que, exceto pelas medições da largura, profundidade e comprimento, as análises de voçorocas têm sido qualitativas, além do que, em nenhum dos trabalhos publicados houve qualquer tentativa para descrever completa e quantitativamente a morfologia da voçoroca e examinar estatisticamente suas inter-relações e variações a respeito de seus fatores causais e determinísticos. As formas das voçorocas e seus padrões espaciais também fornecem importantes pistas para se analisar a natureza dos materiais superficiais, em que elas se formam (LEUDER, 1959 *apud* EBISEMIJU, 1989, p. 308).

Além disso, e ainda mais importante, temos que a morfologia dos sistemas fluviais reflete muito fielmente os mecanismos e as dinâmicas dos processos que os iniciaram, assim como os processos atuais e as propriedades dos materiais superficiais influenciando os mecanismos desses mesmos processos. Heede (1970) *apud* Ebisemiju (1989, p. 308) aponta o entendimento da morfologia das voçorocas como um primeiro passo na avaliação dos processos de voçorocamento e uma conexão entre passado, presente e futuro desse tipo de evento. Esforços em previsões acerca do desenvolvimento futuro de voçorocas obteriam melhores resultados se baseados em conhecimentos detalhados e análise da de sua morfologia. Assim, as análises terão que ser quantitativas para que os resultados sejam significativamente aplicados.

Para tanto, Ebisemiju (1989, p. 308) sugere o uso de um bloco diagrama, como o da figura 02, para que sejam analisados os processos presentes em cada segmento da vertente, e propõe uma série de medidas e relações quantitativas a serem desenvolvidas a partir da análise dos perfis transversais e longitudinais das feições de ravinamento e voçorocamento. Para tanto, ressalta os seguintes elementos: comprimento do canal, relevo relativo, média da base, média da largura entre os topos, média da profundidade máxima, média da profundidade, declividade média máxima, declividade média, proporção entre a largura e a profundidade, proporção entre a largura superior e a largura da base e média da área transversal.

Figura 02 – Bloco diagrama para observação de características ao longo da Vertente



Fonte: Adaptado de EBISEMIJU (1989).

Ebisemiju (1989, p. 320) ressalta que o comprimento da vertente de uma voçoroca é fortemente influenciado pela largura entre os topos, a profundidade máxima e média, área transversal e raio hidráulico; o relevo relativo é determinado pelo valor médio e máximo da declividade, e pela razão entre a largura e a profundidade, sendo identificado como a variável da declividade das vertentes; a média da base é fortemente influenciada pelas variáveis da declividade da base do canal e a proporção entre a declividade da vertente e a declividade da base.

Baseando-se em análises feitas segundo os parâmetros supracitados, temos que Ologe (1972) *apud* Ebisemiju (1989, p. 320) aponta que as variáveis do perfil transversal são mais independentes que os parâmetros do perfil longitudinal. Em segundo lugar, a ortogonalidade das variáveis dos perfis transversal e longitudinal sugere que os processos causadores de mudança no comprimento e no relevo do canal, provavelmente, têm pequeno efeito sobre a forma do perfil transversal. Então, o comprimento e o relevo de um canal são determinados pela razão de retração da cabeceira, a qual é controlada pela natureza dos processos e materiais. Além disso, são apontados como processos atuantes na cabeceira do canal: abrasão, gotejamento, escorregamento, drenagem, rachaduras, desmoronamento e impermeabilização.

As voçorocas podem ser classificadas pela sua profundidade e pela área da sua bacia. Então, de acordo com Ireland (1939) *apud* Bertoni; Lombardi (1990, p. 170), as voçorocas são consideradas profundas, quando apresentam mais de 5 metros do topo ao canal; médias, quando têm de 1 a 5 metros, e pequenas, com menos de 1 metro. Também, segundo a área da bacia em que se encontram, elas são consideradas pequenas quando a área de drenagem é menor que 2 hectares; médias, quando de 2 a 20 hectares, e, grandes, quando têm mais de 20 hectares, o que, é o caso da voçoroca analisada neste trabalho, a qual possui uma área de, aproximadamente, 123,415 ha.

Segundo Bertoni e Lombardi (1990, p. 77), as formas de voçorocas variam em função do material que constitui o solo, pois, se os diferentes horizontes do solo forem de consistência uniforme, as paredes da voçoroca são relativamente verticais, e se o material for muito friável, estará sujeito a freqüentes desmoronamentos. Por outro lado, quando o material do subsolo ou de horizontes mais profundos for mais resistente que o horizonte superficial, as voçorocas tendem a apresentar paredes em forma de “V”.

Guerra (1999) ressalta que o voçorocamento pode ser resultado do alargamento e aprofundamento de ravinas que se dá pela ação erosiva das águas na base e nas suas laterais, gerando, conseqüentemente, um colapso do material em suas laterais e em direção ao seu topo.

As voçorocas também podem se originar da erosão causada pelo escoamento sub-superficial, o que foi constatado pelas pesquisas realizadas por Berry e Ruston (1960) *apud* Guerra (1999), as quais, indicaram o surgimento de voçorocas por escoamento sub-superficial em áreas com degradação da cobertura vegetal, sendo que, nessa situação, as chuvas de grande intensidade provocam fluxos sub-superficiais, os quais, ao removerem sedimentos, aumentam o diâmetro dos dutos pelos quais a água é transportada, provocando, por isso, um colapso no material localizado em superfície.

Uma terceira origem para a formação de voçorocas é descrita por Vittorini (1972) *apud* Guerra (1999), e ocorre a partir do escoamento superficial concentrado das águas das chuvas no interior de cicatrizes abertas por deslizamentos em vertentes íngremes.

Com relação à análise do desenvolvimento de uma voçoroca, são necessárias medições tanto no seu desenvolvimento horizontal quanto no vertical. A colocação de estacas a intervalos regulares, ou em distribuição retangular, e as medições feitas regularmente, fornecem os dados para determinar a intensidade com que as bordas da voçoroca estão se movimentando; para esse tipo de levantamento, também podem ser usadas fotografias, tiradas sempre do mesmo ponto (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

Em geral, o índice anual de avanço de uma voçoroca é variável, sendo mais rápido em alguns estádios de seu ciclo de desenvolvimento que em outros; as observações indicam que a velocidade de avanço decresce, progressivamente, nos estádios finais de desenvolvimento (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

A previsão do índice do avanço de uma voçoroca, baseada somente na intensidade de seu desenvolvimento, pode conduzir a sérios erros de avaliação, a menos que se dê adequada consideração aos fatores que podem ter maior influência no índice de avanço. Os fatores condicionantes, tais como as características dos materiais geológicos, topografia, uso do solo e volume de enxurrada, são os que alteram a intensidade de desenvolvimento da voçoroca; uma mudança nas condições acima, nas cabeceiras da voçoroca, muda completamente o índice de avanço (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO DAS VERTENTES DE FORMAS EROSIVAS

As variações nas formas das vertentes podem revelar os processos ativos que lhes deram origem (IMESON; KWAAD, 1980, STOCKING, 1981 *apud* CROUCH; BLONG, 1989, p. 291). Sendo assim, com base no artigo “*Gully sidewall classification: methods and applications*” de R. J. Crouch e R. J. Blong (1989), passamos a expor um esquema de classificação relativa para vertentes de canais gerados por erosão, no qual, as diferenças na formas são tomadas para inferência da importância e/ou intensidade relativa em diferentes condições de voçorocamento.

Crouch e Blong (1989, p. 292) apontam que as vertentes de formas erosivas são modificadas por forças impostas pela água corrente, pelo impacto das gotas de chuva e pela gravidade para produzir formas características dependentes da resposta do solo. Por essa causa, várias formas de voçorocas associadas a processos específicos têm sido previamente descritas, tais como:

- a) vertentes produzidas por movimentos de massas após cada deslizamento em função da saturação da base do solo (BRADFORD; PIEST, 1977 *apud* CROUCH; BLONG, 1989, p. 292), ou solapamento do solo a partir da base da vertente pelo escoamento da drenagem no interior do canal;
- b) pilares, catedrais, ou vertentes ravinadas provocadas pelo impacto das gotas de chuva e carreamento de solos susceptíveis (CHARMAN, 1969, VENESS 1980, LINDQUIST, 1980 *apud* CROUCH; BLONG, 1989, p. 292);
- c) subsidência ou vertentes com túneis causados pelo movimento da água subterrânea e dispersibilidade do solo (HEED, 1971, CROUCH *et al.*, 1986 *apud* CROUCH; BLONG, 1989, p. 292);
- d) vertentes declivosas formadas pelo escoamento concentrado das águas pluviais, rastejamento e desenvolvimento da drenagem (SCHUMM, 1956; ENGELEN, 1973 *apud* CROUCH; BLONG, 1989, p. 292).

A classificação das formas supracitadas propõe quatro níveis de caracterização, a saber:

Atividade erosiva em vertentes segundo a área de cobertura vegetal

Processos de deslizamento e remoção de solo em superfícies declivosas estão relacionados com a área de cobertura vegetal do solo. Muitos estudos identificaram que 20% de cobertura vegetal tem sido estabelecido como um mínimo crítico, abaixo do qual as taxas de erosão aumentam fracamente, e 70% é estabelecido como um máximo sobre o qual as taxas decrescem fracamente (NOBLE, 1965; LANG; MCFREY, 1984 *apud* CROUCH; BLONG, 1989, p. 292).

Assim, três categorias de atividade erosiva em vertentes são apresentadas no quadro 02.

Quadro 02 – Categorias de atividade erosiva em vertentes segundo a % de cobertura vegetal

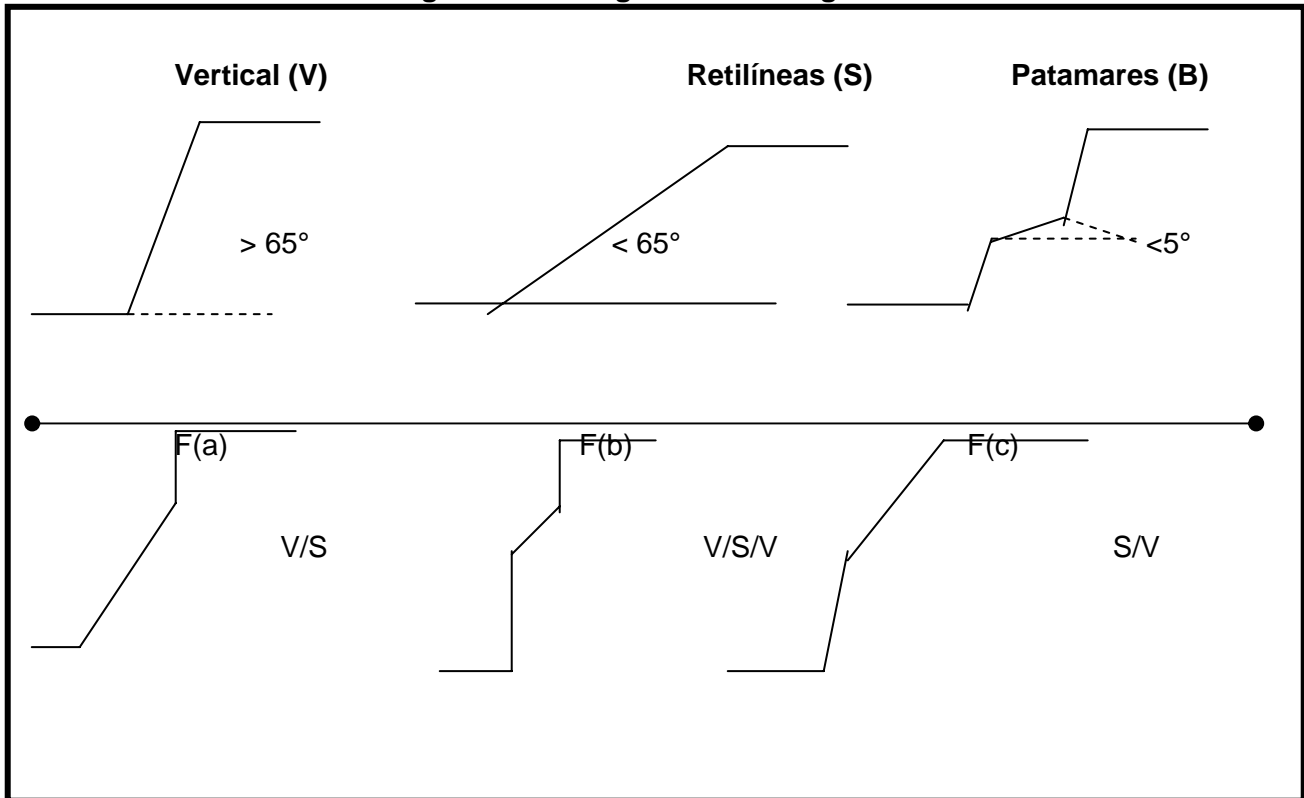
Abreviatura	Estado	Porcentagem da cobertura vegetal
A	Ativa	< 20% de cobertura vegetal
AS	Semi-Ativa	20 – 70% de cobertura vegetal
E	Estável	> 70% de cobertura vegetal

Fonte: Adaptado de CROUCH e BLONG (1989).

Morfologia da vertente

Aqui, são considerados os perfis de vertentes – neste caso, são descritas duas formas dimensionais ao longo de planos verticais (YONG, 1972 *apud* CROUCH; BLONG, 1989). Como sugerido recentemente, a formas dos perfis são uma função dos processos de modelagem passados e presentes da vertente, as quais são classificadas e apresentadas na figura 03.

Figura 03 - Categorias morfológicas de vertentes



Fonte: Adaptado de CROUCH e BLONG (1989).

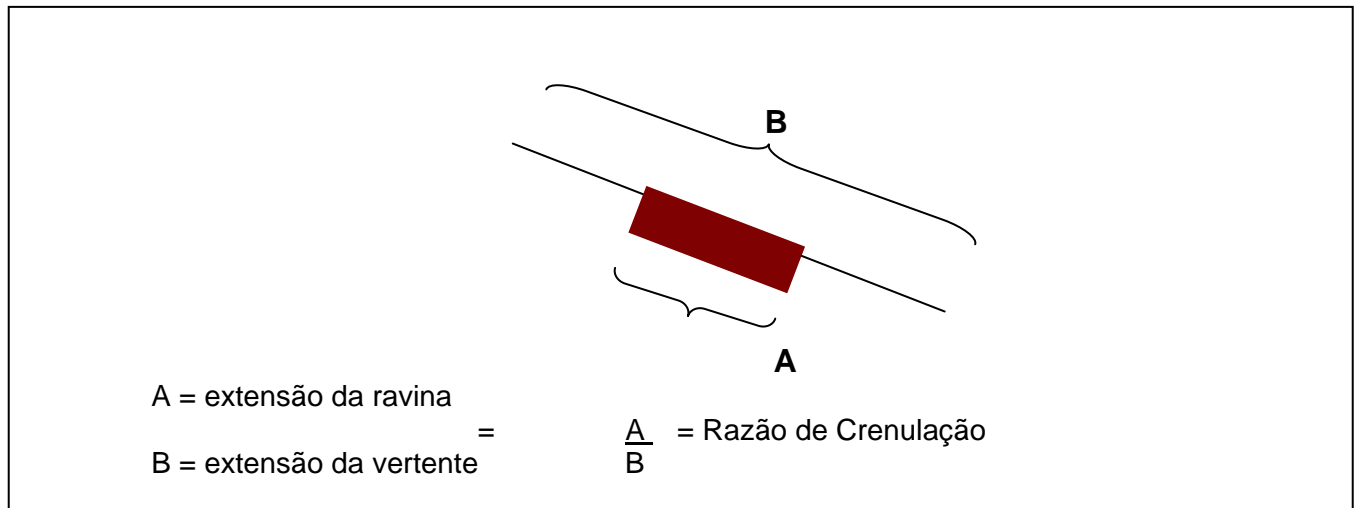
Processos dominantes na vertente

Voçorocas exibem feições que são desenvolvidas em resposta a grupos de eventos incidentes sobre um solo com propriedades específicas. A classificação dessas feições permite analisar segmentos da vertente que apresentem as mesmas características ou mesmo feições similares. Tais características das formas da vertente podem indicar quais processos estão atuando no processo de voçorocamento, como por exemplo, estriamentos, paredes falhadas por deslizamento e escorregamento circular, caveamento devido ao solo saturado, rebaixamento por fluxos internos à vertente e formação de canais, os quais vão

sendo preenchidos pelo volume de sedimentos deslocado em fluxos concentrados em função dos eventos de deslizamentos na vertente.

Foram definidos 8 estágios no processo de estriamento/ravinamento por Veness (1980) *apud* Crouch e Blong (1989, p. 294). Porém, nesta proposta, eles são resumidos como estriado/ravinado, parcialmente preenchidas e estrias rebaixadas. Blong (1985) *apud* Crouch e Blong (1989) apontou que a erosão por ravinamento, provavelmente, varia em proporção à área superficial exposta. Isto pode ser mais bem avaliado em termos da razão de crenulação (extensão da vertente ignorando saliências menores que 0,15 m), a qual está representada na figura 04. Conseqüentemente, o ravinamento pode ser definido como fraco, moderado e forte, em função da razão do espaçamento de cada saliência (estria).

Figura 04 – Razão de Crenulação



Fonte: Adaptado de CROUCH e BLONG (1989).

As vertentes com declividades acentuadas, geralmente superam ângulos estáveis para retenção de solos saturados. Além disso, temos que a saturação que se faz presente em um determinado ponto da vertente ou em um horizonte de solo,

comumente resulta em formação de sulcos. Para esta classificação, a infiltração foi separada em difusa (ou no horizonte) e infiltração concentrada.

Os processos dominantes na vertente estão resumidos no quadro 03.

Quadro 03 – Processos dominantes nas vertentes

Símbolo	Definição
Sulco	
Fw	Fraca crenulação – razão 1:1,5
Fm	Moderada crenulação – razão 1:1,5-3,0
Fs	Forte crenulação – razão 1:>3,0
Fp	Parcialmente drenada (0-50 %)
Fd	Drenada (50-90 %)
Falhas na encosta	
Wt	Desmoronamento (talude vertical e blocos caídos)
Wc	Escorregamento circular
Ws	Bloco deslizado
Wf	Queda de solo
Infiltração	
Sd1	Difusa – Horizonte A2
Sd2	Parte inferior do horizonte A2 (profundidade em m)
Sc1	Concentrada – horizonte A2
Sc2	Parte inferior do horizonte A2 (profundidade em m)
Quedas d'água	
Ov	Talude vertical, saltando do topo
Ou	Minando (por mais que 0,15m)
Os	Canal de escoamento
Oc	Cava desenvolvida em uma camada de solo

Fonte: Adaptado de CROUCH e BLONG (1989).

Feições especiais do processo erosivo

As feições especiais apresentadas por Crouch e Blong (1989) são, geralmente, encontradas nas feições erosivas pesquisadas no Leste da Austrália, listadas no quadro 04.

Quadro 04 – Feições Especiais do Processo Erosivo

Afloramentos Rochosos
Incisões Lineares (canais)
Vestígios de Animais
Sulcos Principais
Canais (> 0,1 m de diâmetro com evidência de fluxo d'água)
Cavidades (> de 0,2 m de diâmetro)
Rachaduras no topo das vertentes (> que 0,15 metros)
Picos Esculpidos (> 0,3 metros de altura)
Blocos caídos
Canais Escavados na Vertente
Ilhas
Sulcos Estriados Maiores

Fonte: Adaptado de CROUCH e BLONG (1989).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo, ao apresentarmos uma revisão bibliográfica com propostas de análise do processo e das formas erosivas, procuramos contribuir para o estudo e entendimento desse fenômeno, o qual, atualmente, tanto pela água como pelo vento, é responsável por cerca de 56% e 28%, respectivamente, da degradação dos solos no mundo. Os problemas de erosão, no Brasil, são resultantes da combinação de um

rápido processo de ocupação e tecnificação do território, solos frágeis e de um regime climático propício à sua ocorrência de forma intensa. Esse motivo nos leva a crer ser necessário compreender, cada vez melhor, os processos responsáveis pela erosão, reconhecendo que eles não são meramente físicos, mas também sócio-econômicos (GUERRA, 1995, p. 15).

Devido à natureza ubíqua do processo de erosão por voçoramento e de suas implicações adversas para a agricultura, conservação do solo e recursos aquíferos, muitos esforços de pesquisa têm sido concentrados sobre vários aspectos das voçorocas, em particular, sobre as condições dominantes que controlam a sua origem, seu desenvolvimento e os mecanismos e proporções do voçorocamento.

Os problemas relacionados à degradação ambiental têm sido alvo da mobilização de dirigentes do setor público e de grupos representativos da sociedade civil e, sem dúvida, dentre as questões ambientais, a erosão dos solos está entre as que têm causado maior preocupação (VITTE, 1997). Com isso, reforça-se a necessidade da compreensão dos processos responsáveis pelas formas erosivas, a fim de que se possa ter um entendimento sobre o porquê de ela ocorrer e, dessa forma, poder associar o processo de ocupação e diferentes usos do território com a conservação daquele mesmo solo.

REFERÊNCIAS

- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 1990.
- BOTELHO, R.G.M. Planejamento ambiental em microbacias hidrográficas. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. A.; BOTELHO, R. G. M. (Org.) **Erosão e conservação dos solos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 269-293.
- CROUCH, R. J.; BLONG, R. J. Gully sidewall classification: methods and applications. **Z. Geomorph. N. F.**, Stuttgart, v. 33, p.291-305, 1989.

CUNHA, C. M. L. **Quantificação e mapeamento das perdas de solo por erosão com base na malha fundiária**. Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, 1997.

DE PLOEY, J. The ambivalent effects of some factors of erosion. **Mém. Inst. Géol. Univ. Louvain**, Louvain, v. 31, p.171-181, 1981.

DOLLFUS, O. **O espaço geográfico**. São Paulo: DIFEL, 1973.

EBISEMIJU, F. S. A morphometric approach to gully analysis. **Z. Geomorph. N. F.**, Stuttgart, v. 33, p.307-322, 1989.

FACINCANI, E. M. **Influência da estrutura e tectônica no desenvolvimento das boçorocas da região de São Pedro, SP**: proposta de reabilitação e aspectos jurídico-institucionais correlatos. 1995. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1995.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia**: uma atualização de bases e conceitos. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. p. 149-209.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

LAL, R. Erodibility and erosivity. In: LAL, R. et al. **Soil erosion research methods**. Washington: Soil and Water Conservation Society, 1988. p. 141-160.

TAVARES, A. C., VITTE, A. C. Erosão dos solos e assoreamento de represas: o caso de Monte Aprazível (SP). **Geografia**, Rio Claro, v. 18, n. 1, p.51-95, 1993.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE, SUPREN, 1977.

VIEIRA, N. M. Os processos morfogenéticos atuantes nas boçorocas de Franca (SP, Brasil). **Notícia Geomorfológica**, Campinas, SP, v. 15, n. 29, p. 3-52, 1975.

VILELA FILHO, L. R. **Estimativa da perda de solos em uma bacia hidrográfica sob o cultivo de frutíferas, no município de Valinhos (SP)**. 2002. 153 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2002.

VITTE, A. C. Metodologia para cálculo de perdas de solo em bacias de drenagem. **Bol. Par. de Geoc.**, Curitiba, n. 45, p. 59-65, 1997.

Informações sobre os autores:

1] Antônio Carlos Vitte – <http://lattes.cnpq.br/0969451922378335>
Prof. Dr. Departamento de Geografia, UNICAMP, Campinas (SP).
Contato: vitte@uol.com.br

2] Juliano Pereira de Mello – <http://lattes.cnpq.br/2341553504635714>
mestrando em Geografia, UNICAMP, Campinas (SP).
Contato: Juliano.mello@ige.unicamp.br