

MODELAGEM DE CANAIS INCISIVOS - REVISÃO¹

Incised channel modeling - revision

Ruth Maria B. de QUADROS²

Celina WISNIEWSKI³

Everton PASSOS⁴

RESUMO

O objetivo deste artigo é documentar as mais importantes pesquisas e aspectos histórico-cronológicos sobre a modelagem da incisão de canais. São apresentados os aspectos qualitativos e quantitativos envolvidos, desde a dedução das equações de Saint-Venant e de Exner, até as mais recentes pesquisas sobre o alargamento e o deslizamento das margens dos canais, considerando a coesão das mesmas. Do ponto de vista quantitativo, ainda há muitos processos importantes a serem solucionados, com destaque para os mecanismos envolvidos na desagregação e transporte de partículas de solo coesivas. Pesquisas recentes mostram que a estimativa da desagregação pelos métodos tradicionais de determinação da resistência do solo pode não ser a mais recomendada para avaliar a resistência na interface solo-água. Isto aponta para a importância dos processos físico-químicos envolvidas na estabilidade das partículas do solo e, conseqüentemente, na sua suscetibilidade à erosão, assim como a importância da sua representação matemática e inclusão na modelagem do processo de incisão de canais.

Palavras-chave:

Sulco, voçoroca, desagregação, estabilidade de agregados, erosão.

ABSTRACT

This paper aims at documenting some of the more important research and historical-chronological aspects concerning incised channels modelling. Qualitative and quantitative aspects are presented, beginning with the deduction of the Saint-Venant and Exner equations and going through the more recent equations explaining the enlargement and stability of cohesive riverbanks. From a quantitative point of view, there are still many important processes to be solved, specially those regarding detachment mechanisms and transport of cohesive soil aggregates. Recent research has shown that soil evaluation aggregates detachment by conventional methods (soil strength determination) cannot measure the properties at the soil-water interface with the necessary resolution. These results allow visualizing the importance of the physicochemical mechanisms involved on aggregate stability at the soil-water interface; and, consequently, its degradation susceptibility. These mechanisms should be mathematically described and included in incised channel modeling.

Key-words:

Rill, gully, detachment, aggregate stability, erosion.

1 O presente trabalho foi realizado como o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – Brasil.

2 ruth-maria.quadros@mma.gov.br, Secretaria de Recursos Hídricos/MMA, SGAN 601, lote 1, Brasília-DF.

3 cewisni@agrarias.ufpr.br, professora, DSEA –UFPR, R. dos Funcionários, 1540 – 80035-050, Curitiba-PR

4 everton@ufpr.br, UFPR

INTRODUÇÃO

A alteração morfológica de um canal é um problema de caráter mundial que vem sendo intensificado década após década, devido a causas antrópicas, como: o aumento da demanda pelo uso dos recursos naturais, ou a causas naturais, como: alterações climáticas, geológicas ou geomorfológicas, principalmente no que diz respeito a grandes cheias (PROSER et al., 1994; ERSKINE, 1999; SCHUMM et al., 2001). O efeito combinado ou não de tais causas deve ser dimensionado a nível econômico, social e ecológico, tanto a curto como a longo prazo.

Embora se esteja longe disso, apresenta-se nesta revisão uma caracterização e classificação geral sobre canais incisivos, evidenciando os aspectos qualitativos e quantitativos do problema, assim como se apresenta a evolução do seu entendimento até os dias atuais, com o objetivo de documentar as mais importantes pesquisas e aspectos histórico-cronológicos sobre a modelagem da incisão de canais. Mostra-se que a interação de diferentes áreas de pesquisa pode ser bastante útil para uma compreensão melhor desse complexo problema.

CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA DA INCISÃO DE CANAIS

DEFINIÇÕES BÁSICAS REFERENTES AO PROCESSO DE INCISÃO DE CANAIS

A incisão é o processo pelo qual um caudal (*stream*) aprofunda seu canal (JACKSON, 1997) pela diminuição progressiva do nível de base local, que ocorre quando a taxa de sedimentos é menor que a taxa de transporte (TINNEY, 1962) ou quando o nível de base é rebaixado por uma quebra abrupta no perfil longitudinal do canal (*knickpoint*) (SCHUMM et al., 2001). Essa erosão do leito é denominada de degradação (INTERNATIONAL ... 1978), a qual por sua vez, causa o alargamento das margens do canal, uma vez que o aumento da altura e do ângulo do talude excedem a tensão de cisalhamento do material das margens, causando sua queda (SIMON e DARBY, 1999).

Com isso, haverá uma evolução e rejuvenescimento da rede de drenagem, resultando na formação de uma hierarquia de canais incisivos, desde canais entrenchados (*entrenched channels*) no vale principal e adição de canais de ordens menores à rede de drenagem (onde não havia um canal existente previamente), ou seja, voçorocas a montante do canal

entrenchado e sulcos nas partes mais acidentadas da paisagem (ERSKINE, 1999; SCHUMM et al., 2001). Todos estes tipos de canais incisivos estão integrados em uma rede de drenagem totalmente expandida (SCHUMM et al., 2001).

Analisando a dinâmica da incisão de canais, de um ponto de vista geomorfológico e num tempo geológico, vê-se que tal processo resulta da expansão da rede de drenagem de uma bacia de drenagem que expressa seu desequilíbrio com as condições ambientais através de taxas de erosão, transporte e deposição de sedimentos. Se esse desequilíbrio for acentuado (no tempo e no espaço) pelos fatores já citados, ocorrerão taxas maiores que as naturais e, assim, problemas econômicos, sociais e ambientais mais intensos. O desequilíbrio na bacia de drenagem é sentido tanto a montante como a jusante, seja pela degradação (erosão) ou aggradação (sedimentação) de sedimentos, respectivamente.

A aggradação ou sedimentação é o acúmulo de sedimentos em zonas de depressões relativas, o que torna a superfície da litosfera mais uniforme. As formas de aggradação dizem respeito às formas de relevo de acumulação; enquanto que as formas de degradação estão ligadas ao desgaste provocado pelos agentes exodinâmicos (GUERRA e GUERRA, 1997).

Especificamente, a degradação ou incisão de um canal refere-se ao aumento da sua profundidade, resultante de uma taxa de entrada de sedimentos menor que a taxa de saída (TINNEY, 1962) e a aggradação do canal, diz respeito à sedimentação, causada pelo efeito inverso.

A degradação do canal pode ser localizada ou não. A degradação localizada (*scour*) é um rebaixamento temporário e localizado do nível do fundo (GALAY, 1983) que normalmente ocorre por um período de horas ou dias, durante a subida da hidrógrafa da cheia e é, usualmente, compensado pela deposição, na recessão da cheia (ERSKINE, 1999). Já o processo de degradação não localizada representa um extensivo e progressivo rebaixamento do nível do fundo, sobre uma longa distância (GALAY, 1983).

Tanto a degradação como a aggradação ocorrem de maneira escalonada no tempo e no espaço, causando a erosão e a deposição de sedimentos em diversos pontos da bacia, dependendo do tipo de canal incisivo formado. Cerca de 40% de todo o material erodido pode ficar temporariamente na bacia, sendo que a topografia é o principal fator que causa a deposição (TAKKEN et al., 1999). Os sedimentos, oriundos das partes altas da encosta, podem se depositar em vales pelo efeito combinado da gravidade e de processos subsuperficiais, formando depósitos coluvionares (DANIELS, 1992). Já

os sedimentos produzidos na meia-encosta se depositarão nas partes mais baixas, seja em canais naturais ou artificiais, assim como atulhando vales. Este último efeito causa, muitas vezes, uma alteração pedológica e, conseqüentemente, mudança na vegetação ripária.

Como o material depositado apresenta características não coesivas, se a dinâmica erosiva for muito acelerada, não haverá tempo suficiente para o estabelecimento de microrganismos e de uma vegetação que possam dar-lhe maior estabilidade, e a alteração do escoamento fará que o fundo seja degradado e suas laterais sejam desestabilizadas, com bastante facilidade, iniciando um novo ciclo de degradação-agradção até que uma nova condição de equilíbrio seja restabelecida.

CLASSIFICAÇÃO DE CANAIS INCISIVOS

A classificação de canais incisivos é composta de quatro tipos baseados no tamanho e localização em que ocorrem (SCHUMM, 1999; SCHUMM et al., 2001):

- sulcos;
- voçorocas;
- canais entrincheirados (*entrenched channels*) efêmeros, intermitentes e perenes; e
- canais incisivos compostos que causam o rejuvenescimento da rede de drenagem.

Os sulcos são definidos como os primeiros e menores canais formados pela concentração do escoamento superficial (JACKSON, 1997), durante um evento chuvoso (MEYER et al., 1975; EMMETT, 1978; FOSTER et al., 1984b; GOVINDARAJU et al., 1990), após o selamento do solo, nas áreas mais íngremes da bacia hidrográfica (SCHUMM et al., 2001). Os sulcos são sazonais, variáveis e podem ser destruídos pela aração. Suas dimensões variam, normalmente, de 0,5 cm a 20 cm em profundidade, sendo limitada por uma camada compactada pelos implementos agrícolas (ou outro impedimento, por exemplo, camadas de solo congelado) que, normalmente, situa-se a 20 cm de profundidade, de 1 cm a 60 cm de largura (ELLIOT et al., 1989; GOVINDARAJU e KAVVAS, 1992; FRANTI et al., 1996a; LEI et al., 1998) e de poucos centímetros a vários metros de comprimento, conforme as diferenças nas propriedades físicas do solo, energia do escoamento ou declividade.

Entretanto, mesmo que as dimensões dos sulcos sejam reduzidas, muito pouco do sedimento transportado é depositado no próprio sulco, devido à declividade onde tais sulcos ocorrem e, também, pelo tamanho das partículas por eles transportados, já que os sulcos são, normalmente, responsáveis pela erosão

de sedimentos finos, como argila, silte e areia fina, solutos, matéria orgânica, assim como agregados desses materiais, os quais deverão atingir o canal principal muito mais rapidamente que os sedimentos mais grosseiros, que ficarão mais tempo estocados (depositados) na própria bacia. Estes sedimentos mais finos são os responsáveis pela turbidez e eutrofização de rios e represas.

A voçoroca é uma forma instável da paisagem e é parte de uma rede de drenagem em transformação (SCHUMM et al., 2001). É formada onde nenhum canal bem definido existia previamente (SCHUMM et al., 2001), nas reentrâncias da topografia (*hollows*) ou concavidades do terreno (COELHO NETO, 1995). Apresenta dimensões bem maiores que os sulcos, normalmente atingindo o horizonte C do solo ou mesmo a rocha. Diz-se que uma voçoroca é pequena quando tem menos que 1 metro de profundidade; média, quando tem de 1 a 5 metros de profundidade e largura; e é grande quando tem mais que 5 metros de profundidade. A literatura brasileira cita voçorocas de 3,5 a 8,0m de profundidade, 9,0 a 17,0m de largura e com mais de 650m de comprimento, até voçorocas com mais de 30 metros de profundidade, 50 metros de largura e 1 km de comprimento (CAVAGUTI et al., 1995; SILVA e CRUZ, 1995).

Não existe uma separação definida entre sulcos e voçorocas. Entretanto, o sulco torna-se uma voçoroca quando atinge 30cm de profundidade (FOSTER, 1982) ou quando se torna tão largo que não pode ser atravessado por equipamentos agrícolas (MEYER et al., 1975).

Um canal entrincheirado (*entrenched channel*) é uma trincheira profunda resultante da incisão em um canal natural ou modificado pelo homem, através da canalização (SCHUMM et al., 2001). Tais canais podem ser efêmeros, intermitentes ou perenes, sendo que este último é mais freqüente e pode atingir até 15m de profundidade, 100 metros de largura e mais de 100 quilômetros de comprimento. No oeste dos Estados Unidos, esses canais profundos e contínuos são conhecidos como arroios (SCHUMM et al., 2001). Finalmente, um canal incisivo composto possui trechos de diferentes origens, como sulcos, voçorocas e canais entrincheirados (SCHUMM, 1999).

Em resumo, a principal característica desses canais incisivos é que eles sofreram ou estão sofrendo em algum ponto de seu desenvolvimento, um rebaixamento de nível em resposta a uma condição de desequilíbrio, que resulta em um canal que tem excessiva capacidade para transportar sedimentos, relativo ao fluxo de sedimentos supridos da parte superior do escoamento (SIMON e DARBY, 1999) ou

quando o nível de base é abaixado por uma ruptura de gradiente (SCHUMM et al., 2001). Por outro lado, se o suprimento de sedimentos for maior que a capacidade de transporte do escoamento, esses sedimentos serão depositados, causando a agração do canal.

CAUSAS DA INCISÃO

Pode-se resumir as causas que levam um canal a alterar sua dinâmica de erosão, transporte e deposição em três grandes grupos:

- geológicas e geomorfológicas: as quais ocorrem de maneira muito lenta, fazendo que se tenha uma percepção efetiva do efeito a longo prazo;
- climáticas: traduzidas em mudanças no ciclo hidrológico e na temperatura, as quais têm se acentuado nas últimas décadas;
- antrópicas: que produzem efeitos que são perceptíveis em um espaço de tempo bastante curto, comparadas às anteriores, como práticas de uso de solo (agricultura, superpastoreio, colheita de madeira) que diminuem a cobertura vegetal e a taxa de infiltração (ELLIOTT et al., 1999); construção de barragens e, que por reterem sedimentos a montante do reservatório, causam entre outras, a degradação do fundo e o alargamento do canal a jusante (GALAY, 1983).

Com relação às causas antrópicas tem-se constatado, principalmente, nas primeiras décadas do século XX, em muitas partes do mundo, que a troca de uma agricultura tradicional de baixa intensidade, por práticas de uso do solo mais intensivas (PROSSER et al., 1994), assim como a alteração do curso de um canal original por obras de engenharia e remoção da vegetação das margens dos rios (SCHUMM et al., 2001), vem alterando a dinâmica energética das redes de drenagem naturais (ERSKINE, 1999).

Entretanto, devido ao fato de que práticas de uso do solo não podem ter causado episódios de incisão antes da ocupação humana, uma mudança climática parece ser a explicação mais lógica para a incisão de canais, a qual é baseada em uma percebida relação entre mudanças, na frequência da precipitação e intensidade de tempestades, mudança na cobertura vegetal e resistência do solo à erosão e mudanças na produção e descarga de sedimentos em canais de rios ou fundo de vales, assim como um aumento da ocorrência de enchentes e o *El Niño* (ELLIOTT et al., 1999).

Durante o Período Quaternário, por exemplo, a incisão de canais, causando o rejuvenescimento da paisagem, é explicada principalmente por mudanças climáticas bruscas ou pequenas flutuações do clima. Entretanto, a eficiência dos movimentos crustais na migração remontante das ondas erosivas, também é importante para o desenvolvimento dos alvéolos que, necessariamente, se encontram em área previamente soerguida ou em processo de soerguimento (BIGARELLA et al., 1965).

De qualquer maneira, essas mudanças, sejam lentas ou rápidas, antrópicas ou naturais, alteram a dinâmica de canais, na medida que alteram sua vazão, que por sua vez altera seu gradiente ou suprimento de sedimentos, o que causa a agração ou a degradação do canal. Ou seja, todos esses fatores, naturais ou não, têm em comum a alteração da vazão no canal.

EFEITOS DA INCISÃO

Embora seja difícil analisar separadamente, todos os efeitos da incisão de um canal, na própria bacia de drenagem ou fora dela, devido a escala espacial e temporal em que ocorrem, pode-se listar os efeitos negativos que eles causam, conjuntamente, sejam de ordem social, econômica ou ambiental. Tais efeitos são bem constatados na literatura (MELTON, 1965; PATTON e SCHUMM, 1975; GALAY, 1983; PALIS et al., 1997; FRANCE, 1997; HUSSEIN, 1998; SCHUMM et al., 2001) e incluem: perda na qualidade da água; rápida sedimentação a jusante; troca do substrato do canal, relativamente estável, por uma areia muito móvel; maiores picos de cheia; maiores velocidades do escoamento devido a uma diminuição da resistência ao fluxo e maiores profundidades de escoamento; redução da biodiversidade de macro-invertebrados, répteis, anfíbios e peixes e algumas extinções locais por perda indiscriminada de habitats aquáticos permanentes; declínio da produtividade do solo; deslocamento de rotas de transporte; danos e perdas em estruturas, como pontes e barreiras.

Abordando, especificamente, o problema da perda de solo na redução da sua capacidade produtiva, sabe-se que muito desta redução é mascarada pela introdução de novas variedades e tecnologias de produção.

Naturalmente, o dano econômico causado pela perda de solo não atinge somente o agricultor, pois representa uma certa quantidade de sedimentos, nutrientes e poluentes que irão atingir mananciais de abastecimento público, comprometendo a qualidade da água, tanto física como quimicamente, alterando ainda

a vida aquática e, também, comprometendo a saúde da população que se abastece desta água (PALIS et al., 1997; FRANCE, 1997; HUSSEIN, 1998). Além disso, os custos ambientais e sociais são aumentados pelo assoreamento de rios, barragens ou represas, assim como pela perda da capacidade produtiva dos solos.

Estima-se que a erosão hídrica seja da ordem de 1094 milhões ha, o que representa mais de 50% de todos os processos erosivos (OLDEMAN, 1994). No Brasil, este tipo de erosão equivale a uma perda de 600 milhões de toneladas de solo agrícola a cada ano, segundo a Federação da Associação dos Engenheiros Agrônomos do Brasil - FAEAB (BAHIA et al., 1992), sendo que só o Estado de São Paulo apresenta uma perda de 130 milhões de toneladas ano⁻¹, ou seja, 22% deste total (KUNISCHIK, 1996).

Dada a variação das classes de solo, condições climáticas e geológicas, assim como técnicas de manejo ou tipo de cultura agrícola, as taxas de erosão no Brasil são bastante distintas. Por exemplo, em Minas Gerais, as taxas variam de 96t ha⁻¹ ano⁻¹ a 1800t ha⁻¹ ano⁻¹, dependendo do tipo de solo (ALVARENGA et al., 2003). Já no Estado de Espírito Santo estima-se uma taxa média de 26t ha⁻¹ ano⁻¹, sendo que as taxas de erosão durante chuvas intensas (137mm), em curtos períodos (1 semana), podem chegar a 1625t ha⁻¹ (FARIA e MARQUES, 1999). Todas estas taxas de erosão estão acima dos padrões estabelecidos pela USDA que é de 12t ha⁻¹ ano⁻¹.

Obviamente, as taxas de erosão estão relacionadas com o regime de chuvas e, embora seja difícil compartimentalizar estas perdas, há estimativas em várias partes do mundo, que as taxas de perda de solo referentes a voçorocas são da ordem de 17 a 30t ha⁻¹ ano⁻¹ e referentes a sulcos, da ordem de 4t ha⁻¹ ano⁻¹ (CASALÍ et al., 1999; CASALÍ, 2000).

Já os valores referentes às taxas de ajuste da largura por arraste de massa em canais de rios podem variar de 1,5m ano⁻¹ a 100m ano⁻¹ (SIMON, 1989; 1992) e as taxas de agradação podem variar de 0,9 a 30mm ano⁻¹ (ELLIOTT et al., 1999).

Tais resultados mostram a enorme variabilidade, tanto em um mesmo tipo de canal incisivo, como entre tipos diferentes. Isto sugere a necessidade de conhecer os parâmetros controladores desta variabilidade para sua quantificação e, posterior, prognóstico.

ANÁLISE QUALITATIVA SOBRE A INCISÃO DE CANAIS

Os principais processos envolvidos na incisão de canais foram descritos, aproximadamente, a três décadas (BRUSH e WOLMAN, 1960; MOSLEY, 1974;

MEYER et al., 1975; ROLOFF, 1978) e envolvem: (a) o rebaixamento do fundo por uma quebra abrupta no perfil longitudinal do canal (*knickpoint*); (b) o avanço da erosão a montante, através de quedas de água em miniatura (*headcuts*), provocada por uma degradação localizada (*scour*) na base das quedas de água em miniatura; (c) a erosão lateral levando ao alargamento das margens através de quedas ou deslizamentos; e (d) o subsequente transporte do material erodido.

A intensidade desses processos depende das propriedades químicas e físicas do solo, das condições hidráulicas do escoamento (GOVERS, 1987) e da declividade e são comuns tanto em sulcos, voçorocas ou canais de rios.

Vários pesquisadores descreveram, qualitativamente, os principais processos que levam um canal a alterar sua profundidade e migrar a montante, principalmente, para sulcos e voçorocas (MOSLEY, 1974; MEYER et al., 1975; PIEST et al., 1975; FOSTER et al., 1976; OOSTWOUDE WIJDENES et al., 1999; ROBINSON e HANSON, 1995; ROBINSON e HANSON, 1996; ZHENG e TANG, 1997; BRUNTON e BRYAN, 2000; ROBINSON et al., 2000; CASALÍ et al., 1999; CASALÍ et al., 2000). Apesar disso, o trabalho pioneiro foi para canais de rios (BRUSH e WOLMAN, 1960).

Com relação à queda ou ao deslizamento das margens sua causa é devida, principalmente, a dois processos (OSMAN e THORNE, 1988):

- o processo de erosão lateral aumenta a largura do fundo do canal e a declividade das margens, o que resulta em sua instabilidade;
- a degradação do fundo aumenta a altura das margens, o que também diminui sua estabilidade.

Os eventos de queda das margens de um canal tendem a ser episódicos, freqüentemente sendo disparados pelo pior caso de condição de estabilidade associada com a saturação dos constituintes das margens, minimizando a resistência desses materiais e maximizando a altura da margem (THORNE, 1999).

Em margens pobremente drenadas, a rápida *retirada de material fofo (drawdown)* gera uma pressão positiva de água nos poros do solo, reduzindo sua resistência efetiva (THORNE, 1999). Quando o escoamento é concentrado em uma fina camada de areia horizontal em uma margem com coesão diferente, a infiltração pode levar a queda por *piping* (HAGERTY, 1991). Finalmente, a remoção da pressão hidrostática confinada devido à redução na elevação da superfície livre no canal também atua para desestabilizar as margens (SIMON et al., 1999).

A queda das margens tem sido mais comumente documentada durante o período de recessão de uma tempestade, e freqüentemente pode ser representada analiticamente *as a saturated, rapid drawdown condition*. Em termos de escalas temporais mais amplas, a ocorrência da queda das margens indica a instabilidade de um canal de uma magnitude e extensão espacial não especificadas e pode significar a instabilidade do padrão do canal (SIMON et al., 1999).

ANÁLISE QUANTITATIVA SOBRE A INCISÃO DE CANAIS

Para fazer o prognóstico da evolução espacial e temporal de um canal incisivo são necessárias várias equações de conservação de massa e quantidade de movimento, assim como, equações acessórias, para determinação da taxas de desagregação ou do transporte das partículas de sedimentos. Um resumo da evolução histórico-cronológica da construção dessas equações hidrodinâmicas e sedimentológicas é mostrado adiante. Finalmente, são apresentadas algumas das principais tendências para o estudo da incisão em canais coesivos.

EQUAÇÕES HIDRODINÂMICAS E SEDIMENTOLÓGICAS

Para determinar a altura e a velocidade do escoamento a maioria dos trabalhos, que descrevem a incisão em canais de rios, utilizam as equações de Saint-Venant, sendo que a taxa de incisão é determinada por equações do tipo das desenvolvidas por Exner (TINNEY, 1962; DARBY e THORNE, 1996a; AZIZ e PRASAD, 1985; JAIN e PARK, 1989; BHALLAMUDI e CHAUDHRY, 1991; LEE e HWANG, 1994; PAOLA e SEAL, 1995). Todas estas equações foram desenvolvidas no final do século XIX e início do século XX e são descritas em livros clássicos sobre transporte de sedimentos (GRAF, 1984; GARDE e RANGA RAJU, 1985; YANG, 1996), hidrologia (CHOW et al., 1988), mecânica dos fluidos (SHAMES, 1975) ou hidráulica (CUNGE et al., 1980).

Nesse mesmo período, DuBoys deduziu a primeira equação para determinar a vazão de sedimentos do fundo por unidade de largura, baseada na tensão de cisalhamento (SIMONS e SENTÜRK, 1992). Após a dedução de DuBoys, foram desenvolvidas muitas outras fórmulas para estimar a taxa de transporte de sedimentos em canais de rios, baseadas nessa teoria (OBRIEN e RINDLAUB, 1934; KALINSKE, 1947; CHANG et al., 1965).

Além da teoria baseada na tensão de cisalhamento, muitas outras teorias foram apresentadas, relacionando uma variável do escoamento (vazão, velocidade, dissipação de energia) com o transporte de sedimentos, baseadas em conceitos energéticos, probabilísticos ou empíricos (EINSTEIN, 1942; KALINSKE, 1947; EINSTEIN, 1950; CHANG et al., 1965; BAGNOLD, 1966). Essas equações podem ser acopladas à equação de Exner.

Entretanto, levou-se cerca de 50 anos para descrever as equações de Saint-Venant, juntamente com a equação de Exner, seja considerando as equações de Saint-Venant como permanentes (TINNEY, 1962; LEE e HWANG, 1994; PAOLA e SEAL, 1995) ou, mais apropriadamente, considerando o escoamento como não permanente (AZIZ e PRASAD, 1985; JAIN e PARK, 1989; BHALLAMUDI e CHAUDHRY, 1991).

Um fator que pode ter sido limitante para o acoplamento dessas equações foi que o desenvolvimento e popularização dos métodos numéricos e do computador só ocorreram a partir da segunda metade do século XX.

Para sulcos e voçorocas a equação (de Exner), para determinar a taxa de incisão, sofreu algumas alterações e é utilizada por alguns autores, com (FRANTI et al., 1996a; LEI et al., 1998) ou sem (FOSTER, 1984; LEWIS et al., 1994; SIDORCHUK, 1999) a determinação da velocidade e altura do escoamento pelas equações completas de Saint-Venant. Muitos autores utilizam as equações de Manning ou Chézy para determinar a velocidade do escoamento, sendo que a altura do escoamento é obtida, normalmente, através de dados experimentais.

Com tais equações deduzidas, pode-se avançar muito no entendimento do processo erosivo e na quantificação da vazão sólida. Porém, ainda faltavam equações para determinar o aumento da largura do canal e, conseqüentemente, o deslizamento ou queda das margens do canal, o que ainda é um problema que vem sendo recentemente estudado, com base na teoria de estabilidade de taludes para materiais coesivos, tanto para canais de rios, como para voçorocas (OSMAN e THORNE, 1988; THORNE e OSMAN, 1988; DARBY e THORNE, 1996a, 1996b; SIDORCHUK, 1999). Para sulcos, este processo ainda não foi abordado.

O aumento da largura do fundo do canal é um processo antecessor à queda das margens e é, muitas vezes, dado em função da vazão pela equação usada em análise de ajuste de equilíbrio de canais de rios (CHANG, 1986), conhecida também como teoria de regime (GRAF, 1984; HEY e THORNE, 1986), principalmente, para a estimativa da taxa de alargamento de canais de rios e voçorocas (DARBY e THORNE, 1996a,

1996b; SIDORCHUK, 1999). Para sulcos, embora existam poucos trabalhos que estimem essa taxa, ela é determinada de outras maneiras (FOSTER, 1984, LEWIS et al., 1994; LEI et al., 1998).

EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE INCISÃO EM SULCOS E VOÇOROCAS CONSIDERANDO OS EFEITOS COESIVOS DO MATERIAL

Embora, a determinação da taxa de incisão, em voçorocas e sulcos, seja estimada por uma equação do tipo-Exner (FOSTER, 1984; LEI et al., 1998; SIDORCHUK, 1999), tanto o fundo como as margens destes canais apresentam coesão e, por isso, as equações utilizadas para canais de rios, para fundos não coesivos, não são utilizadas. Este problema adicional levou os pesquisadores a determinarem uma equação para estimar a taxa de desagregação das partículas. Esta equação foi desenvolvida a partir das equações de transporte de sedimentos para canais de rios, baseadas na tensão de cisalhamento (MEYER⁵, 1964 apud ZHU et al., 2001) ou em princípios de energia (ROSE⁶, 1985). Estas equações são descritas, respectivamente, como:

$$D_r = a(\tau - \tau_c)^b, \dots\dots\dots (1)$$

$$D_r = \omega_r (\omega - \omega_c), \dots\dots\dots (2)$$

onde D_r é a taxa de desagregação do solo ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); a é o parâmetro de erodibilidade do solo ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$) e b é um coeficiente; τ é a tensão de cisalhamento; τ_c é a tensão de cisalhamento crítica, determinada pelo ajuste da curva de regressão entre D_r e τ .

A partir desse período, muitos autores passaram a determinar a taxa de desagregação das partículas de solo através das equações (1) e (2), apesar do seu grande empirismo (MEYER e WISCHMEIER, 1969; FOSTER e MEYER, 1972; FOSTER et al., 1981, 1984a, 1984b; HIRSCHI e BARFIELD, 1988; NEARING et al., 1989; HUANG e BRADFORD, 1993; LAGURA e GIRÁLDEZ, 1993; ELLIOT e LAFLEN, 1993; LEWIS et al., 1994; ZHANG e HAAN, 1996; FRANTI et al., 1996b; KUZNETSOV et al., 1998; BJORNEBERG et al., 1999). Recentemente, outras teorias, menos empíricas,

relacionadas com os padrões do escoamento ou com a resistência do solo, são propostas para determinar a taxa de desagregação (NEARING, 1991; SIDORCHUK, 1999).

NEARING (1991) propôs uma teoria para determinar a taxa de desagregação baseada em uma função probabilística, onde a turbulência seria a causa da desagregação das partículas, ou seja:

$$D_r = K_n C P h^{1/2} S_f^{3/2}, \dots\dots\dots (3)$$

onde K_n é um coeficiente empírico determinado a partir de dados experimentais; C é o coeficiente de Chézy; S_f a declividade da linha de energia; h é a altura média do escoamento; P é a probabilidade dos turbilhões causarem um evento de ruptura que desagregará o solo.

Embora a maioria das equações estimem a taxa de desagregação ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), SIDORCHUK (1999) desenvolveu uma equação para determinar o fluxo das partículas desagregadas do fundo (m s^{-1}). A diferença é mínima, ou seja, é só multiplicar o fluxo pela massa específica do solo (ρ_s) para que se tenha a taxa. Assim, o fluxo das partículas do fundo do canal pode ser determinado como (SIDORCHUK, 1999):

$$E_b = k_c v \frac{\tau}{\tau_c}, \dots\dots\dots (4)$$

onde k_c é um coeficiente dependente da coesão do solo; v é a velocidade do escoamento. Nesse estudo, a tensão de cisalhamento crítica foi determinada, como (MIRTSKHULAVA⁷, 1988, apud SIDORCHUK, 1999):

$$\tau_c = 1,2\lambda \left(\frac{m_1}{n_1} \right) \left[(\rho_p - \rho_a) dg + 1,25 C_f^n K_o \right], \dots\dots (5)$$

onde λ é um coeficiente de resistência do escoamento igual a 0,18 $d/h^{1/3}$; m_1 é igual a 1,0 para escoamento de água limpa e 1,4, para escoamento com um conteúdo de mais de 0,1 kg m^{-3} de partículas coloidais; d é o diâmetro dos agregados; K_o é o coeficiente de variabilidade do padrão mecânico do solo; n_1 é um parâmetro de turbulência, usualmente igual a 4; ρ_p e ρ_a

5 MEYER, L. D. *Mechanics of soil erosion by rainfall and runoff as influenced by slope length, slope steepness, and particle size*. Ph.D. Dissertation. Purdue University, west Lafayette, IN, 1934.
 6 ROSE, C. W. Developments in erosion and deposition models. *Advances in Soil Science*, v. 2, p. 1-63. 1985
 7 MIRTSKHULAVA, Ts. Ye., 1988. Osnovy Fiziki I Mekhaniki Eroзии Rusel. *Gidrometeoizdat*, Leningrad (in Russian).

são a massa específica da partícula e da água, respectivamente e C_f^n é a resistência do solo à ruptura e é uma função da coesão do solo.

Nas últimas décadas do século XX, houve um grande avanço na representação matemática dos processos que descrevem o avanço de voçorocas ou sulcos a montante (STEIN et al., 1992; TEMPLE, 1992; ROBINSON, 1992; STEIN e JULIEN, 1993; ROBINSON e HANSON, 1994, 1995, 1996; ZHENG e TANG, 1997; OOSTWOUDE WIJDENES et al., 1999; ROBINSON et al., 2000) e do selamento do solo no desenvolvimento de sulcos (RÖMKENS et al., 1996, 1998; ZHENG e TANG, 1997), embora esses processos ainda não tenham sido acoplados às equações completas de balanço de massa.

Especificamente, com respeito à taxa de incisão em sulcos, esta é determinada com base na taxa de desagregação (FOSTER, 1984):

$$\frac{dZ_b}{dt} = \frac{D_r}{\rho_s}, \dots\dots\dots (6)$$

ou com base no fluxo de partículas do fundo do canal (SIDORCHUK, 1999), ou seja:

$$\frac{dZ_b}{dt} = E_b, \dots\dots\dots (7)$$

Já a taxa de alargamento das margens é um assunto bem menos explorado, tanto para sulcos (FOSTER, 1984; LEWIS et al., 1994; LEI et al., 1998), como voçorocas (SIDORCHUK, 1999) e é, normalmente, obtida como (FOSTER, 1984):

$$\frac{db}{dt} = \frac{2D_r}{\rho_s}, \dots\dots\dots (8)$$

Todos os processos envolvidos na incisão e no alargamento de canais dependem de um melhor entendimento, tanto das condições hidráulicas, como das propriedades responsáveis pela resistência do solo à desagregação (onde os efeitos coesivos são considerados). Apesar dos avanços nesse sentido (NEARING, 1991; SIDORCHUK, 1999), a resistência do solo não é uma propriedade claramente definida e pesquisas recentes têm mostrado que, na interface solo-água, essa resistência não pode ser explicada pelos métodos tradicionais que determinam a resistência do solo (SHAINBERG et al., 1994; BRADFORD e BLANCHAR, 1999; ZHANG et al., 2001).

De maneira semelhante, as leis da hidráulica que governam o movimento de partículas, sem coesão, em

canais abertos, são muito distantes das leis que governam a desagregação no fundo do canal e, não são diretamente aplicáveis (GRAF, 1984). Entretanto, hoje já existem técnicas que permitem um estudo detalhado da velocidade média local (*laser-Doppler anemometry* - LDA) ou do tamanho das partículas e de sua velocidade no campo do escoamento (*phase-Doppler anemometry* - PDA) (BRENN et al., 2003) e tais técnicas podem ser úteis para solucionar este problema de caráter secular.

TENDÊNCIAS FUTURAS PARA O ESTUDO DA INCISÃO EM CANAIS COM MATERIAIS COESIVOS

Para o estudo da incisão em sulcos e voçorocas é imprescindível que novas equações, menos empíricas, sejam desenvolvidas para a determinação da taxa de desagregação.

Embora a teoria de NEARING (1991) seja inovadora e utilizada em estudos de erosão (NEARING et al., 1997; LEI et al., 1998; RIGHETTO e AKABASSI, 2000), SHAINBERG et al., (1994) sugerem que as forças de ligação entre as partículas de solo na interface água-solo são muito mais fracas que as forças no solo adjacente, já que as partículas não estão confinadas, o que abre a perspectiva para determinar os fatores que afetam a estabilidade dos agregados, ou seja, a resistência dos agregados do solo ao enfraquecimento das ligações (*slaking = incipient failure*) e a ação dispersiva da água (SHAINBERG et al., 1994; PICCOLO, 1996; BRADFORD e BLANCHAR, 1999). Os resultados apresentados por estes autores, sugerem que a desagregação depende dos mecanismos físico-químicos na interface solo-água.

Dentro dessa ótica, os resultados de pesquisas confirmam que a persistente estabilização dos agregados é devida a mineralogia do solo, ao aumento da fração de matéria orgânica estável, semelhante às substâncias húmicas, e que a menor acidez e a maior fração húmica hidrofóbica são responsáveis pela estabilidade dos agregados (PICCOLO e MBAGWU, 1990; BRADFORD e BLANCHAR, 1999; NOVOTNY et al., 1999; NÈGRE et al., 2002).

Obviamente, ainda está longe de não ser empírica, a representação matemática dos aspectos envolvidos na estabilidade dos agregados do solo (BRADFORD e BLANCHAR, 1999; AL-SHAYEA, 2001), mas, o avanço no conhecimento da natureza do material húmico envolvido na microagregação, nos mecanismos de interação com os minerais do solo e na dinâmica do conjunto argila-complexo húmico-metal polivalente (TISDALL e OADES, 1982; KEMPER e ROSENAU, 1984; SHAINBERG et al., 1994; BRADFORD e

BLANCHAR, 1999; PICCOLO, 1996; DeBANO, 2000; NOVOTNY, et al. 1999; NÈGRE et al., 2002), podem esclarecer algumas discrepâncias, encontradas por pesquisadores, sobre a resistência do solo superficial.

Sobre os efeitos da intensidade da precipitação, ou do escoamento, na quebra de agregados, pode-se citar vários trabalhos indicando que o tamanho dos agregados varia com a intensidade, duração e energia da precipitação; com as propriedades físicas e químicas do solo e, também, com o método de determinação da estabilidade desses agregados e com o tamanho da partícula primária (KEMPER e ROSENAU, 1984; TRUMAN et al., 1990; SLATTERY e BURT, 1997; BRYAN, 2000; ZHANG et al., 2001; MARTÍNEZ-MENA et al., 2002).

Estudos sobre esses aspectos são cruciais para a compreensão e quantificação do processo de degradação e quedas das margens de canais incisivos, assim como para o avanço da erosão à montante. Para canais de rios, onde o material do fundo não é coesivo, esse efeito pode ser desconsiderado. Porém, a descrição da queda ou do deslizamento das margens e o subsequente transporte do material devem levar em consideração as propriedades coesivas do material.

CONCLUSÕES

Com base na literatura consultada, pode-se constatar que, nas últimas três décadas do século XX, houve uma intensificação no entendimento quantitativo do processo da incisão de canais, sendo que os processos de avanço da erosão à montante ainda não foram acoplados às equações de conservação de massa

e quantidade de movimento. O processo de deslizamento das margens de canais, com materiais coesivos, se resume a poucos estudos, principalmente para canais de rios e voçorocas, evidenciando que ainda é um problema em estágio inicial de entendimento.

Embora existam muitas teorias para determinar o transporte de partículas de sedimentos não coesivos, o processo de desagregação de partículas coesivas é complexo e pouco entendido, fisicamente. Apesar de novas equações terem sido propostas para determinar a taxa de desagregação, ainda não existe um consenso sobre quais sejam as propriedades responsáveis por essa desagregação, tanto com respeito às propriedades do escoamento, como em relação às propriedades das partículas na interface solo-água.

Entretanto, de acordo com os resultados de pesquisas recentes, os métodos tradicionais de medição da resistência do solo a uma tensão aplicada (*shear strength*) podem não ser adequados para determinar a resistência do solo na superfície, ou seja, a resistência dos agregados do solo ao enfraquecimento das ligações (*slaking*) e a ação dispersiva da água. Um melhor entendimento destes aspectos pode, também, explicar o efeito da intensidade da precipitação ou do escoamento na quebra de agregados, durante o transporte.

Com respeito às propriedades hidráulicas envolvidas na desagregação, muito pouco foi feito e as leis, que governam a desagregação no fundo do canal, continuam sendo uma incógnita. Entretanto, hoje já existem técnicas que permitem um estudo detalhado da velocidade média local ou do tamanho das partículas e da sua velocidade no campo do escoamento, sendo que tais técnicas podem ser úteis, para solucionar esse problema de caráter secular.

REFERÊNCIAS

- AL-SHAYEA, N. The combined effect of clay and moisture content on the behavior of remolded unsaturated soils. *Engineering Geology*, Amsterdam, v. 62, n. 4, p. 319-342, 2001.
- ALVARENGA, R. C. et al. Índices de erosividade da chuva, perdas de solo e fator erodibilidade para dois solos da região de Sete Lagoas. Disponível em: <<http://www.cnpms.embrapa.br/pesq2498.html>> Acesso em: 16 fev. 2003. EMBRAPA. (não publicado).
- AZIZ, N. M.; PRASAD, S. N. Sediment transport in shallow flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, 1985. v. 111, n. 10, p. 1327-1343.
- BAGNOLD, R. A. An approach to the sediment transport problem from general physics. *Geological Survey Professional Paper*, Washington, v. 422-I, p. 1-37, 1966.
- BAHIA, V. G. et al. Fundamentos de erosão do solo: tipos, formas, mecanismos, fatores determinantes e controle. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v. 16, n. 176, p. 25-31, 1992.
- BHALLAMUDI, B. M.; CHAUDHRY, M. H. Numerical modeling of aggradation and degradation in alluvial channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, 1991. v. 117, n. 9, p. 1145-1164.
- BIGARELLA, J. J.; MOUSINHO, M. R.; SILVA, J. X. da. Considerações a respeito da evolução das vertentes. *Boletim Paranaense de Geografia*, Curitiba, v. 16 e 17, p. 85-116, 1965.
- BJORNEBERG, D. L. et al. Evaluating WEPP - predicted infiltration, runoff, and soil erosion for furrow irrigation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, v. 42, n. 6, p. 1733-1741, 1999.

- BRADFORD, J. M.; BLANCHARD, R. W. Mineralogy and water quality parameters in rill erosion of clay-sand mixtures. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 1999. v. 63, n. 5, p. 1300-1307.
- BRENN, G. et al. Experimental and numerical investigation of liquid channel flows with dispersed gas and solid particles. *International Journal of Multiphase Flow*, Elmsford, 2003. v. 29, n. 2, p. 219-247.
- BRUNTON, D. A.; BRYAN, R. B. Rill network development and sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*, Chichester, v. 25, n. 7, p. 783-800, 2000.
- BRUSH, L. M.; WOLMAN, M. G. Knickpoint behavior in noncohesive material: a laboratory study. *Bulletin of the Geological Society of America*, Boulder, v. 71, n. 1, p. 59-74, 1960.
- BRYAN, R. B. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslopes. *Geomorphology*, Amsterdam, v. 32, n. 3 e 4, p. 385-415, 2000.
- CASALÍ, J.; BENNETT, S. J.; ROBINSON, K. M. Processes of ephemeral gully erosion. *International Journal of Sediment Research*, Beijing, 2000. v. 15, n. 1, p. 31-41.
- CASALÍ, J.; LÓPEZ, J. J.; GIRÁLDEZ, J. C. Ephemeral gully erosion in southern Navarra. *Catena*, Giessen, v. 36, p. 65-84, 1999.
- CAVAGUTI, N. et al. Boçoroca da pousada da esperança 2. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSIÃO, 5., 1995, Bauru. *Anais...* Bauru: IBGE; Unesp, 1995. p. 501-503.
- CHANG, F. M.; SIMONS, D. B.; RICHARDSON, E. V. Total bed-material discharge in alluvial channels. *U. S. Geological Survey Water-Supply Paper*, Washington, n. 1498-I, p. 1-23, 1965.
- CHANG, H. H. River channel changes: adjustments of equilibrium. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, 1986. v. 112, n. 1, p. 43-55.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. *Applied hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1988.
- COELHO NETO, A. L. Mudanças ambientais recentes, mecanismos e variáveis-controle do voçorocamento atual na bacia do rio bananal, SP-RJ: bases metodológicas para previsão e controle de erosão. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSIÃO, 5., 1995, Bauru. *Anais...* Bauru: IBGE, UNESP, 1995. p. 377-379.
- CUNGE, J. A.; HOLLY, F. M.; VERWEY, A. *Practical aspects of computational river hydraulics*. Boston: Pitman Advanced Publishing Program, 1980.
- DANIELS, R. B.; HAMMER, R. D. *Soil geomorphology*. New York: John Wiley, 1992. 236 p.
- DARBY, S. E.; THORNE, C. R. Numeric simulation of widening and bed deformation of straight sand-bed rivers. I: Model development. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, 1996a, v. 122, n. 4, p. 184-193.
- _____. Numeric simulation of widening and bed deformation of straight sand-bed rivers. II: Model evaluation. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, 1996b, v. 122, n. 4, p. 194-202.
- DeBANO, L. F. Review: Water repellency in soils: a historical overview. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, 2000, v. 231-232, n. 29, p. 4-32.
- EINSTEIN, H. A. Formulas for the transportation of bed load. *Transactions/American Society of Civil Engineers*, n. 107, p. 561-597, 1942.
- _____. The bed load function for sediment transportation in open channel flows. *Technical Bulletin*, n. 1026, p. 1-71, 1950.
- ELLIOTT, J. G.; GELLIS, A. C.; ABY, S. B. Evolution of arroyos: incised channels of the Southwestern United States. In: DARBY, S. E.; SIMON, A. *Incised river channels: processes, forms, engineering and management*. New York: John Wiley, 1999. p. 153-185.
- ELLIOT, W. J.; LAFLÉN, J. M. A process-based rill erosion model. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St Joseph, v. 36, n. 1, p. 65-72, 1993.
- ELLIOT, W. J. et al. *Compendium of soil erodibility data from WEPP Cropland Soil Field Erodibility Experiments 1987 and 1988*. USDA Agricultural Research Service, West Lafayette: The Ohio State University. NSERL Report, n. 3. Disponível em: <<http://soils.ecn.purdue.edu/wephtml/wep/wepptut/comp/comp.html>> Acesso em: 23 ago. 2002.
- EMMETT, W. W. Overland flow. In: KIRKBY, M. J. *Hillslope hydrology*. New York: John Wiley, 1978. p. 145-176.
- ERSKINE, W. D. Oscillatory response versus progressive degradation of incised channels in Southeastern Austrália. In: DARBY, S. E.; SIMON, A. *Incised river channels: processes, forms, engineering and management*. New York: John Wiley, 1999. p. 67-95.
- FARIA, A. P.; MARQUES, J. S. O desaparecimento de pequenos rios brasileiros. *Ciência Hoje*, São Paulo, v. 25, n. 146, p. 56-61, 1999.
- FOSTER, G. R. Modeling the erosion process. In: HAAN, C. T.; JOHNSON, H. P.; BRAKENSIEK, D. L. *Hydrologic modeling of small watersheds*. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers (ASAE), 1982. p. 297-380.
- FOSTER, G. R.; HUGGINS, L. F.; MEYER, L. D. A laboratory study of rill hydraulics: II. Shear stress relationships. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St Joseph, v. 27, n. 3, p. 797-804, 1984b.
- _____. A laboratory study of rill hydraulics: I. Velocity relationships. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St Joseph, v. 27, n. 3, p. 790-796, 1984a.
- FOSTER, G. R. et al. Estimating erosion and sediment yield on field-sized areas. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St Joseph, v. 24, n. 5, p. 1253-1262, 1981.

- FOSTER, G. R.; MEYER, L. D. A closed-form soil erosion equation for upland areas. In: SHEN, H. W. (Ed.). *Sedimentation*. Fort Collins: Colorado State University, 1972. p. 12.1-12.9.
- FOSTER, G. R.; MEYER, L. D.; ONSTAD, C. A. An erosion equation derived from basic erosion principles. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St Joseph, v. 19, n. 4, p. 678-682, 1976.
- FRANCE, R. L. Potential for soil erosion from decreased litterfall due to riparian clearcutting: Implications for boreal forestry and warm-and cool-water fisheries. *Journal of Soil and Water Conservation*, Amsterdam, v. 52, n. 6, p. 452-455, 1997.
- FRANTI, T. G.; FOSTER, G. R.; MONKE, E. J. Modeling the effects of incorporated residue on rill erosion. Part I: Model development and sensitivity analysis. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, v. 39, n. 2, p. 535-542, 1996a.
- _____. Modeling the effects of incorporated residue on rill erosion. Part II: Experimental results and model validation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St Joseph, v. 39, n. 2, p. 543-550, 1996b.
- GALAY, V. J. Causes of river bed degradation. *Water Resources Research*, Washington, v. 19, n. 5, p. 1057-1090, 1983.
- GARDE, R. J.; RANGA RAJU, K. G. *Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems*. 2. ed. New Delhi: Wiley Eastern Limited, 1985.
- GOVERS, G. Spatial and temporal variability in rill development processes at the Hundenberg Experimental Site. In: BRYAN, R. B. (Ed.). *Rill erosion: process and significance* p. 17-34, 1987. (Catena Suppl. n. 8). Catena Verlag, Cremlingen-Destedt.
- GOVINDARAJU, R. S.; KAVVAS, M. L. Characterization of the rill geometry over straight hillslopes through spatial scales. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, 1992. v. 130, n. 1-4, p. 339-365.
- GOVINDARAJU, R. S.; KAVVAS, M. L.; JONES, S. E. Approximate analytical solutions to overland flows. *Water Resources Research*, v. 26, n. 12, p. 2903-2912, 1990.
- GRAF, W. H. *Hydraulics of sediment transport*. Littleton: Water Resources Publications, 1984.
- GUERRA, A. T; GUERRA, G. A. J. T. *Novo dicionário geológico-geomorfológico*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1997.
- HAGERTY, D. J. Piping/sapping erosion. I: Basic considerations. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, v. 117, p. 991-1008, 1991.
- HEY, R. D.; THORNE, C. R. Stable channels with mobile gravel beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, 1986. v. 112, n. 8, p. 671-689.
- HIRSCHI, M. C.; BARFIELD, B. J. KYERMO - a physically based research erosion model. Part 1. Model development. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St Joseph, v. 31, n. 3, p. 804-813, 1988.
- HUANG, C. H.; BRADFORD, J. M. Analyses of slope and runoff factors based on the WEPP erosion model. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 1993. v. 57, n. 5, p. 1176-1183.
- HUSSEIN, M. H. Water erosion assessment and control in Northern Iraq. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 45, p. 161-173, 1998.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. *Technical dictionary on dams*. Paris: ICOLD, 1978.
- JACKSON, J. A. (Ed.). *Glossary of geology*. 4. ed. Alexandria, Virginia: American Geological Institute.
- JAIN, S. C.; PARK, I. Guide fro estimating riverbed degradation. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, 1989. v. 115, n. 3, p. 356-366.
- KALINSKE, A. A. Movement of sediment as bed-load in rivers. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St Joseph, v. 28, n. 4, 1947.
- KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Soil cohesion as affected by time and water content. *Soil Science Society of America Journal*, 1984. v. 48, n. 5, p.1001-1006.
- KUNISCHIK, G. *Aplicação da equação universal de perdas de solo na microbacia do Ribeirão das Araras, através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento*. São José dos Campos, 1996. Dissertação (Mestrado) – INPE.
- KUZNETSOV, M. S.; GENDUGOV, V. M.; KHALILOV, M. S.; IVANUTA, A. A. An equation of soil detachment by flow. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 46, n. 1-2, p. 97-102, 1998.
- LAGUNA, A.; GIRÁLDEZ, J. V. The description of soil erosion through a kinematic wave model. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, 1993. v. 145, n. 1/2, p. 65-82.
- LEE, H. Y.; HWANG, S. T. Migration of backward-facing step. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, 1994. v. 120, n. 6, p. 693-705.
- LEI, T. et al. Rill erosion and morphological evolution: a simulation model. *Water Resources Research*, Washington, v. 34, n. 11, p. 3157-3168, 1998.
- LEWIS, S. M. et al. PRORIL - an erosion model using probability distributions for rill flow and density. I. Model development. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St Joseph, v. 37, n. 1, p. 115-123, 1994.
- MARTÍNÉZ-MENA, M.; CASTILHO, V.; ALBADEJO, J. Relations between interrill erosion processes and sediment particle size distribution in a semiarid Mediterranean area of SE of Spain. *Geomorphology*, Amsterdam, v. 45, n. 3-4, p. 261-275, 2002.
- MELTON, M. A. The geomorphic and palaeoclimatic significance of alluvial deposits in southern Arizona. *Journal of Geology*, Chicago, v. 73, n. 1, p 1-38, 1965.

- MEYER, L. D.; FOSTER, G. R.; NIKOLOV, S. Effect of flow rate and canopy on rill erosion. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St Joseph, v. 18, n. 5, p. 905-911, 1975.
- MEYER, L. D.; WISCHMEIER, W. H. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St Joseph, v. 12, n. 6, p. 754-758, 1969.
- MOSLEY, M. P. Experimental study of rill erosion. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St Joseph, v. 17, n. 5, p. 909-913; 916, 1974.
- NEARING, M. A. Probabilistic model of soil detachment by shallow turbulent flow. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St Joseph, v. 34, n. 1, p. 81-85, 1991.
- NEARING, M. A. et al. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St Joseph, v. 32, n. 4, p. 1587-1593, 1989.
- NEARING, M. A. et al. Hydraulics and erosion in eroding rills. *Water Resources Research*, Washington, v. 33, n. 4, p. 865-876, 1997.
- NÈGRE, M. et al. Effects of the chemical composition of soil humic acids on their viscosity, surface pressure, and morphology. *Soil Science*, Baltimore, 2002. v. 167, n. 10, p. 636-651.
- NOVOTNY, E. H. et al. Soil management system effects on size fractionated humic substances. *Geoderma*, Amsterdam, v. 92, n. 1-2, p. 87-109, 1999.
- O'BRIEN, M. P.; RINDLAUB, B. D. The transportation of bed-load by streams. *Transactions of the American geophysical Union*, v. 15, p. 593-603, 1934.
- OLDEMAN, L. R. The global extent of soil degradation. In: GREENLAND, D. J.; SZABOLCS, I. (Eds.). *Soil erosion research methods*. Ankeny, Iowa: Conservation Society (SWCS), 1994. p. 235-263.
- OOSTWOUW WIJDENES, D. J. et al. Gully-head morphology and implications for gully development on abandoned fields in a semi-arid environment, Sierra de Gata, southeast Spain. *Earth-Surface-Processes-and-Landforms*, Chichester, v. 24, n. 7, p. 585-603, 1999.
- OSMAN, A. M.; THORNE, C. R. Riverbank stability analysis. I: Theory. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, v. 114, n. 2, p. 135-150, 1988.
- PALIS, R. G.; ROSE, C. W.; SAFFIGNA, P.G. Soil erosion processes and nutrient loss. IV. Effect of slope length on runoff, sediment yield, and total nitrogen loss from steep slopes in peneapple cultivation. *Australian Journal of Soil Research*, Washington, v. 35, n. 4, p. 907-923, 1997.
- PAOLA, C.; SEAL, R. Grain size patchiness as a cause of selective deposition and downstream fining. *Water Resources Research*, Washington, v. 31, n. 5, p. 1395-1407, 1995.
- PATTON, P. C.; SCHUMM, S. A. Gully erosion, northwestern Colorado: a threshold phenomenon. *Geology*, Boulder, v. 3, n. 2, p. 88-90, 1975.
- PICCOLO, A. Humus substances in terrestrial ecosystems. In: _____. *Humus and soil conservation*. Amsterdam: Elsevier Science, 1996. p. 225-264.
- PICCOLO, A.; MBAGWU, J. S. C. Effects of different organic wastes amendments on soil micro aggregates stability and molecular sizes of humic substances. *Plant and Soil*, The Hague, v. 123, n. 1, p. 27-37, 1990.
- PIEST, R. F.; BRADFORD, J. M.; WYATT, G. M. Soil erosion and sediment transport from gullies. *Journal of the Hydraulics Division*, Ann Arbor, 1975. v. 101, n. 1, p. 65-80.
- PROSSER, I. P.; CHAPPELL, J.; GILLESPIE, R. Holocene valley aggradations and sediment transport in headwater catchments, south-eastern highland of Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, Chic Hester, v. 19, n. 5, p. 465-480, 1994.
- RIGHETTO, A. M.; AKABASSI, L. Erosão distribuída em áreas de encosta. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 5, n. 2, p. 43-57, 2000.
- ROBINSON, K. M. Predicting stress and pressure at an over fall. *Transactions of the American geophysical Union*, v. 35, n. 2, p. 561-569, 1992.
- ROBINSON, K. M. et al. Processes of head cut growth and migration in rills and gullies. *International Journal of Sediment Research*, Beijing, v. 15, n. 1, p. 69-82, 2000.
- ROBINSON, K. M.; HANSON, G. J. A deterministic head cut advance model. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, v. 37, n. 5, p. 1437-1443, 1994.
- _____. Gully head cut advance. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, v. 39, n. 1, p. 33-38, 1996.
- _____. Large-scale headcut erosion testing. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, v. 38, n. 2, p. 429-434, 1995.
- ROLOFF, G. *Gully development as influenced by regolith stratigraphy in the thick loessial region of central Missouri*. Columbia, 1978. Dissertação, (Mestrado) - University of Missouri.
- RÖMKENS, M. J. M.; PRASAD, S. N.; GERITS, J. J. P. Soil erosion models of sealing soils: a phenomenological study. *Soil Technology*, Amsterdam, v. 11, p. 31-41, 1997.
- RÖMKENS, M. J. M.; PRASAD, S. N.; HELMING, K. Sediment concentration in relation to surface and subsurface hydrologic soil conditions. In: FEDERAL INTERAGENCY SEDIMENTATION CONF. VI.: Las Vegas: 1996. *Proceedings....* Las Vegas, v. 2, p. 9-16, 1996.
- SCHUMM, S. A. Causes and controls of channel incision. In: DARBY, S. E.; SIMON, A. *Incised river channels: processes,*

- forms, engineering and management. New York: John Wiley, 1999. p. 19-33.
- SCHUMM, S. A.; HARVEY, M. D.; WATSON, C. C. *Incised channels: morphology, dynamics and control*. 3. ed. Littleton, Colorado: Water Resources Publications, 2001.
- SHAINBERG, J. et al. Hydraulic flow and water quality characteristics in rill erosion. *Soil Science society of America Journal*, Madison, 1994. v. 58, n. 4, p. 1007-1012.
- SHAMES, I. H. *Mecânica dos fluidos: análise de escoamentos*. São Paulo: Edgard Blücher, v. 2. 1976.
- SIDORCHUK, A. Dynamic and static models of gully erosion. *Catena*, Giessen, v. 37, n. 3-4, p. 401-414, 1999.
- SILVA, M.; CRUZ, R. Erosão urbana no jardim paulista. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSIÃO, 5., 1995, Bauru. *Anais...* Bauru: IBGE; UNESP, 1995. p. 505-507.
- SIMON, A. A model of channel response in disturbed alluvial channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, Chic Hester, v. 14, n. 1, p. 11-26, 1989.
- _____. Energy, time, and channel evolution in catastrophically disturbed fluvial system. *Geomorphology*, Amsterdam, v. 5, n. 3/5, p. 345-372, 1992.
- SIMON, A.; DARBY, S. E. The nature and significance of incised river channels. In: DARBY, S. E.; SIMON, A. *Incised river channels: processes, forms, engineering and management*. New York: John Wiley, 1999. p. 3-18.
- SIMONS, D. B.; SENTÜRK, F. *Sediment transport technology: water and sediment dynamics*. Colorado: Water Resources Publications, 1992. 897 p.
- SLATTERY, M. C.; BURT, T. P. Particle size characteristics of suspended sediment in hill slope runoff and stream flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, Chic Hester, v. 22, n. 8, p. 705-719, 1997.
- STEIN, O. R.; JULIEN, P. Y. Criterion delineating the mode of headcut migration. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, 1993. v. 119, n. 1, p. 37-50.
- STEIN, O. R.; JULIEN, P. Y.; AALONSO, C. V. Mechanics of jet scour downstream of a headcut. *Journal of Hydraulic Research*, Delft, 1992. v. 31, n. 6, p. 723-738.
- TAKKEN, I. et al. Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM). *Catena*, Giessen, v. 37, n. 3-4, p. 431-447, 1999.
- TEMPLE, D. M. Estimating flood damage to vegetated deep soil spillways. *Applied Engineering in Agriculture*, St. Joseph, v. 8, n. 2, p. 237-242, 1992.
- THORNE, C. R.; OSMAN, A. M. Riverbank stability analysis. II. Applications. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, 1988. v. 114, n. 2, p. 151-172.
- TISDALL, J. M. OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregate in soils. *The Journal of Soil Science*, Oxford, 1982. v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.
- TRUMAN, C.; BRADFORD, J. M.; FERRIS, J. E. Antecedent water content and rain fall energy influence on soil aggregate breakdown. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 1990. v. 54, n. 5, p. 1385-1392.
- TYNNEY, E. R. The process of channel degradation. *Journal of Geophysical Research*, Washington, 1962. v. 67, n. 4, p. 1475-1480.
- ZHANG, B.; ZHAO, Q. G.; BRAUMGARTL, T. Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 59, n. 3-4, p. 97-106, 2001.
- ZHANG, J.; HAAN, C. T. Evaluation of uncertainty in estimated flow and phosphorus loads by FHANTM. *Applied Engineering Agriculture*, St. Joseph, v. 12, n. 6, p. 663-669, 1996.
- ZHENG, F.; TANG, K. Rill erosion process on steep slope land of the loess plateau. *International Journal of Sediment Research*, Beijing, 1997, v. 12, n. 1, p. 52- 59.
- ZHU, J. C. et al. Comparison of concentrated-flow detachment equations for low shear stress. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 61, n. 3-4, p. 203-212, 2001.