DESENVOLVIMENTO DE INCISÃO EROSIVA (VOÇOROCA) DESCONTÍNUA E DESCONECTADA DA REDE HIDROGRÁFICA EM ÁREA DE CABECEIRA DE DRENAGEM: O CASO DA COLÔNIA QUERO-QUERO (PALMEIRA - PR)

JULIO C. PAISANI* & MARCELO A. T. OLIVEIRA**

RESUMO Este trabalho apresenta os principais processos que condicionam o desenvolvimento de incisão erosiva descontínua e desconectada da rede hidrográfica, localizada em área de cabeceira de drenagem na Colônia Quero-Quero, Palmeira, PR. A pesquisa se consagrou: à identificação dos processos de produção de escoamento hídrico na área de contribuição, à determinação do escoamento captado pela incisão e ao acompanhamento evolutivo da incisão erosiva. Três fontes de escoamento para a incisão foram identificadas: a) cabeceira de drenagem (escoamento superficial); b) terracetes (escoamento superficial); c) frentes de exfiltração (escoamento subsuperficial). Estimando taxas globais de erosão da incisão e das principais feições erosivas, constatou-se: a) aumento das taxas de erosão a partir do ano hidrológico monitorado; b) aumento do volume de erosão em setores específicos da incisão, em feições similares a marmitas; c) evolução diferencial das marmitas de jusante em relação às de montante. Em geral, a incisão evoluiu de jusante para montante, pela concentração de escoamento superficial associado ao afloramento preferencial da zona de saturação nas porções de jusante. Como a incisão inicialmente era composta de setores descontínuos, acredita-se que a ação conjunta entre erosão por cascata e erosão pelas frentes de exfiltração esteja promovendo a integração de canais descontínuos em incisões desconectadas da rede hidrográfica.

Palavras-chaves: incisão erosiva descontínua, incisão erosiva desconectada, cabeceira de drenagem, monitoramento hidrológico, processos erosivos

ABSTRACT *DISCONNECTED AND DISCONTINUOUS GULLY EROSION DEVELOPMENT ON VALLEY HEADS, COLÔNIA QUERO-QUERO (PALMEIRA - PR): A STUDY CASE* Processes related to development of disconnected and discontinuous gully erosion on valley heads, at the Colônia Quero-Quero, Palmeira (PR) were analysed. The work was based on: identification of water flow development from a source area; measurement of water flow into the gully incision; and evolution of the gully system. Results point to three sources of flow: source area and terracetes (overland flow), and seepage fronts (subsurface flow). Estimated global erosion rates suggest: a) increased erosion rates during the monitoring period; b) potoles were more eroded than reaches of the main gully channel; c) differential evolution between potoles up-slope and down-slope. The discontinuous gully system evolved from down-slope to up-slope by the association between overland flow up-slope and the rising of saturated zones down-slope. As the erosive incision was discontinuous before the end of the experimentation, we hypothesised that association between plunge pool and seepage erosion will promote the integration of discontinuous disconnected incisions.

Keywords: discontinuous gully, disconnected gully, valley head, hydrologic monitoring, erosion processes

INTRODUÇÃO A ocorrência de incisões erosivas (voçorocas) em áreas de cabeceira de drenagem no setor sul do Estado do Paraná foi levantada por Camargo (1998). Das 21 incisões cadastradas, a autora identificou 14 conectadas à rede hidrográfica e 7 desconectadas dela (Oliveira 1989). No que diz respeito às desconectadas, um caso situado na Colônia Quero-Quero, município de Palmeira (Fig. 1), chamou a atenção por apresentar descontinuidades (degraus) ao longo da incisão erosiva. As descontinuidades foram criadas por trilhas de gado (terracetes) perpendiculares à inclinação da encosta, que convergem para reentrância côncava na qual se instalou a incisão. Os degraus são marcados por depressões de forma cilíndrica denominadas *marmitas* (fig. 2 e 3). Na grande maioria, as marmitas exibem feições erosivas do tipo *alcovas de regressão* (Oliveira et al. 1995, Oliveira 1996, 1997) e *alcovas de progressão*; as primeiras se encontram nas marmitas que precedem depósitos aluviais, enquanto as segundas se desenvolvem nas marmitas que antecedem a canalização da incisão erosiva e podem estar evoluindo pela erosão por percolação. As marmitas são ligadas por pequenos canais, que, em alguns casos, exibem depósitos aluviais de diferentes tamanhos, sendo que os maiores se mostram recobertos por gramíneas, como o cone aluvial que limita a porção inferior da incisão erosiva (Fig. 2 e 3). Na porção superior, a incisão avança na inflexão de depressão côncava, que assume característica de cabeceira de drenagem (Fig. 2). Em função das peculiaridades desta incisão erosiva, formulou-se a hipótese de que a associação entre processos específicos (escoamento superficial gerado na cabeceira de drenagem e nos terracetes) e superfícies topográficas irregulares (degraus ou terracetes) pode constituir um fator importante na gênese e na evolução de incisões descontínuas e desconectadas da rede hidrográfica, sobretudo em áreas de pastagens (Paisani 1998). Desse modo, o trabalho apresenta resultados de pesquisa voltada para a determinação dos processos que condicionam o desenvolvimento de uma incisão erosiva descontínua ('discontinuous gully'), desconectada da rede hidrográfica.

MÉTODOS A caracterização dos processos que determinam o desenvolvimento da incisão erosiva em foco seguiu três linhas de investigação: a) identificação dos processos formadores de escoamento

Figura 1 - Localização da área de estudo (Fonte: Folha topográfica SG 22 XCIII3 - IBGE).

* Programa de Pós-Graduação em Geografia, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário, Trindade, CEP 88.040-900, Florianópolis, SC, Brasil, paisani@cfh.ufsc.br

** Departamento de Geociências, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário, Trindade, CEP 88.040-900, Florianópolis, SC, Brasil, marcelo@cfh.ufsc.br

Figura 2 – Esboço em escala da incisão erosiva estudada exibindo as principais feições: cabeceira de drenagem, marmitas, terracetes e cone aluvial. Linha descontinua representa o limite da cabeceira de drenagem.

hídrico na cabeceira de drenagem; b) determinação do escoamento captado pela incisão; c) acompanhamento evolutivo da incisão erosiva.

A identificação dos processos formadores de escoamento na cabeceira de drenagem contou com a caracterização prévia dos materiais da porção central da concavidade (Paisani & Oliveira 1998). No intuito de identificar possíveis descontinuidades hidrológicas, foram determinadas a condutividade hidráulica saturada (mm.h^{-1}); a densidade aparente (g.cm^{-3}), ou seja, volume do material incluindo espaços porosos; a densidade real (g.cm^{-3}) e a porosidade total (%) dos materiais da cobertura superficial. Ensaio de infiltrometria (mm.h^{-1}), descritos em Guerra (1996), foram realizados tanto na porção central da cabeceira de drenagem quanto na encosta e auxiliaram a análise.

Durante doze meses (julho/97 a junho/98), mediu-se diariamente a água no solo através da determinação de seu potencial de pressão (cmH_2O), utilizando-se trinta tensiômetros dispostos em sete baterias ao longo da porção central da cabeceira de drenagem, conforme metodologia desenvolvida por Fernandes (1990). Igualmente, foram monitorados os totais pluviométricos diários (mm) e a intensidade da chuva (mm.h^{-1}), intensidade que foi monitorada apenas durante período amostral de março a abril de 1998, devido à breve disponibilidade do pluviógrafo.

O escoamento captado pela incisão erosiva foi determinado através

Figura 3 – Vista de uma das descontinuidades (D) da incisão erosiva (I) com algumas feições de detalhe e concentração de escoamento turbulento na marmita (M), produto de fluxo descontínuo mantido por frentes de exfiltração em períodos úmidos. DA = depósito aluvial recoberto por gramíneas, AR = alça de regressão.

da medição diária das taxas máximas de vazão (l.s^{-1}) registradas durante o período monitorado. Utilizou-se, para isso, de dois vertedores retangulares de paredes delgadas adaptados às condições de campo (Paisani *et al.* 1999). Os instrumentos foram instalados, respectivamente, dentro da cabeceira da incisão erosiva e dentro de sua desembocadura. A instalação do vertedor dentro da desembocadura da incisão teve como objetivo verificar, indiretamente, se a rede de terracetes contribuiria com escoamento para a incisão (Moyersons 1991). Propriedades básicas dos materiais dos terracetes e do entorno, tais como densidade aparente, densidade real e porosidade total, foram determinadas.

O acompanhamento evolutivo da incisão erosiva se fundamentou na estimativa das taxas de erosão globais, da incisão e das marmitas, ao longo do tempo. As taxas de erosão ($\text{m}^3.\text{mês}^{-1}$, t.a^{-1}) foram estabelecidas em função da variação volumétrica da incisão (m^3) por perda de material (t), conforme Lamim & Almeida (1996). Foram feitas três medidas globais da incisão (maio/95, setembro/97 e junho/98) e três medidas das marmitas (setembro/97, março/98 e junho/98). As medidas coincidiram com o intervalo entre os períodos de identificação da incisão erosiva e, no caso das marmitas, com o intervalo entre os períodos chuvosos do monitoramento (Paisani & Oliveira 1999).

PRODUÇÃO DE ESCOAMENTO NA CONCAVIDADE Com base na verificação de que a área de contribuição de escoamento para a incisão (cabeceira de drenagem) exibe morfologia côncava, a investigação da produção de escoamento vinculado à incisão erosiva desconectada se iniciou com o estudo detalhado da porção central da cabeceira de drenagem, área de convergência de fluxos subsuperficiais (Fernandes 1990). O procedimento visou a caracterização dos materiais da cobertura superficial e a elaboração de um plano de experimentação para a área, em que a hipótese de existência de zona de saturação próxima da superfície, no centro da concavidade, foi seriamente considerada.

Localização das fontes de escoamento saturado Incisões erosivas desconectadas da rede hidrográfica que apresentam área de contribuição bem definida, se desenvolvem preferencialmente pela ação do escoamento superficial, segundo modelo conceitual proposto por Oliveira (1989). O escoamento superficial pode ser gerado por dois fluxos que se diferenciam em função dos mecanismos envolvidos em sua formação, dando origem ao escoamento hortoniano e ao escoamento saturado (Dunne 1978). O primeiro ocorre nos casos em que a intensidade da chuva é superior à capacidade de infiltração instantânea do solo (Chorley 1978), ao passo que o segundo se desenvolve, principalmente, pela emergência da zona de saturação na superfície (Dunne 1990). A zona saturada é gerada preferencialmente em pouca

profundidade, dentro do solo ou sobre a rocha alterada e/ou são, em situações de descontinuidade hidrológica produzidas por variações texturais ou de decréscimo na condutividade hidráulica em profundidade (Whipkey & Kirkby 1978, Dunne 1990).

A caracterização dos materiais da área de estudo demonstrou a existência de cobertura superficial constituída por 10 estratos coluvionares, com os estratos 3 e 2 pedogenizados e restritos a porção direita do centro da concavidade (Fig. 4). Os estratos 7 e 4 também se restringem ao setor direito e se configuram como lentes delgadas de poucos metros de comprimento (Paisani & Oliveira 1998). Embora os estratos 7, 4, 3 e 2 exibam características físicas e hídras que possam sugerir setores propícios ao desenvolvimento de níveis saturados (Tabela 1), estes estratos são pouco relevantes para o comportamento hídrico geral da concavidade face sua extensão limitada, assinalando apenas a característica anisotrópica para a cobertura superficial.

As propriedades dos demais estratos coluvionares e da rocha alterada sugerem dois níveis propícios ao desenvolvimento de zona de saturação. Um nível situado próxima à superfície na passagem dos estratos superficiais (10 e 9) para o estrato 8, no qual o último estrato exibe menor condutividade hidráulica saturada e menor porosidade total, e maior densidade aparente, em relação aos estratos sobrejacentes e o estrato 6 (Tabela 1). Descrições de campo e a granulometria estabelecida ao longo da extensão do estrato 8, mostram que a característica de descontinuidade hidrológica se limita a base direita do centro da concavidade, local em que exibe aumento da fração argila, compactação e maior plasticidade (Paisani & Oliveira 1998). A característica de descontinuidade hidrológica limitada a base direita da concavidade, foi evidenciada pela média do potencial de pressão regis-

trada pelos tensiômetros instalados no estrato 8 nesse setor (Fig. 5, baterias A, B, D). Os instrumentos registraram em média poro-pressões (potencial de pressão positivo) durante os meses secos, enquanto os instrumentos instalados em outros setores da porção central da concavidade no estrato 8 (baterias C, G, H e F) registraram sucções (potencial de pressão negativo). Esse fato atesta a retenção de umidade no estrato 8 apenas na base direita da porção central da concavidade e o caracteriza como descontinuidade hidrológica próxima a superfície (DHS) (Paisani 1998). A baixa taxa de infiltração no ensaio feito sobre a área mapeada como DHS (Tabela 2, Fig. 5), em relação a taxa de infiltração do topo da porção central da concavidade, reafirma a existência de um nível propício ao desenvolvimento de zona de saturação próxima a superfície.

O outro nível com potencialidade a desenvolver zona saturada se situa, no sentido da profundidade, na passagem da cobertura superficial com a rocha alterada, setor cuja configuração topográfica foi designada topografia subsuperficial (Fig. 5). Nesse setor a rocha alterada exibe os menores valores de condutividade hidráulica saturada, de porosidade total e o maior valor de densidade aparente, em relação aos estratos sobrejacentes (10, 9, 8, 6, 5, 1) (Tabela 1). De fato a descontinuidade hidrológica ocorre na passagem da cobertura superficial para a rocha alterada, pois descrições de campo atestam manchas de hidromorfia na base do estrato 1 (Paisani 1998), evidenciando retenção periódica de umidade, enquanto que curvas de potencial total de pressão indicam emergência de frentes de umedecimento a partir dos tensiômetros mais profundos (Paisani & Oliveira 1999b).

Identificação dos tipos de escoamento Uma vez estabelecida as características hídras dos materiais da porção central da concavidade estudada, uma estação experimental foi montada, destinada a monitorar a produção de escoamento vinculado à incisão erosiva.

A identificação dos tipos de escoamento na cabeceira de drenagem teve como base a observação das variáveis volume e intensidade da chuva, capacidade de infiltração do solo, potencial de pressão da água no solo e fluxo através do vertedor instalado na cabeceira da incisão.

Figura 4 - Esquema de seção exposta em trincheira mostrando 10 estratos coluvionares identificados na área central da concavidade (Paisani & Oliveira 1998). Localização na figura 5. Arenitos e folhelhos arenosos Paleozóicos do Grupo Tubarão, Formação Itararé, compõem o embasamento rochoso da área (Fück 1966).

Figura 5 - Topografia superficial (linha contínua) e subsuperficial (linha descontinua) do centro da concavidade (cabeceira de drenagem) exibindo a extensão da descontinuidade hidrológica próxima a superfície (linha descontinua densa), distribuição das baterias tensiométricas (esfera) e ensaios de infiltrimetria (cruz). O ensaio de infiltrimetria na encosta foi realizado paralelo a incisão erosiva e não está sendo representado. RN arbitrário.

Os resultados apresentados referem-se aos dias 24, 28, 30 e 31 de março e 06 e 23 de abril, pois são significativos do modo pelo qual os diferentes tipos de escoamento estimados ocorreram ao longo do ano hidrológico de monitoramento.

No dia 24 de março choveu 27,5mm distribuídos em três eventos pluviométricos. A intensidade média máxima da chuva foi de 7,6mm.h⁻¹, não superando a capacidade de infiltração do solo de nenhum setor da porção central da concavidade - cabeceira de drenagem (Tabela 2). Embora a capacidade de infiltração não tenha sido superada, o vertedor da cabeceira da incisão registrou fluxo máximo de 0,9 l.s⁻¹. Nesse dia, a zona de saturação de profundidade se encontrava a cerca de 80cm da superfície, no topo da porção central da concavidade, como demonstrado, por exemplo, o tensiômetro T2 da bateria F (Fig. 6a). Na base da porção central da concavidade, as baterias A, B e D exibiram paralelismo das curvas de potencial de pressão, demonstrando que a drenagem foi simultânea em todos os volumes, exceto no volume com o tensiômetro T1 (Fig. 6b). Desse modo, a zona de saturação de profundidade, exemplificada pelo registro da bateria tensiométrica B poderia ter se elevado entre 40 a 100cm de profundidade, abaixo da descontinuidade hidrológica próxima a superfície (DHS) nos dias precedentes (Fig. 6b). O tensiômetro T1 da bateria B, instalado em estrato coluvionar acima da DHS (40cm), exibiu redução de -20cmH₂O (sucções) no dia seguinte ao evento pluviométrico do dia 24, evidenciando a transferência de umidade para dentro do estrato 8, gerador da DHS. A resposta à umidificação nos estratos superficiais é relativamente rápida durante o evento chuvoso, de modo que, se ocorreu saturação, esta escapou às leituras diárias (Castro Jr *et al.* 1989; Thuler *et al.* 1996). Como nesse período foi registrado processo de drenagem da cobertura superficial, demonstrado pela redução das poro-pressões, verificou-se que a chuva do dia 24 não interrompeu o processo (Fig. 6b). Embora o intervalo de leitura do potencial de pressão da água nos estratos coluvionares não tenha sido suficiente para registrar saturação em superfície, deve-se considerar que o *fluxo superficial saturado em superfície*, gerado sobre a área de DHS, teria sido responsável pelo escoamento registrado na cabeceira da incisão. De fato, como a capacidade de infiltração da concavidade não foi superada pela intensidade da chuva (verifica-se o decréscimo nas sucções do tensiômetro instalado no estrato que gera DHS, como na bateria B por exemplo), a hipótese de ocorrência de escoamento hortoniano é dificilmente justificável. Igualmente, verifica-se que o processo de drenagem da zona de saturação não foi alterado (redução das poro-pressões).

Para o dia 28 de março, o volume de chuva foi de 49mm, com intensidade máxima de 25,4mm.h⁻¹, superando a capacidade de infiltração da área sobre a DHS na base da porção central da concavidade (Tabela 2). Nesse dia, na bateria B, por exemplo, registrava-se a dre-

nagem da zona de saturação de profundidade, cuja tendência foi modificada apenas no dia 29 (Fig. 6b). Como a intensidade da chuva superou a capacidade de infiltração apenas na área situada sobre a DHS, e como a zona de saturação de profundidade se encontrava em processo de drenagem, principalmente na base da porção central da concavidade, a exemplo da bateria B, a vazão de 9,43 l.s⁻¹, registrada na cabeceira da incisão, pode ter sido produzida pelo *fluxo hortoniano* gerado na base da porção central da concavidade sobre a DHS.

Em 30 de março, a chuva de 42mm ocorreu de maneira concentrada, de modo que os tensiômetros superficiais (T1) não registraram redução das sucções no dia seguinte ao evento pluviométrico (Fig. 6a e b). No dia 30, a intensidade da chuva chegou a 41,2mm.h⁻¹, superando a capacidade de infiltração de todos os setores da concavidade (Tabela 2). A vazão de 8,5 l.s⁻¹, registrada na cabeceira da incisão, deve ter sido produzida pelo *fluxo hortoniano* gerado em todos os setores da porção central da concavidade.

No dia 31 de março, a chuva de 30mm distribuiu-se por 15 horas até o dia seguinte. A intensidade máxima chegou a 7,2mm.h⁻¹, não sendo suficiente para superar a capacidade de infiltração de nenhum setor do centro da concavidade (Tabela 2). Nesse dia, a zona de saturação de profundidade se encontrava em processo de recarga, e estava a menos de 100cm da superfície na bateria B (T2), e a 30cm na bateria F (T1) (Fig. 6b e a). É provável que, no dia 31 de março, o escoamento de 2,93 l.s⁻¹ registrado na cabeceira da incisão, tenha sido produzido pelo *fluxo superficial saturado*, gerado pela elevação da zona de saturação de profundidade até a superfície, de montante para jusante no centro da concavidade.

A identificação dos agentes de escoamento no centro da concavidade, nesses dias do mês de março, sugere a existência de relação direta entre o baixo volume relativo das chuvas e a geração de fluxo superficial saturado em superfície, originado na área de descontinuidade hidrológica próxima a superfície - DHS. Nas situações de chuvas bem distribuídas, como a do dia 31, a zona de saturação de profundidade pode elevar-se até a superfície em toda o centro da concavidade, gerando fluxo superficial saturado generalizado. Já quando as chuvas se apresentam relativamente mal distribuídas, picos mais elevados podem gerar fluxo hortoniano na base da porção central da concavidade - área DHS. Em caso de chuva concentrada, como a do dia 30, o fluxo hortoniano pode ser gerado em todos os setores do centro da concavidade. Constata-se, enfim, que a distribuição das chuvas parece ser o principal fator da produção de escoamento para a cabeceira da incisão.

No mês de abril, o escoamento registrado aparenta decorrer de situações similares às do mês de março, embora haja algumas peculiaridades (Paisani 1998). No dia 06 de abril, o baixo volume de chuva de 27mm ocorreu de modo concentrado (26,4mm.h⁻¹), superando a capa-

Figura 6 - Variação diária dos potenciais de pressão para dias selecionados do mês de março/98 para as baterias F (a) e B (b).

Figura 7 - Variação diária dos potenciais de pressão para dias selecionados do mês de abril/98 para as baterias F (a) e B (b).

cidade de infiltração na área de DHS (Tabela 2). Não houve evento pluviométrico nos quatro dias precedentes, de modo que a zona saturada de profundidade estava próxima à superfície em processo de drenagem (Fig. 7a e b). Como os tensiômetros superficiais (T1) das baterias B e F exibiram diminuição das sucções no dia seguinte ao evento pluviométrico do dia 06, demonstrando transferência de umidade no sentido de profundidade, é de se esperar que o fluxo de $5,23 \text{ l.s}^{-1}$, registrado na cabeceira da incisão, tenha sido produzido pela associação do *fluxo hortoniano*, originado na área de DHS, com o *fluxo superficial saturado*, produzido pela ascensão da zona de saturação de profundidade nos demais setores do centro da concavidade. De fato, Dunne & Black (1970) já haviam reconhecido que o escoamento superficial pode ser originado pela composição de diferentes fluxos.

No dia 23 de abril, a chuva de 54mm foi bem distribuída, com intensidade máxima de $8,2 \text{ mm.h}^{-1}$. No dia seguinte ao evento pluviométrico, todos os tensiômetros do topo (bateria F) e da base do centro da concavidade (bateria B) registraram poro-pressões (Fig. 7a e b), evidenciando saturação generalizada na porção central da

concavidade. Como a intensidade da chuva não superou a capacidade de infiltração do solo (Tabela 2), e considerando que a leitura dos tensiômetros fora feita antes do evento pluviométrico, é provável que o *fluxo superficial saturado*, originado pela elevação da zona de saturação em toda o centro da concavidade, tenha sido responsável pela elevada taxa relativa de vazão ($9,46 \text{ l.s}^{-1}$) na cabeceira da incisão. Assim, chuvas volumosas e bem distribuídas, responsáveis pela formação do fluxo superficial saturado em toda a concavidade, também podem ser responsáveis pelas elevadas taxas de vazão na cabeceira da incisão (ver Tabela 5).

Constata-se que a concavidade apresenta potencialidade para gerar fluxo hortoniano e fluxo superficial saturado, sobretudo no setor direito do centro da concavidade, área na qual se situa a descontinuidade hidrológica próxima a superfície. Outra fonte possível para o escoamento superficial saturado se verifica pela elevação da zona de saturação de profundidade. As maiores vazões do período analisado parecem decorrer tanto do fluxo hortoniano, quanto do fluxo superficial saturado, agindo através da elevação da zona de saturação. Vazões intermediárias e baixas podem ser produzidas principalmente pelo fluxo superficial saturado em superfície, nas coberturas coluviais situadas acima da área da DHS.

Tabela 1- Condutividade hidráulica saturada (K_q), densidade aparente (D_a) e real (D_r), e porosidade total (P_t) dos estratos coluvionares. RA = rocha alterada. Locais de amostragem estão sendo representados na figura 4.

Estratos	$K_q (\text{mm.h}^{-1})$	$D_a (\text{g.cm}^{-3})$	$D_r (\text{g.cm}^{-3})$	$P_t (\%)$
10	17,24	1,26	2,66	52,63
9	4,81	1,42	2,70	47,37
8	4,42	1,59	2,7	44,59
7	4,10	1,55	2,82	45,03
6	3,27	1,53	2,88	46,88
5	2,37	1,25	2,70	53,70
4	6,95	1,53	2,63	41,82
3	1,30	1,35	2,68	49,63
2	1,90	1,49	2,90	48,68
1	4,40	1,56	2,72	42,64
RA	1,90	1,72	2,76	37,68

Tabela 2- Taxas de infiltração de água no solo. Localização dos ensaios na figura 5.

Local de ensaio	Capacidade de Infiltração do solo (mm.h^{-1})
Fora da concavidade	173,33
Base da concavidade* +	24,00
Topo da concavidade*	36,00

*Vegetação predominante *Schyzachirium tenerum* (gramínea rasteira).
+ área da descontinuidade hidrológica suspensa.

ESCOAMENTO NA INCISÃO EROSIVA Uma vez estimados os mecanismos de produção de escoamento superficial na concavidade que atuam como cabeceira de drenagem da incisão erosiva, cabe analisar o caráter e o poder erosivo do escoamento no interior da incisão.

Contribuição da rede de terracetes à produção de escoamento Terracetes são feições erosivas típicas de processos de rastejo geradas pelo pisoteio do gado (Selby 1982). O pisoteio recorrente compacta faixas do terreno, reduz a permeabilidade do solo e favorece o desenvolvimento de escoamento superficial hortoniano (Dunne 1978, Fernandes 1990, Oliveira 1992, Mondenese & Jordão 1992).

Os terracetes que circundam a incisão erosiva estudada e convergem para ela, exibem densidade aparente superior à densidade aparente dos materiais da superfície da área adjacente (Tabela 3), sendo, portanto, áreas potenciais de produção de escoamento superficial hortoniano para a incisão.

A contribuição da rede de terracetes foi verificada indiretamente pela diferença entre as vazões registradas na desembocadura da incisão e as registradas na cabeceira da incisão. Devido à dinâmica de transferência de sedimentos ao longo da incisão erosiva, entulhando periodicamente o vertedor da desembocadura, apenas os dias 24, 28 e 29 de março possibilitaram estimar a contribuição indireta de escoamento produzido pelos terracetes.

No geral, as taxas de fluxo estimadas na desembocadura, associadas aos terracetes, foram superiores àquelas registradas na cabeceira da incisão (Tabela 4). Em situações de fluxo elevado registrado na cabeceira da incisão, como no dia 28/03, as taxas de fluxo estão subestimadas em função das limitações do instrumento (Paisani *et al.* 1999). Os resultados sugerem que a contribuição da rede de terracetes para o escoamento da incisão é tão importante quanto o escoamento proveniente da cabeceira de drenagem. De fato, a incisão erosiva possui canal descontínuo, caracterizado por rupturas de declive, zonas de concentração de escoamento turbulento nas marmitas, bem como por zonas de espraiamento e infiltração do escoamento sobre pequenos depósitos aluviais (Fig. 3). Esse caráter descontínuo da incisão implica a formação de escoamento igualmente descontínuo (Oliveira 1992). As vazões registradas na cabeceira tendem a dissipar-se ao longo da incisão: o escoamento perde energia nas marmitas e se infiltra nos cones criados a jusante. Consequentemente, as vazões registradas na desembocadura da incisão, provavelmente não correspondem ao escoamento produzido a partir da cabeceira e estão relacionadas à produção de escoamento sobre os terracetes adjacentes. Para compreender melhor o papel dos terracetes na produção de escoamento superficial para a incisão erosiva em estudo, seriam necessários outros procedimentos (Paisani & Oliveira 1999c). Em função disto, a análise do poder erosivo do escoamento superficial para a incisão pode ser feita apenas em relação ao fluxo produzido pela concavidade, na cabeceira da incisão.

Poder erosivo do escoamento superficial A tabela 5 indica as taxas de fluxo registradas na cabeceira da incisão para alguns dias dos meses de março e abril, obtidas com a conversão de unidades volumétricas de vazão para unidades métricas de fluxo, conforme a expressão (1):

$$Q_{(m)} = (0,001.Q_{(l)}) / A \quad (1)$$

onde $Q_{(m)}$ = velocidade do fluxo de $l.s^{-1}$ para $m.s^{-1}$; $Q_{(l)}$ = vazão em $l.s^{-1}$; A = área da seção transversal (m^2).

Percebe-se que a maioria das taxas de fluxo apresentaram velocidades superiores a $0,30 m.s^{-1}$. Como são necessárias taxas iguais ou superiores a esta velocidade para que ravinas sejam criadas (Selby 1994), pode-se dizer que o escoamento superficial produzido pela concavidade apresenta poder erosivo. Embora subestimada em decorrência das limitações do vertedor (Paisani *et al.* 1999), a maior velocidade estimada do fluxo foi de $0,50 m.s^{-1}$, registrada nos dias 28 e 30 de março e 23 de abril. Desse modo, a velocidade do fluxo na cabeceira da incisão indica que tanto o fluxo hortoniano quanto o fluxo superficial saturado apresentam elevado poder erosivo, pois ambos atuaram em proporções variadas durante o período de observação da evolução da incisão. Nota-se, portanto, a atividade de diferentes tipos de fluxo e de diferentes fontes de escoamento, contribuindo para a evolução da incisão erosiva.

EVOLUÇÃO DA INCISÃO EROSIVA A primeira estimativa do volume erodido da incisão foi feita com dados produzidos por Camargo (1998) em 30/05/95, quando a autora levantou a ocorrência de incisões erosivas no setor sul do Estado do Paraná. A segunda estimativa se deu durante o monitoramento pluviométrico, 27 meses após o primeiro levantamento (28/09/97). Nove meses após a segunda estimativa, obteve-se novo volume erodido (21/06/98). Constatou-se que a taxa de erosão global da incisão quase duplicou durante o período monitorado (Tabela 6).

As marmitas foram as feições erosivas que mais evoluíram nesse período (Tabela 7), havendo, inclusive, coalescência de marmitas na porção de jusante da incisão erosiva (B-C). Verificou-se que as marmitas exibiram volume global erodido diferenciado (Tabela 8), sendo que as de jusante evoluíram mais que as de montante (Tabela 9). Isso se deve à atuação de frentes de exfiltração intermitentes que apresentam maior permanência relativa nas porções de jusante durante a oscilação da zona de saturação (Paisani & Oliveira 1999).

Acredita-se que, no período que precedeu o monitoramento, a normalidade da distribuição das chuvas tenha propiciado a evolução da incisão erosiva pelos mecanismos decorrentes do escoamento superficial. Já as elevadas taxas de erosão do período monitorado refletem a associação de mecanismos dos escoamentos superficial e

subsuperficial, decorrentes do regime pluviométrico superúmido constatado, quando se comparou o período monitorado com uma série pluviométrica de 30 anos (Paisani & Oliveira 1999).

CONCLUSÕES A análise da geração de fluxo na área de contribuição mostrou que a produção de escoamento superficial para a cabeceira da incisão é complexa, podendo ser gerada pelo fluxo hortoniano e pelo fluxo superficial saturado. O fluxo superficial saturado pode decorrer tanto da saturação em superfície, formada pela descontinuidade hidrológica próxima a superfície, quanto da elevação da zona de saturação de profundidade.

As marmitas são as principais feições erosivas do caso de incisão estudado. Dois processos erosivos atuaram na incisão durante o monitoramento: 1) o escoamento superficial, produzido pela concavidade (cabeceira de drenagem) e pela rede de terracetes, e 2) o escoamento subsuperficial, resultante do afloramento da zona de saturação de profundidade nas paredes da incisão. Conjugando os processos erosivos observados às feições identificadas em campo ao longo da incisão - degraus produzidos pela convergência dos terracetes, marmitas, alcovas de regressão e progressão e depósitos aluviais -, é possível apresentar um esboço dos principais agentes responsáveis pela evolução da incisão erosiva (Fig. 8).

Considerando que as pistas de gado formam terracetes que convergem nos pontos de inflexão com a incisão, haveria a concentração de escoamento superficial proveniente tanto da rede de terracetes, quanto da área de contribuição (Fig. 2). Ao passar sobre as rupturas de declive causadas pelos degraus, o escoamento superficial formaria pequenas cachoeiras e zonas de turbilhonamento, provavelmente responsáveis pela criação e aprofundamento das marmitas (Fig.3). Ao sair dessas zonas de turbilhonamento, a água se espraiaria por uma superfície mais ampla, o que reduziria a competência e a capacidade do fluxo, promovendo a deposição do material erodido e a conseqüente formação dos depósitos aluviais. Embora as alcovas de regressão não tenham sido monitoradas, é possível que sejam geradas por associação complexa entre os mecanismos de erosão por cascata, por filetes subverticais e por percolação, ao passo que as alcovas de progressão poderiam estar sendo formadas pela erosão por percolação da água empoçada, após o escoamento concentrado (Fig. 8).

Em sentido amplo, é provável que a ação conjunta entre erosão por cascata e erosão pelas frentes de exfiltração seja o principal mecanismo erosivo, ação que atua na evolução geral da incisão. Essa ação está promovendo a integração de canais descontínuos em incisões desconectadas da rede hidrográfica. Estudos de detalhe precisam ser encaminhados para esclarecer a ação conjunta entre erosão pelo escoamento superficial e pelo subsuperficial, na evolução desse tipo de incisão desconectada da rede hidrográfica.

Agradecimentos: ao FUNPESQUISA-UFSC e ao programa de Pós-Graduação em Geografia - UFSC, pelo financiamento da pesquisa.

Tabela 3 - Densidade aparente (D_a) e real (D_r) e Porosidade total (P_t) dos materiais dos terracetes e entorno.

Amostras	D_a ($g.cm^{-3}$)	D_r ($g.cm^{-3}$)	P_t (%)
Terracete 1	1,67	2,70	38,10
Entorno	1,23	2,64	53,10
Terracete 2	1,63	2,64	38,40
Entorno	1,35	2,61	48,39
Terracete 3	1,54	2,66	42,10
Entorno	1,33	2,57	48,30

Tabela 4 - Volume de chuva (V_{ch}), intensidade da chuva (I_{ch}), vazão na cabeceira da incisão (V_C), vazão na foz da incisão (V_F) e fluxo estimado para as pistas de gado (FP).

Dias	Fluxo	V_{ch} (mm)	I_{ch} ($mm.h^{-1}$)	V_C ($l.s^{-1}$)	V_F ($l.s^{-1}$)	FP ($l.s^{-1}$)
24/03	saturado *	27,50	7,60	0,90	2,49	1,59
28/03	hortoniano ⁺	49,00	25,40	9,43	17,85	8,42
29/03	saturado*	20,00	10,20	0,18	0,81	0,63

* Fluxo saturado próximo a superfície (DHS).

+ Fluxo hortoniano gerado na área de DHS.

Tabela 5 - Provável agente de fluxo na concavidade (AFC), vazão na cabeceira da incisão (VC) e velocidade do fluxo na cabeceira da incisão (VFI).

Dias	AFC	VC (l.s ⁻¹)	VFI (m.s ⁻¹)
24/03	saturado *	0,90	0,30
28/03	hortoniano +	9,43	0,50
29/03	saturado *	0,18	0,18
30/03	hortoniano ++	8,00	0,50
31/03	saturado **	2,93	0,42
06/04	hortoniano + / saturado	5,23	0,48
15/04	saturado*	1,85	0,37
16/04	saturado*	10,26	0,49
22/04	saturado*	6,37	0,49
23/04	saturado*	9,43	0,50

* Fluxo superficial saturado em superfície.

** Fluxo superficial saturado pela elevação da zona de saturação de profundidade.

+ Fluxo hortoniano gerado em toda concavidade.

++ Fluxo hortoniano gerado na área de descontinuidade hidrológica suspensa (DHS).

/ Associação entre o fluxo hortoniano gerado na área de DHS e o fluxo saturado gerado no topo da concavidade.

Tabela 6 - Volume global da incisão erosiva descontínua (VGI), massa de solo erodido (MSE) e taxas globais de erosão da incisão (TxG) de maio/95 a junho/98.

Medição	VGI	MSE	TxG	
	(m ³)	(t)	(m ³ .mês ⁻¹)	(t.a ⁻¹)
30/05/95	62,84	100,02		
			0,65	10,18
28/09/97	80,40	122,92		
			3,18	18,18
21/06/98	109,05	165,23		

Tabela 7 - Volume global: da incisão erosiva descontínua (VGI), das marmitas (VGM) e das porções canalizadas (VGC) durante o período monitorado.

Medição	VGI (m ³)	VGM (m ³)	VGC (m ³)
28/09/97	80,40	23,00	57,40
21/06/98	109,05	59,00	50,05
Diferença	28,65	36,00	07,35

Tabela 8 - Volume e massa total erodidos das marmitas ao longo do tempo.

Marmitas*	Volume e massa total erodidos					
	28/09/97		24/03/98		21/06/98	
	(m ³)	(t)	(m ³)	(t)	(m ³)	(t)
A	2,19	3,29	2,65	3,99	5,41	8,13
B-C	18,50	28,07	35,71	54,63	41,54	62,00
D	1,56	2,33	6,84	10,21	8,32	12,41
E	0,40	0,64	1,76	2,78	2,11	3,33
F	0,35	0,55	1,13	1,70	1,62	2,56

*Seqüência de jusante para montante.

Tabela 9 - Taxas de erosão das marmitas.

M*	Taxas de erosão					
	Set./97 a mar./98		Mar./98 a jun./98		Set./97 a jun./98	
	(m ³ .mês ⁻¹)	(m ³ .a ⁻¹)	(m ³ .mês ⁻¹)	(m ³ .a ⁻¹)	(m ³ .mês ⁻¹)	(m ³ .a ⁻¹)
A	0,08	0,96	0,92	11,04	0,36	4,32
B-C	2,86	34,32	1,94	23,28	2,56	30,72
D	0,88	10,56	0,49	5,88	0,75	9,00
E	0,23	2,76	0,12	1,44	0,19	2,28
F	0,13	1,56	0,16	1,92	0,14	1,68

* Marmitas, seqüência de jusante para montante

- AP = alcova de progressão
- AR = alcova de regressão
- = gramínea
- = escoamento superficial – hortoniano e saturado
- = escoamento superficial – canalizado nos terraçetes
- = dissipação do fluxo d'água
- = fluxo descendente
- = fluxo ascendente
- = erosão por percolação

Figura 8 - Esboço da atuação dos processos erosivos ao longo da incisão descontínua.

Referências

- Camargo G. 1998. *Processos de erosão no Centro e Sul do Segundo Planalto Paranaense: evolução de encosta e influência da erosão subterrânea na expansão de voçorocas*. Centro de Filosofia e Ciências Humanas. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Dissertação de Mestrado, 210p.
- Castro JR.E., Miranda J.C. & Coelho netto A.L. 1989. Variação dos potenciais matriciais em encostas florestadas: Maciço da Tijuca, RJ. In: SBGFA, Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 3, Nova Friburgo, *Anais*, 1:291-304.
- Chorley R.J. 1978. The hillslope hydrological cycle. In: M.J. Kirkby (ed.) *Hillslope hydrology*, New York, John Wiley & Sons, 1-42.
- Dunne T. 1978. Field Studies of hillslope flow processes. In: M.J. Kirkby (ed.) *Hillslope hydrology*, New York, John Wiley & Sons, 227-293.
- Dunne T. 1990. Hydrology, mechanics, and geomorphic implications of erosion by surface flow. *Geological Society of America Special Paper*, 252:1-28.
- Dunne T. & Black, R.D. 1970. Partial area contributions to storm runoff in a small New England Watershed. *Water Resources Reserach*, 6:1296-1311.
- Fernandes N.F. 1990. *Hidrologia subsuperficial e propriedades físico-mecânicas dos "complexos de rampas" - Bananal (SP)*. Inst. de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 151p.
- Fuck R.A. 1966. Nota explicativa da folha geológica de Quero-Quero. *Bol.UFPR Geol.*, 19, 21p.
- Guerra A.F.T. 1996. Processos erosivos nas encostas. In: S. B. Cunha & A. J. T. Guerra (org.) *Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações*. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 139-155.
- Lamim A.S. & Almeida F.G. 1996. A informação no monitoramento e na mensuração da erosão em voçorocas. *Sociedade & Natureza*, 15:283-286.
- Mondenesi M.C. & Jordão S. 1992. A erosão acelerada em Caçapava - São Paulo. *Rev.IG/ USP*, 9, 31 p.
- Moyersons J. 1991. Ravine formation on steep slopes: forward versus regressive erosion. Some case studeis from Rwanda. *Catena*, 18:309-324.
- Oliveira M.A.T. 1989. Erosion disconformities and gully morphology: a threedimensional approach. *Catena*, 16:413-423.
- Oliveira M.A.T. 1992. *Morphologie des versants et ravinements: héritages et morphogénese actuelle dans une région de socle tropical. Le cas de Bananal, São Paulo, Brasil*. Laboratoire de Géographie Physique, Université de Paris IV, Sorbonne - Paris (França), Tese de Doutorado, 401p.
- Oliveira M.A.T. 1996. Evolução de voçorocas e integração de canais em áreas de cabeceira de drenagem: modelo conceitual, taxas de erosão e sinergia de mecanismos. *Geosul*, 19/20:153-182.
- Oliveira M.A.T. 1997. Towards the integration of subsurface flow and overland flow in gully head extension: issues from a conceptual model gully erosion evolution. *South African Geographical Journal* (Special edition), 120-128.
- Oliveira M.A.T., Sbruzzi G.J. & Paulino L.A. 1995. Taxas de erosão por voçorocas no médio vale do rio Paraíba do Sul. In: SBGFA, Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, Goiânia, 6, *Anais*, 1:647-651.
- Paisani J.C. 1998. *Descontinuidades hidrológicas, escoamento superficial e desenvolvimento de incisões erosivas em áreas de cabeceira de drenagem: estudo de caso na Colônia Quero-Quero, Palmeira (PR)*. Centro de Filosofia e Ciências Humanas. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Dissertação de Mestrado, 184p.
- Paisani J.C. & Oliveira M.A.T. 1998. Identificação de paleossolos em áreas de cabeceira de drenagem: o caso da Colônia Quero-Quero, Palmeira (PR). *Geosul*, 14:470-475.
- Paisani J.C. & Oliveira M.A.T. 1999. O caráter atípico do monitoramento pluviométrico e o problema de caracterização dos processos em incisões erosivas: o caso da Colônia Quero-Quero, Palmeira (Pr). In: SBGFA, Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 7, Belo Horizonte, *Anais*, 1:314-315.
- Paisani J.C. & Oliveira M.A.T. 1999b Dinâmica da área de contribuição para a formação de escoamento superficial saturado - cabeceira de drenagem da Colônia Quero-Quero, Palmeira (PR). *Geociências-UNESP*, 18:261-284.
- Paisani J.C. & Oliveira M.A.T. 1999c. Pistas de gado (terraces) e o desenvolvimento de incisões erosivas desconectadas da rede hidrográfica: o caso da Colônia Quero-Quero, Palmeira (Pr). In: SBGFA, Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 7, Belo Horizonte, *Anais*, 1:316-317.
- Paisani J.C., Oliveira M.A.T. & Pontelli M.E. 1999. Geomorfologia experimental: uso de vertedor retangular com paredes delgadas para o registro de fluxo em canal efêmero. *Rev.Tecnol.Ambiente*, Criciúma-UNESC, 5:77-83.
- Selby M.J. 1982. *Hillslope materials and processes*. Oxford, 264p.
- Selby M.J. 1994. Hillslope sediment transport and deposition. In: N. Pye (ed.) *Sediment transport and deposition processes*, Cambridge, 61-87.
- Thuler, E.R., Gomes R.A.T. & Fernandes N.F. 1996. Infiltração e drenagem nos solos da estação de agrometeorologia da UFRJ. *Sociedade & Natureza*, 15:293-297.
- Whipkey R.Z. & Kirkby M.J. 1978. Flow within the soil. In: M.J. Kirkby, (ed.) *Hillslope hydrology*, New York, John Wiley & Sons, 121-144.

Manuscrito A-1150

Recebido em 20 de março de 2000

Revisão dos autores em 23 de outubro de 2000

Revisão aceita em 28 de outubro de 2000