

Estimativa de Proveniência de Sedimento em Cabeceira de Drenagem com Alta Densidade de Estradas Rurais não Pavimentadas

Edivaldo Lopes Thomaz, Valdemir Antoneli, Wolliver Anderson Dias

Departamento de Geografia, Universidade Estadual do Centro-Oeste – UNICENTRO

thomaz@unicentro.br; vdantoneli@pop.com.br; wollivergeo@yahoo.com.br

Recebido: 14/11/08 - revisado: 20/02/09 - aceito: 23/05/11

RESUMO

O entendimento da produção e transferência de sedimento das vertentes para o fundo de vale e canal fluvial é essencial aos propósitos da Geomorfologia. Os objetivos desse trabalho foram: verificar a produção de sedimento em barranco de estrada e canal fluvial; reinterpretar estudos anteriores no sentido de avaliar a proveniência de sedimento em diferentes usos da terra e estimar balanço de proveniência de sedimento em cabeceira de drenagem enfocando a participação das estradas rurais não pavimentadas. A metodologia constou de mapeamento para identificação das áreas fontes de sedimento; observações em campo e monitoramento sistemáticos por meio de técnica volumétrica (pino de erosão). Concluiu-se que as estradas rurais não pavimentadas foram as principais fontes de sedimentos na área de estudo (46,5%), apesar de representar 1,6% da área ocupada. As estradas rurais aumentaram a densidade de drenagem da cabeceira em 48,7%. As estradas configuram-se como conectoras entre as vertentes e o canal fluvial, facilitando a entrada de sedimento nos riachos.

Palavras-chave: cabeceira de drenagem, áreas fontes de sedimento, proveniência, uso da terra, estradas rurais não pavimentadas.

INTRODUÇÃO

O entendimento da produção e transferência de sedimento das vertentes para o fundo de vale e canal fluvial é essencial aos propósitos da Geomorfologia. As fontes de sedimento em uma cabeceira de drenagem encontram-se em dois domínios distintos: vertente e canal fluvial. Na vertente o sedimento produzido pode ser transferido por fluxo superficial difuso e concentrado, além de fluxo subsuperficial (ex. pipping) e movimento de massa. No caso do canal fluvial, as principais fontes de sedimentos são provenientes da erosão de margens e leito, ou da remobilização de material previamente depositado.

Tradicionalmente os estudos de erosão em vertentes são conduzidos de forma pontual. Assim, não ocorre a integração entre os processos de vertente e de rio. De acordo com Slaymaker (1997) a perspectiva de balanço de sedimento é uma abordagem que busca romper com os estudos erosivos pontuais realizados em bacias de drenagem. A referida proposta segundo o autor pretende integrar a dinâmica de sedimento na bacia de drenagem em suas diferentes fases de produção, estoque e transferência nos diferentes domínios do sistema (vertente e rio).

Neste sentido, a identificação de proveniência de sedimento destaca-se devido à importância de quantificar a contribuição (absoluta e relativa) das diversas fontes de sedimento existente em uma bacia. Diversos estudos registram a produção de sedimento em diferentes domínios e usos da terra em bacia de drenagem como: erosão de margem rio (Lawler, 2008); erosão em áreas de pastagens (Thomaz & Dias, 2009); erosão em sistemas florestais (Martins et al., 2003) e erosão sistemas agrícolas (Morgan, 2005).

Além dos estudos tradicionais realizados em áreas agrícolas, tem aumentado nos últimos anos o interesse por erosão em estradas não pavimentadas (Luce & Wemple, 2001, Griebeler et al., 2005, Sheridan & Noske, 2007, Ramos-Scharrón & MacDonald, 2007, Martinez-Zavala et. al., 2008).

Entre as principais influências das estradas estão: a interferência no movimento de água e sedimento na bacia de drenagem; aumento no escoamento superficial e produção de sedimento e, sobretudo, ampliação da conexão entre vertente e canal fluvial.

As estradas não pavimentadas são importantes elementos geográficos das paisagens rurais. Em estudo prévio verificou-se processo de degradação ambiental causada por estradas e carregadores no

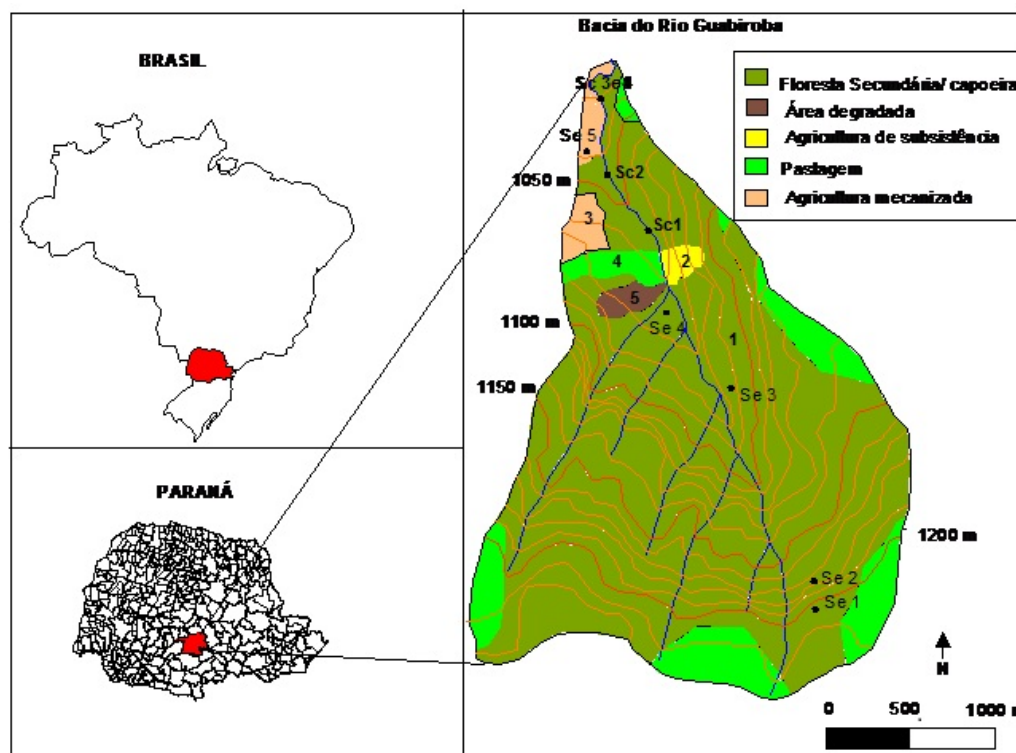


Figura 1 – Localização da área de estudo indicando os principais usos da terra (1) floresta secundária e capoeira; 2) agricultura de subsistência; 3) agricultura mecanizada; 4) pastagem; 5) área degradada) e locais monitorados (Se= Seção estrada e Sc= Seção canal fluvial).

Nota: As características de cada seção estão detalhadas no quadro 1.

âmbito de bacia de drenagem rural (Thomaz, 2000). As conclusões do autor foram que os carregadores dentro das propriedades, principalmente, os utilizados para a retirada de madeira, comportavam-se como canalizadores para o escoamento concentrado das águas pluviais, pois eram construídos praticamente em todas as declividades e direções, não obedeciam aos aspectos topográficos do terreno, não possuíam caixas para a contenção das águas ou estruturas para dissipação de energia do escoamento concentrado. Aliás, os carregadores e estradas cruzavam ou terminavam às margens dos rios aumentando a entrada de sedimento no canal fluvial (Thomaz, 2000, p.151-152).

Outros estudos foram realizados posteriormente (Thomaz, 2003 e 2005), porém todos de maneira qualitativa não permitindo avaliações mais precisas sobre as características e influência das estradas na produção de sedimento.

Os programas de conservação de solo e água em micro-bacias trouxeram resultados significativos no Estado do Paraná, sobretudo, nas regiões Norte, Oeste e Sudoeste do estado (Emater, 1985, Freitas e Ker, 1990). Nessas regiões as condições geomorfo-

pedológicas (relevo-solo) facilitaram o planejamento integrado das propriedades no âmbito das bacias de drenagem, inclusive no traçado, instalação, e readequação de estradas rurais. Contudo, em outras regiões com características geomorfo-pedológicas não aptas, com relevos dissecados e solos rasos, esse modelo de gestão não foi implantado.

Esse é o caso de grande parte da região Centro-Sul do Paraná (ex. área de estudo), particularmente, em terras dissecadas ocupadas por agricultura familiar, florestas e reflorestamento. Nessas áreas os esforços de conservação de solo ocorrem ao nível das propriedades rurais. Nas terras dissecadas, as estradas, carregadores e caminhos são implantados em diferentes unidades geomorfo-pedológicas, muitas vezes, não é considerada a aptidão do terreno. Por outro lado, a conservação das estradas rurais em terras dissecadas é realizada com dificuldade. Assim, muitos carregadores e caminhos internos das propriedades tornam-se intransitáveis devido ao forte ravinamento que se instalam sobre o leito dessas vias de circulação. Entretanto, poucos estudos têm focado a produção de sedimento em estradas rurais não pavimentadas.

Portanto, os objetivos desse trabalho foram: 1) verificar a produção de sedimento em barranco de estrada e de canal fluvial; 2) comparar a produção de sedimento em barranco de estradas antigas e novas (recém niveladas); 3) reinterpretar estudos anteriores no sentido de avaliar a proveniência de sedimento em diferentes usos da terra; 4) estimar balanço de proveniência de sedimento em cabeceira de drenagem com destaque para a participação das estradas rurais não pavimentadas.

MATERIAL E MÉTODO

Características da área de estudo

A cabeceira de drenagem de segunda ordem com 1,1 km² (Figura 1) localiza-se na bacia do Rio Guabiroba no município de Guarapuava no estado do Paraná. A bacia possui área aproximada de 23,7 km² (2370 ha) e a hierarquia fluvial é de quarta ordem. A rede de drenagem da cabeceira de drenagem soma 4,4 km (Dd 3,94 km/km), enquanto que a extensão das estradas e caminhos é de 4,17 km.

O clima de Guarapuava possui característica subtropical úmido sem estação seca (Cfb). A temperatura média anual é 17,1±0,47°C, a evaporação média anual é de 835,1±123,9 mm. As chuvas são bem distribuídas ao longo do ano com média anual de 1953,8±389,7mm (1976-2002) (Thomaz & Vestena, 2003).

A área está inserida numa unidade onde predomina a associação de solos Litólicos Álicos (Neossolos Litólicos) e Cambissolos Álico, ambos com textura argilosa, fase pedregosa, sob domínio da floresta subtropical subperenifólia. O relevo dessa unidade é predominantemente forte ondulado a montanhoso. Devido às características descritas, essa unidade apresenta suscetibilidade à erosão muito forte, bem como é predisposta a deslizamentos e desmoronamentos (Mendes & Castro, 1984). Em torno de 75,6% da cabeceira de drenagem possui declividade entre 12% e superior a 30%. Os solos são argilosos (>35% de argila).

A cabeceira de drenagem escolhida para monitoramento é representativa dentro da bacia do Guabiroba. O uso da terra é diversificado e mantém o mesmo padrão da bacia principal (Figura 1). Predomina florestas secundárias e capoeiras em variados estágios de regeneração, pastagem, agricultura de subsistência e agricultura mecanizada.

Estimativa do volume de material removido pela construção das estradas e material estocado em caixas de contenção na lateral das estradas

O volume de material removido pela construção das estradas foi estimado a partir da largura e altura média do barranco. Foram mensuradas 11 seções de estradas tomadas ao acaso (estrada nova e antiga). Além disso, estimaram-se o volume médio de material mobilizado pela construção da estrada baseando-se em 59 medidas de altura de barranco e 32 medidas de largura de estradas. O volume das estradas foi calculado pela área do triângulo ($b \cdot xh/2$) multiplicada pela densidade do material em kg m³. Esse procedimento foi adotado devido às características das estradas que possuem em grande parte um lado do barranco mais alto que o outro (assimetria). A diferença entre estrada nova e estrada antiga é que a primeira tem construção ou manutenção recente além de ter menos tráfego. No caso da estrada nova no presente estudo ela foi construída apenas para a extração de madeira, posteriormente foi abandonada. O segundo tipo, estrada antiga, são estradas com maior tráfego, pois ligam propriedades, sendo que a cada um ou dois anos são realizadas manutenções devido à erosão que ocorre em seu leito. Essas estradas tendem a serem ligeiramente mais largas e terem barrancos mais altos devido às constantes manutenções que causam o aprofundamento do leito.

A densidade do material utilizado para a estimativa do volume de material mobilizado pela construção das estradas foi de 1500 kg m³. Uma vez que, o material mobilizado não é formado apenas por solo (material menos denso), mas sim por rocha alterada e às vezes no meio da massa removida há presença de matacão de rocha sã.

A estimativa de material estocado em caixas de contenção ao longo das laterais das estradas foi realizada num trecho de estrada antiga de 860 m (20,6% da extensão total das estradas), pois apenas nas estradas com maior uso é que essa estrutura é construída para dissipar o escoamento superficial e armazenar sedimento (caixa de contenção). O depósito de sedimento foi delimitado com estacas e contornado com barbante (perímetro). Dentro do limite do depósito várias prospecções foram realizadas com um vergalhão de ferro. Esse procedimento mostrou-se satisfatório, pois o depósito é composto por material inconsolidado, ao passo que, a base (fundo do depósito) geralmente é mais resistente à penetração da sonda. O comportamento diferenciado dos materiais resulta numa descontinuidade de resistência perceptível ao operador da sonda. Ao to-

Quadro 1 – Características das seções monitoradas

Seções mensuradas (estrada e canal fluvial)	Número de pinos	Características
Seção 1 Estrada nova	25	Início da mensuração barranco exposto, já ao final estrada revegetada por capoeira. Barranco com variação de solo entre rocha alterada. Neossolo Litólico. Presença de muitas raízes. Barranco com exposição Norte. Declividade aproximada da estrada 13°.
Seção 2 Estrada nova	15	Idem anterior.
Seção 3 Estrada nova	30	Barranco exposto no início e parcialmente protegido ao final da mensuração principalmente por gramíneas. Presença de raízes e material alterado sem presença de rochas. Cambissolo. Barranco com exposição Norte. Declividade aproximada da estrada 11°.
Seção 4 Estrada velha	25	Barranco exposto do início ao final da mensuração. Presença de raízes no topo do barranco e material alterado sem presença de rochas. Cambissolo. Barranco com exposição Oeste. Declividade aproximada da estrada 12°.
Seção 5 Estrada velha	60	Barranco exposto do início ao final da mensuração. Presença de raízes no topo do barranco e material alterado com presença de rochas alterada. Associação Neossolo Litólico com Cambissolo. Barranco com exposição Oeste. Declividade aproximada da estrada 10°.
Seção 1 Canal fluvial	32	Vegetação ciliar. Forte processo de agradação ao final da mensuração os pinos estavam totalmente soterrados. Material das margens permanentemente úmido. Sedimento grosseiro (2,0mm) misturado a material fino no fundo e nas margens do canal. Material das margens com presença de detritos orgânicos. Médio curso.
Seção 2 Canal fluvial	8	Vegetação ciliar. Forte processo corrasão. Material das margens permanentemente úmido. Margens formadas apenas rocha alterada. Leito rochoso com corredeiras. Médio curso.
Seção 3 Canal fluvial	24	Vegetação ciliar. Solo das margens permanentemente úmido, sem presença de rocha. Forte erosão na base do barranco e solapamento do topo por movimento gravitacional. Depósito de grânulos, seixos e matações no leito do canal. Baixo curso.
Seção 4 Canal fluvial	16	Vegetação ciliar. Solo das margens permanentemente úmido, sem presença de rocha. Erosão na base do barranco e pouco processo de solapamento. Depósito de grânulos, seixos e matações no leito do canal. Baixo curso.

Nota: A localização de cada seção esta indicada na figura 1.

do foram avaliadas 11 caixas resultando em 282 sondagens. Uma das caixas foi subdividida por causa de seu tamanho e forma (C11a e C11b).

Estimativa da remoção de solo em barranco de estradas e canal fluvial

A remoção de material do barranco das estradas foi realizada por meio de pinos de erosão (Quadro 1). Os pinos de erosão com 30 cm de comprimento foram cravados no barranco ficando 5 cm exposto para leitura. A mensuração foi conduzida entre 19/07/2006 a 17/07/2008 (24 meses). O monitoramento dos pinos foi realizado em intervalo variando entre três e seis meses. Da mesma forma, a erosão de margem foi mensurada com pinos de erosão. A mensuração foi conduzida entre

27/12/2005 a 17/07/2008 (31 meses). O pouco desenvolvimento de margens (barrancos), aliado a rochividade nas margens dificultou a instalação de pinos no setor de alto curso. As seções ficaram restritas no médio e baixo curso do canal (trecho aproximado de 576 m). A densidade do material utilizado para a estimativa do volume de material mobilizado pelo barranco das estradas e do rio foi de 1000 kg m³. A precipitação pluviométrica foi acompanhada mensalmente durante o monitoramento (Estação Agrometeorológica – CEDETEG, aproximadamente 12 km do local monitorado). Contudo, os dados de precipitação não foram utilizados para correlacionar taxas de remoção, apenas serviram para contextualizar a pluviosidade no período monitorado. Pois, as mensurações foram realizadas em períodos irregulares.

Análise estatística e transformações dos parâmetros

As análises aplicadas foram basicamente estatística descritiva como: média, desvio padrão e coeficiente de variação. Foi aplicada análise de variância (Teste F) apenas para comparar a produção de sedimento entre as seções instaladas no barranco das estradas nova e antiga. Pois, observações em campo levaram ao estabelecimento da hipótese de que os barrancos de estradas novas tendem a ter mais produção de sedimento. O nível de significância aplicada na análise foi de 0,05%.

Os dados registrados nas estradas e no canal fluvial foram analisados considerando a produção de sedimento total do período monitorado 24 e 31 meses respectivamente. Os dados foram transformados em perda de solo em kg m^2 em kg m (quilo por metro linear de barranco), ou seja, em taxa equivalente a extensão do barranco das estradas e do rio. A extensão das estradas estimada atingiu 4170 m na transformação dos dados foi considerada apenas uma lateral da estrada devido às características já mencionadas, além disso, os caminhos geralmente têm barrancos mais baixos. Esse procedimento procurou não superestimar a produção de sedimento dos barrancos.

No caso do canal fluvial a transformação dos dados ocorreu da mesma forma. O procedimento de estimativa foi mais complicado, pois apenas no médio para baixo curso o canal possui margens bem definidas com aproximadamente 0,8 m de altura (barrancos encaixados). Assim, a extrapolação foi feita apenas para um trecho de 576 m, apesar de a rede de drenagem ter 4400 m. Portanto, considerando-se as duas margens tem-se 1152 m. Contudo, acredita-se que este procedimento tenha superestimado a produção de sedimento das margens, já que grande parte delas não era bem desenvolvida e não havia evidência de erosão, isto é, praticamente, as margens apresentavam transição direta com as vertentes sem barranco definido.

Posteriormente os dados produzidos foram analisados juntamente com dados de outras pesquisas realizadas previamente (Thomaz & Luiz, 2004, Thomaz, 2005 e Thomaz & Antoneli, 2008). Neste momento os dados foram transformados em t/ano e convertidos proporcionalmente à área ocupada por cada uso da terra (km^2). As pesquisas supramencionadas foram realizadas nas mesmas condições geomorfológicas e ambientais da área de estudo, consequentemente, são passíveis de comparação e de servirem como parâmetros. Portanto, mesmo com dificuldade foi possível estimar a participação relativa

de cada área fonte de sedimento no âmbito da cabeceira de drenagem.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Características das estradas rurais

As estradas rurais são importantes fontes de sedimento além de serem elementos de conexão entre a vertente e o canal fluvial. As estradas quando somada à drenagem natural aumenta significativamente a densidade de drenagem na bacia. Thomaz (2005) constatou acréscimo de 38% na drenagem da bacia do Rio Guabiroba quando foi incluída a participação das estradas à drenagem natural.

A densidade de drenagem natural da bacia foi estimada em $3,94 \text{ km/km}^2$. Por outro lado, na área em estudo em 1980 as estradas e caminhos somavam em torno de 1784 m (IAP, 1980). Somando-se drenagem natural e estrada (6184 m) a densidade aumenta para $5,5 \text{ km/km}^2$, ou seja, as estradas foram responsáveis por 28,8% no incremento da densidade. Já, com informações mais recentes (Google Earth, 2006) constatou-se que a extensão das estradas e caminhos passou para 4170 m resultando numa densidade de drenagem total (natural + estrada) de $7,7 \text{ km/km}^2$. Em pouco mais de 20 anos houve aumento de 40% na densidade de drenagem total. Atualmente estima-se que as estradas sejam responsáveis pelo aumento da densidade de drenagem na ordem de 48,7%.

Além do aumento da densidade de drenagem as estradas ao serem construídas mobilizam grande quantidade de material (Tabela 1). Mesmo depois de construídas as estradas passam por manutenção que também mobiliza material e causa o aprofundamento do leito, especialmente, nos setores mais declivosos que sofrem mais erosão.

No geral as estradas possuem em torno de 4,0 m de largura (frequência 50%) dimensão maior que isso é pouco frequente (frequência 12,5%). Essa largura das estradas coincide com a largura da lâmina da máquina que é utilizada para a construção e manutenção das estradas. Já nos barrancos ocorrem maiores variações (CV 37,3%) em comparação com a largura das estradas (CV 19,7%). Isso ocorre, sobretudo, pelo processo de manutenção das estradas em locais de forte ravinamento, assim, a largura das estradas tende a se manter constante, enquanto que com o aprofundamento do leito os barrancos tende a ter sua altura aumentada.

Tabela 1 – Volume de material mobilizado na construção das estradas

Altura do barranco (m)	Largura da Estrada (m)	Volume de material removido (m ³)	Volume de material removido (t/m)
1,4	4,9	3,4	5,2
1,0	4,0	2,0	3,0
1,27	5,0	3,2	4,8
1,36	4,4	3,0	4,5
0,9	4,8	2,2	3,2
1,1	4,9	2,7	4,0
0,92	4,3	2,0	2,9
0,79	4,1	1,6	2,4
0,62	4,1	1,3	1,9
0,97	4,5	2,2	3,3
0,86	5,3	2,3	3,4
Média geral 0,69±29,9 (n 59)	4,2±0,8 (n 32)	1,5	2,2

Tabela 2 – Estimativa de volume de material estocado em caixas de contenção

Caixas avaliadas	Área da caixa de Contenção (m ²)	Média de profundidade do sedimento estocado (cm)	Desvio padrão das profundidades (cm)	Estimativa do volume de sedimento estocado (t)
C1	5,8	29,7 (n 25)	9,1	1,7
C2	35,0	48,7 (n 35)	11,4	17,0
C3	41,2	32,6 (n 47)	8,7	13,4
C4	24,0	20,2 (n 23)	6,2	4,8
C5	15,4	25,2 (n 26)	8,1	3,9
C6	3,2	18,8 (n 13)	7,1	0,6
C7	13,3	15,4 (n 21)	4,9	2,0
C8	10,7	22,5 (n 20)	11,5	2,4
C9	8,3	21,5 (n 19)	11,0	1,8
C10	9,7	33,6 (n 20)	11,3	3,3
C11A	10,5	13,8 (n 17)	5,9	1,4
C11B	26,0	46,4 (n 16)	16,5	12,1
Média geral	16,9±12,0 (n 12)	29,0 (n 282)	14,4	4,9

Em média o material mobilizado pelas estradas foi estimado em 2,2 t/m (tonelada por metro de estrada construída). A partir desse total e considerando a extensão que as estradas e caminhos ocupam na cabeceira o total de material mobilizado pode chegar a 9174 t. O material fica disposto na lateral da estrada aonde vai sendo gradativamente transportado pelo escoamento superficial. Em outros casos o material é deslocado para fora da estrada (vertente), sendo gradativamente redistribuído sobre a superfície pelo escoamento superficial. Outro aspecto importante em relação às estradas é a

área de solo exposto após sua construção. Na área de estudo estimou-se em torno de 1,75 ha de solo exposto considerando apenas o leito da estrada (4,2 m de largura x 4170 m de extensão).

As caixas de contenção são formas construídas para desviar o escoamento superficial para que ele não acumule sobre o leito da estrada e cause mais erosão. As caixas avaliadas em um trecho de 860 m de estrada acumularam 64,4 t de sedimento (Tabela 2). As caixas apresentaram área e profundidade de sedimento estocado muito variável. O sedimento estocado esta relacionado diretamente com a

área da área da caixa (r^2 0,849) e em menor grau com a profundidade das mesmas (r^2 0,698). Verificou-se que as caixas são rasas, consequentemente, quase todo o escoamento superficial e sedimento produzido nas estradas extravasam os limites da área de contenção e se deposita em outros setores de vertente ou atingem diretamente o canal fluvial.

Taxa de remoção em barranco de estradas e canal fluvial

A precipitação média histórica da área de estudo é de 1920,0 mm (1976-2007). No período monitorado o ano de 2006 foi seco com 1420,9 mm, já 2007 foi ligeiramente abaixo da média 1769,0, enquanto que o primeiro semestre de 2008 esteve um pouco acima da média histórica (1010,8 mm). O monitoramento conduzido por mais de 24 meses foi importante para abranger diferentes regimes de umidade na área de estudo.

A taxa de remoção de solo na estrada nova foi de $4,2 \pm 3,0$ cm, enquanto que na estrada antiga a taxa foi de $3,8 \pm 1,6$ cm (Tabela 3). Não houve diferença estatística significativa na taxa de remoção entre ambas ($p=0,245$). Porém, a variação na taxa de remoção foi muito mais alta na estrada nova. Isso pode indicar que os barrancos após a construção ficam mais instáveis e perdem material de forma irregular, isto é, em alguns setores de barranco pode ocorrer desmoronamento ocasionando grande mobilização de material, haja vista, ter sido registrado pino com rebaixamento de 14,5 cm, já o máximo registrado em estrada antiga foi de 8,5 cm.

Os barrancos expostos sofrem a ação de salpico e, especialmente, a constantes ciclos de umedecimento e ressecamento, causando contração do material. A expansão-contração provoca o colapso do material sob ação da gravidade. Esse processo é agravado pelo ângulo do barranco (90° ou mais). O material que se desprende do barranco fica depositado na lateral da estrada e é transportado posteriormente pelo escoamento superficial.

Ramos-Scharrón & MacDonald (2007) registraram taxa de produção de sedimento em barrancos variando entre 2,0 a 17 kg m² ano (média de 7,8 kg m² ano). As taxas registradas neste estudo variaram de 17,4 a 25,8 kg/m²/ano (média de 20 kg/m²/ano). O limite superior registrado pelos autores coincide com o limite inferior de remoção do presente estudo.

Os pinos instalados nos barrancos do canal fluvial apresentaram variação de remoção maior do que os pinos instalados nas estradas (Tabela 3). Verificou-se que os barrancos no canal fluvial per-

manecem úmidos e sofrem menos com o processo de expansão-contração. A produção de material ocorre por corrasão que desgasta a base do barranco, posteriormente ocorre o solapamento da parte superior (topo) do barranco. Os solapamentos ocorrem principalmente no baixo curso onde as margens são mais desenvolvidas e o declive do canal é baixo resultando em maior acúmulo de material para ser erodido. Por sua vez, a corrasão é mais frequente de médio para alto curso principalmente em margens formadas por rocha alterada e leito rochoso nesses locais não ocorre acúmulo de sedimento.

A produção de sedimento proveniente dos barrancos das estradas foi superior à produção dos barrancos no canal fluvial. Os pinos das estradas registraram rebaixamento médio de 2 cm/ano (13,9 kg/m/ano), contra um rebaixamento médio no canal fluvial de 0,8 cm/ano (6,5 kg/m/ano). Mesmo na seção 3 do canal fluvial que apresentava intenso solapamento não houve grande remoção quando comparado com as seções 2 e 4. As taxas de erosão de margem registrada neste ensaio não divergem de outros estudos realizados em cabeceiras de drenagem em variados ambientes (Tabela 4).

Estimativa de produção e contribuição relativa de diferentes fontes de sedimento na cabeceira de drenagem

A estimativa de perda de solo, bem como a contribuição relativa de cada área fonte de sedimento da cabeceira de drenagem podem ser observadas no Quadro 2. As perdas de solo em áreas de capoeira e florestas secundárias para a área de estudo foi estimada em 0,212 t/ha/ano (Thomaz, 2005). Em condições naturais a perda de solo varia de 0,0045 t/ha em área de relevo pouco declivoso, enquanto que em área com relevo declivoso as perdas são em torno de 0,45 t/ha (Morgan, 2005). Mackensen et al. (2003) destacam que as perdas de solos em áreas florestadas sem distúrbios variaram entre 0,03 t/ha/ano até 6,2 t/ha/ano, contudo 50% (n 27) dos estudos registraram perda de solo na ordem de até 0,3 t/ha/ano. Alguns estudos realizados no Brasil em área de floresta sob diferentes ambientes indicam as seguintes perdas de solo: 0,021 t/ha/ano (Cassetti, 1983); 0,004 t/ha/ano (Bertoni & Lombardi Neto, 1990) e 0,150 t/ha/ano (Barbosa & Fearsinde, 2000). A estimativa de perda de solo nas áreas florestadas condiz com os verificados na literatura. Apesar de ocupar 88,9% (99,1 ha) da área da bacia essas áreas contribuem com apenas 16% do total de sedimento.

Tabela 3 – Estimativa de material mobilizado nos barrancos de estradas e canal fluvial

Seções mensuradas (estrada e canal fluvial)	Média (cm)	Desvio padrão (cm)	Remoção de solo (kg m ²)	Remoção de solo (kg m)
Estrada nova Seção 1	3,5 (n 25)	2,8	34,8	24,2
Estrada nova Seção 2	3,6 (n 15)	2,0	35,5	24,7
Estrada nova Seção 3	5,2 (n 30)	3,4	51,6	35,8
Estrada antiga Seção 4	4,2 (n 25)	1,4	42,2	29,3
Estrada antiga Seção 5	3,6 (n 60)	1,6	36,0	25,0
Canal fluvial Seção 1 (soterrada)	- (n 32)	-	-	-
Canal fluvial Seção 2	2,8 (n 8)	1,3	28,0	22,4
Canal fluvial Seção 3	1,9 (n 24)	1,5	19,0	15,2
Canal fluvial Seção 4	2,0 (n 16)	2,2	20,0	16,0
Média geral estradas	4,0 (n 155)	2,3	40,0	27,8
Média geral canal fluvial	2,1 (n 48)	1,7	21,0	16,8

Nota: - (remoção não avaliada).

Tabela 4 - Resumo de resultados de taxa de erosão de margens em cabeceiras de drenagem <4,0 km²

Localização	Área da bacia de drenagem (km ²)	Taxa de erosão de margens (cm/ano)	Fonte
*Sudoeste dos E.U.A	0,13	0,6	Leopold et al. (1966)
*Clady & Crawfordsburn, Norte da Irlanda	3,4	3 - 5,4	Hill (1973)
*Birbaach, Luxemburgo	1,57	0,8	Imeson & Jungerius (1974)
St. John, Virgin Islands, E.U.A	0,14 a 3,8	0,1 – 1,5	Ramos-Scharrón & Mac-Donald (2007)
Rio Guabiroba, Cabeceira de drenagem, Guarapuava-PR	1,1	0,8	Este estudo

Nota: *Dados a partir de Lawler (1993)

Estimou-se uma perda de solo na área com agricultura de subsistência na ordem de 4,01 t/ha/ano. A área ocupada com agricultura de subsistência é muito pequena na área de estudo (1,3 ha), assim como, a proveniência de sedimento destas áreas. Contudo, nessas áreas a capoeira é roçada, queimada, cultivada e depois permanece por 3 a 5 anos em regeneração. Durante essas fases ocorre variação na perda de solo que atingem até 6,1 t/ha/ano no primeiro ano de cultivo, decaindo para 1,2 t/ha/ano de perda de solo no terceiro ano de regeneração (Thomaz, 2005).

A estimativa de perda de solo na área com agricultura mecanizada em sistema convencional foi de 1,07 t/ha/ano (Thomaz, 2007). Apesar de haver apenas uma mensuração como parâmetro, ressalta-se que as áreas com agricultura mecanizadas ocupam os setores menos declivosos (0 – 12%) da cabeceira de drenagem. Ou seja, são locais menos suscetível a erosão, além disso, o uso da terra não é intensivo. Por outro lado, Sorrenson & Montoya

(1989, p.58) destacam que a perda média de solo no estado do Paraná para agricultura em sistema convencional é de 3,3 t/ha/ano. A área ocupada com agricultura mecanizada é muito pequena (3 ha), assim como, a proveniência de sedimento dessas áreas (2,4%).

A estimativa de perda de solo na área com pastagem foi de 1,07 t/ha/ano (Thomaz, 2007). A pastagem é o segundo uso em área ocupada na cabeceira de drenagem (6 ha). Ela se estende em área com declividade variada, a despeito disso, não se observou processos erosivos lineares. Em geral as perdas de solos em pastagem são inferiores a 1,0 t/ha (Evans, 1998). No Brasil alguns dados corroboram a afirmação anterior, sendo que Casetti (1983) registrou perdas variando entre 0,06 - 0,23 t/ha e Lepsch (2002) 0,7 t/ha. No entanto, Sorrenson e Montoya (1989) registraram perdas um pouco superior 1,8 t/ha. As perdas de solo estimadas para as pastagens na área em estudos são com dizentes com as taxas registradas em outros ambientes.

Quadro 2 – Estimativa de balanço de sedimento na cabeceira de drenagem

Uso da terra	Área ocupada (km ²) e (%)	Processos	Produção de sedimento (t/ano)	Contribuição relativa (%)
1 - Capoeira e Floresta Secundária	0,991 (88,9%)	Erosão laminar.	21 (n 5)	16,8
2 - Agricultura de Subsistência	0,013 (1,2%)	Salpico e erosão laminar.	5,3 (n 7)	4,3
3- Agricultura Mecanizada	0,03 (2,7%)	Salpico, erosão laminar e ocasionalmente sulcos.	3,2 (n 1)	2,6
4- Pastagem	0,06 (5,4%)	Erosão laminar, terracetes e ravinamentos.	6,3 (n 2)	5,0
5 - Área Degradada (solo exposto)	0,003 (0,2%)	Salpico, erosão laminar, ravinas e desmoronamento.	23,4 (n 3)	18,8
Barranco de Canal Fluvial	Não estimado	Colapso devido à erosão da base do barranco e corrosão aumentada pela carga sedimentar.	7,5	6,0
Barranco de Estrada	0,018 (1,6%)	Salpico e colapso de barranco devido à contração e expansão de material (ciclo de umedecimento). No leito formação de ravinas.	57,9	46,5
Total	1,115 (100,0%)		124,6	100,0

Tabela 5 - Taxa de perda de solo registrada em leito de estradas não pavimentadas

Localização	Observação	Taxa de erosão (kg/m ²)	Fonte
Washington, E. U. A	Segmento de estrada	0,65 – 2,75	Bilby et al. (1989)
Austrália	Segmento de estrada com superfície de terra	2,6 – 3,9	Haydon et al. (1991)
St. John, Virgin Islands, E.U.A	Parcelas	0,9 - 15	MacDonald et al. (2001)
St. John, Virgin Islands, E.U.A	Segmento de Estrada	0,1 - 7,4	MacDonald et al. (2001)
Victoria, Austrália	Segmento de estrada com cascalho	0,32 – 1,37	Sheridan & Noske (2007)
Victoria, Austrália	Segmento de estrada com superfície de terra	0,91 – 3,74	Sheridan & Noske (2007)
St. John, Virgin Islands, E.U.A	Segmento de estrada abandonado	1,2	Ramos-Scharrón & MacDonald (2007)
St. John, Virgin Islands, E.U.A	Segmento de estrada com 2% de declive nivelado anualmente	5,7	Ramos-Scharrón & MacDonald (2007)
St. John, Virgin Islands, E.U.A	Segmento de estrada com 21% de declive nivelado anualmente	58,0	Ramos-Scharrón & MacDonald (2007)

As áreas degradadas são importantes áreas fontes de sedimentos. Na área de estudo foi estimada uma perda de solo da ordem de 78 t/ha (Thomaz & Luiz, 2004, Thomaz & Antoneli, 2008). A área degradada mesmo sendo reduzida (0,2%) pode produzir sedimento superior ao total registrado nas áreas florestadas (Quadro 2). Estudos utilizando

diferentes técnicas de mensuração indicaram perda de solo em área degradada em Guarapuava variando de 36,07 t/ha/ano (Thomaz, 2007) a 235,60 t/ha/ano (Thomaz & Luiz, 2004). Estudos realizados no Brasil em parcelas com solo descoberto em Londrina-PR registraram perdas de 90,5 t/ha/ano (Rufino & Biscaia, 2000), de modo semelhante aos



Figura 2 – a) Dinâmica de produção de sedimento em barranco de estrada; b) Dinâmica erosiva no leito de estrada, indicando presença de material grosseiro isolados por transporte seletivo

registrados em Alagoinha-PB, por Silva et al. (1986) (93,80 t/ha/ano). Essas perdas de solos são próximas às taxas verificadas nas áreas degradadas na região de Guarapuava.

Os dados acerca da produção de sedimento no barranco do canal fluvial e das estradas já foram discutidos anteriormente. Contudo, cabe ressaltar a dinâmica erosiva de estradas não pavimentadas, pois, nesses locais a produção de sedimento não é proveniente apenas dos barrancos laterais, mas também do leito da estrada (Tabela 5). Assim, os dados referentes à contribuição de sedimento proveniente das estradas podem ser considerados como sendo superior ao apresentado por este estudo (Quadro 2).

Grosso modo, somando-se o limite inferior e superior de perda de solo dos estudos apresentados na tabela 5 (excetuando-se as estradas recém niveladas) obtém-se uma taxa média de $3,14 \text{ kg/m}^2$ (n 13). Este valor representa apenas 15,7% das taxas registradas neste estudo para perda de solo nos barrancos das estradas que variaram de 17,4 a $25,8 \text{ kg/m}^2/\text{ano}$ (média de $20 \text{ kg/m}^2/\text{ano}$). Corroborando a importância de proveniência de sedimento de barranco de estradas não pavimentadas, Martinez-Zavala et al. (2008), constataram por meio de chuva simulada que a perda de solo no leito de estrada foi de $21,15 \text{ g/m}^2$, em contrapartida, os resultados de simulação realizadas em barrancos tiveram perdas de $105,54 \text{ g/m}^2$. A perda de solo em barranco foi cinco vezes maior do que a realizada no leito da estrada.

A dinâmica de produção de sedimento mostrou-se muito variável, pois as estradas recentemente niveladas ou restauradas (Tabela 5) registram alta produção de sedimento. Além disso, a taxa de perda de solo foi influenciada pela declividade das estradas. Por outro lado, houve menores perdas de solos nas estradas abandonadas ($1,2 \text{ kg/m}^2$) (Ramos-Scharrón & MacDonald, 2007).

A erosão em estradas rurais não pavimentadas na área de estudo pode ser resumida como resultante de processos operantes em dois domínios: a) produção de sedimento nos barrancos; e b) produção de sedimento no leito da estrada (Figura 2.a e 2.b). Contudo, na erosão do leito das estradas ocorre o transporte de sedimentos finos. À medida que essa carga é lavada permanece sobre a superfície materiais grosseiros (grânulos, seixos e matacões). Disso resulta, a tendência de menores perdas de solo em estradas abandonadas ou velhas (previamente erodidas). Mesmo, havendo redução de material disponível sobre o leito da estrada, os barrancos tendem a fornecer sedimentos finos que dispostos sobre a superfície da estrada são facilmente transportados (Figura 2.a).

A partir das considerações anteriores estima-se que na cabeceira de drenagem a proveniência de sedimento das estradas pode ser muito superior ao estimado. Considerando apenas a área degradada devido ao empréstimo de cascalho para pavimentação das estradas e a perda de solos provenientes dos barrancos tem-se uma participação relativa de 65,3% do total de sedimento. Além disso, não foram considerados os sedimentos disponíveis devido à constru-

ção das estradas. Sheridan & Noske (2007) destacam estudos em áreas florestadas na Austrália onde as estradas não pavimentadas contribuíram entre 18 a 39% do total de sedimento. Já, em bacias rurais na Inglaterra a taxa de contribuição girou em torno de 30%.

CONCLUSÕES

- 1) As estradas rurais não pavimentadas são as principais fontes de sedimentos na área de estudo (46,5%). Não houve diferenças estatísticas significantes entre a perda de solo de barrancos em estradas novas e antigas. Mesmo que grande parte do material fino tenha sido removido do leito das estradas (lavagem) os barrancos laterais continuam fornecendo sedimento, que dispostos sobre o leito das estradas são facilmente transportados.
- 2) A proveniência de sedimento de margens do canal fluvial foi muito menor em comparação com os barrancos de estradas. As demais áreas fontes como: pastagem, agricultura de subsistência e agricultura mecanizada por serem áreas pequenas apresentaram pouca contribuição relativa. De modo contrário, as áreas florestadas tendem a contribuir significativamente com proveniência de sedimento (16%), contudo, isso se deve a área ocupada por esse uso na bacia (88,9%) do que pela taxa de perda de solo.
- 3) As estradas rurais aumentaram a densidade de drenagem da cabeceira de drenagem em 48,7%. Aliás, as estradas configuram-se como principal elemento de conexão entre as vertentes e o canal fluvial, por conseguinte, aumentam a entrada de sedimento nos rios. Portanto, elas devem ser consideradas nos estudos de conservação de solos e água no âmbito das bacias hidrográficas rurais.
- 4) As medidas atuais de controle de sedimento nas estradas rurais em relevo dissecado não tem sido suficientes para evitar a transferência de sedimento das vertentes para o canal fluvial.
- 5) A caracterização de áreas fontes e avaliação de proveniência relativa de sedimento em cabeceira de drenagem compreendem uma perspectiva de balanço de sedimento que busca ultrapassar a análise pontual do processo erosivo.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Paraná e ao CNPq, pela concessão de bolsa durante a pesquisa e ao agricultor Joel Araújo Silvério pelo apoio no monitoramento em campo.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, R. I. & FEARSINDE, P. M. Erosão do solo na Amazônia: estudo de caso na região do Apiaú, Roraima, Brasil. *Acta Amazônica*, n. 30 (4), p. 601-613, 2000.
- BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. São Paulo: Ícone, 1990, 355p.
- BILBY, R.E; SULLIVAN, K.; DUNCAN, S.H. The generation and fate of road surface sediment in forested watersheds in southwestern Washington. *Forest Science*, n. 3(2), p. 453-468, 1989.
- CASSETI, V. Algumas considerações a respeito dos fenômenos pluvio-erosivos em Goiânia – Goiás. *Boletim Goiano de Geografia*, n.3, p. 161-180, 1983.
- EMATER/ACARPA. Manejo integrado de solo e água e o programa de manejo integrado dos solos do Paraná. Emater-PR, 1985. 12p.
- EVANS, R. The erosional impacts of grazing animals. *Progress in Physical Geography*, n. 22 (2), p. 251- 268, 1998.
- FREITAS, P. L.; KER, J. C. As pesquisas em microbacias hidrográficas: situação atual, entraves e perspectivas no Brasil. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO E E-CONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DE SOLO. Londrina, 1990.
- GOOGLE EARTH. Imagem de Guarapuava, 16 de maio de 2006. Acessado em agosto de 2008.
- GRIEBELER, N. P., PRUSKI, F. F. MEHL, H. U. SILVA, D. D. & OLIVEIRA, L. F. C. Equipamento para determinação da erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento do solo em canais de estradas. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.*, Campina Grande, v.9, n.2, p.166-170, 2005.
- HILL, A. R. Erosion of river banks composed of glacial till near Belfast, Northern Ireland. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, n. 17, p. 428-442, 1973.
- HAYDON, S.R.; JAYASURIYA, M.D.A.; O'SHAUGHNESSY, P.J. The effect of vehicle use and road maintenance on erosion from unsealed roads. In forests: the Road 11 experiment. Report n. MMBW-W-0018, Melbourne Water, 1991.

- IAP. Instituto Ambiental do Paraná. Fotografias aéreas, escala 1:25000, 1980.
- IMESON, A. C.; JUNGRIUS, P. D. Landscape stability in the Luxembourg Ardenes as exemplified by hydrological and (micro) pedological investigations of a catena in an experimental watershed. *Catena*, n. 1, p. 273-295, 1974.
- LAWLER, D. M. Advances in the continuous monitoring of erosion and deposition dynamics: Developments and applications of the New PEEP-3 T system. *Geomorphology*, v. 93, p. 17-39, 2008.
- LEPSCH, I. F. Formação e conservação dos solos. São Paulo: Oficina de Textos. 2002, 178p.
- LEOPOLD, L. B.; EMMET, W. W.; MYRICK, R. H. Channel and hillslope processes in a semi arid area, New Mexico, U. S. Geological Survey Professional Paper, 352-G. 1966.
- LUCE, C. H.; WEPLER, B.C. Introduction to special issue on hydrologic and geomorphic of forest roads. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 26, p.111-113, 2001.
- MACDONALD, L. H.; SAMPSON, R. W.; ANDERSON, D. M. Runoff and road erosion at the plot and road segment scales, St. John, US Virgin Islands. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 26, p. 251 – 272, 2001.
- MACKENSEN, J., KLINGE, R., RUHIYAT, D., FÖLSTER, H. Assessment of management-dependent nutrient losses in tropical industrial tree plantations. *Ambio*, v. 32, n. 2, p. 106-112, 2003.
- MARTÍNEZ-ZAVALA, L.; LÓPEZ, A. J.; BELLINFANTE, N. Seasonal variability of runoff and soil loss on forest road backslopes under simulated rainfall. *Catena*, n. 74, p.73-79, 2008.
- MARTINS, S. G., SILVA, M. L. N., CURI, N., FERREIRA, M. M., FONSECA, S., MARQUES, J. J. G. S. M. Perdas de solo e água por erosão hídrica em sistemas florestais na região de Aracruz (ES). *R. Bras. Ci. Solo*, n. 27, p. 395-403. 2003.
- MENDES, W., CASTRO, A. F. Limitações do uso dos solos do Estado do Paraná por suscetibilidade à erosão. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS, 1984.
- MORGAN, R.P.C. Soil Erosion and Conservation. Blackwell, Oxford, 2005. 304p.
- RAMOS-SCHARRÓN, C. E. & MACDONALD, L. H. Measurement and prediction of natural and anthropogenic sediment sources, St. John, U.S. Virgin Islands. *Catena*, n. 71, p. 250-266, 2007.
- RUFINO, R. L. & BISCAIA, R. C. M. Relatório Final do Projeto. Avaliação da Erosão do Solo – PSA – Programa Manejo de Solo e Água. Atividade de Pesquisa. Estudo da Erodibilidade do Solo Latossolo Roxo Distrófico no Período de 1976 – 1999. Londrina: IAPAR-PR, 2000.
- SHERIDAN, G.J. & NOSKE, P. J. A quantitative study of sediment delivery and stream pollution from different forest road types. *Hydrological Processes*, n. 21, p. 387–398, 2007.
- SILVA, I. F., ANDRADE, A. P., CAMPOS FILHO, O. R., OLIVEIRA, F. A. P. Efeito de diferentes coberturas vegetais e de práticas conservacionistas no controle da erosão. *R. Bras. Ci. Solo*, n. 10, p. 289-292. 1986.
- SLAYMAKER, O. A pluralist, problem-focused geomorphology. in: STODDART, D. R. (editor). *Process and form in geomorphology*. New York: Routledge, 1997. Cap. 15, p. 328-339.
- SORRENSON, W. J. & MONTOYA, L. J. Implicações econômicas da erosão do solo e do uso de algumas práticas conservacionistas no Paraná. *Boletim técnico* n. 21. Londrina, IAPAR. 1989, 110p.
- THOMAZ E. L. & ANTONELLI, V. Erosão e degradação do solo em área cultivada com erva-mate (*Ilex paraguariensis*), Guarapuava-PR. *Geociências (São Paulo)* v.27, p. 21-31. 2008.
- THOMAZ, E. L. & DIAS, W. A. Bioerosão – evolução do rebanho bovino brasileiro e implicações nos processos geomorfológicos. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 10, p. 3-11, 2009.
- THOMAZ, E. L. & LUIZ, J. C. Mensuração de remoção do solo entre ravinas por meio de técnica dinâmica e volumétrica. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA E I ENCONTRO SUL-AMERICANO DE GEOMORFOLOGIA, 5, Santa Maria, agosto de 2004. *Geomorfologia e Riscos Ambientais, Anais de Trabalhos Completos*. Santa Maria: UFSM, 2004, 1-14p.
- THOMAZ, E. L. & VESTENA, L. R. Aspectos Climáticos de Guarapuava - PR. Guarapuava: Editora UNICENTRO, 2003, 106p.
- THOMAZ, E. L. Processo hidrológico superficial e uso da terra em Guarapuava-PR: mensurações em parcelas pequenas. *Geografia (Rio Claro)*, 32: 89-106, 2007.
- _____. Processos hidrogeomorfológicos e o uso da terra em ambiente subtropical – Guarapuava – PR. São Paulo, 2005, 297 f. Tese (Doutorado em Ciência, área Geografia Física) – Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.
- _____. Análise empírica da fragilidade potencial da bacia do Rio Iratim, Guarapuava-PR. São Paulo. 188 f. Dissertação (Mestrado em Ciências, área Geografia Física) – Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 2000.
- _____. Caracterização hidroclimática da bacia do Rio das Pedras. Convênio Fundo Azul II – Sanepar/Unicentro. Guarapuava: UNICENTRO, 2003, 37 p. Relatório Técnico-Científico.

Estimated Provenance of Sediment in the Headwaters with a Very High Density of Unpaved Agricultural Roads

ABSTRACT

In Geomorphology it is essential to understand sediment production and transfer from hillslopes to valley bottoms and river channels.. The aims of this study were: to verify sediment production by unpaved roads and riverbanks; to re-evaluate previous studies in order to distinguish sediment provenance in different land uses, and also to estimate a headwater sediment budget focusing on the contribution of unpaved agricultural roads. The methodology consisted of mapping for the identification of sediment source areas; systematic field observations and volumetric monitoring technique (erosion pin). It was concluded that the unpaved agricultural roads were the main sources of sediment in the study area (46.5%), although they represent only 1.6% of the occupied area. The agricultural roads increased the headwater drainage density by 48.7%. The unpaved roads are a link between the sediment sources and the river channel, enhancing sediment delivery into rivers.

Keywords: *headwaters, sediment source, provenance, land use, unpaved road*