

RAVINAS: PROCESSO DE FORMAÇÃO E DESENVOLVIMENTO

Antonio José Teixeira Guerra - Prof. Adjunto
LAGESOLOS - Laboratório de Geomorfologia Experimental e Erosão dos Solos
Departamento de Geografia - Instituto de Geociências - UFRJ
Pesquisador do CNPq-

ABSTRACT

The present paper concerns rill initiation and evolution, taking into account its role on the erosion process. Therefore, several aspects of the process are developed, such as: the process itself, evidences of the process, through field and laboratory experiments, the importance of the models, the consequences to agricultural soils and the conectivity with other soil erosion processes.

RESUMO

O presente artigo refere-se à formação e ao desenvolvimento de ravinhas, levando em conta seu papel no processo erosivo. Dessa forma, vários aspectos do processo são desenvolvidos, tais como: o processo em si; evidências desse processo, através de experimentos de campo e de laboratório; a importância dos modelos; as consequências para os solos agrícolas; e a conexão com outros processos erosivos.

1. INTRODUÇÃO

Esse trabalho foi desenvolvido na Universidade de Oxford, durante os três primeiros meses do meu Pós-Doutorado, após ter realizado uma busca intensa na Biblioteca da School of Geography, onde vários periódicos foram consultados, sobre o tema *rill initiation*, aqui traduzido por geração de ravinhas. Trata-se de um tema bastante controverso, como o presente artigo procura demonstrar, e sobre o qual até hoje, os pesquisadores ainda buscam um melhor entendimento. No presente caso, essa pesquisa bibliográfica deve-se à necessidade de embasar teoricamente o projeto desenvolvido por mim na Environmental Change Unit, no sentido de verticalizar os conhecimentos sobre *rill initiation*, usando simulador de chuvas e fotogrametria, através de pares de fotos tiradas antes e após a simulação de chuvas, de uma parcela submetida a esse experimento, no campo. Nesse sentido, os resultados desses experimentos serão apresentados em um outro trabalho, numa próxima edição do Anuário.

Para atingir os objetivos aqui propostos, artigos sobre esse tema foram consultados, desde os trabalhos mais antigos de Horton (1945), até os mais recentes de Poesen (1983), Dunne e Aubry (1986), Bryan (1987 e 1990), Abrahams *et al.* (1992), Evans (1992 e 1993),

Dietrich e Dunne (1993), Bergsma, *et al.* (1996), Favis-Mortlock (1996), para citar apenas alguns. No entanto, é bom salientar que não têm sido produzidos tantos trabalhos sobre *rill initiation*, nos últimos anos. Bryan (1987) enfatiza que enquanto pouca atenção tem sido dada aos estudos de erosão por ravinas, muito mais ênfase tem sido dada ao papel da erosão inter-ravinas. Esse quadro não mudou muito ao longo dos dez anos decorridos do trabalho de Bryan. Mesmo assim, levando em conta os artigos selecionados, sendo alguns deles considerados clássicos, foi possível estruturar o presente artigo, considerando a formação das ravinas em si, como é observada e mensurada a sua evolução, no campo e no laboratório, algumas consequências para os solos agrícolas, qual a importância dos modelos e quais as conexões com outros processos erosivos. Através dessa sequência, espera-se estar contribuindo para avançar no entedimento desse processo, que pode ser observado em várias escalas temporais e espaciais.

2. A FORMAÇÃO DE RAVINAS

Um pouco das contradições que existem a respeito do termo ravina e suas implicações no significado geomorfológico refletem a ampla gama de características às quais o termo tem sido aplicado por diversos pesquisadores. Segundo Bryan (1987), a maior parte das pesquisas iniciais desenvolvidas sobre ravinas tinham objetivos agrícolas e, segundo a definição da FAO (1965), o termo enfatiza aplicações agrícolas, pois considera ravinas como micro-canais, que são tão pequenos, a ponto de serem removidos por operações de aragem do solo. De acordo com Bryan (1987), esta definição explica a falta de interesse em relação ao processo de formação das ravinas, porque não chega a ser tão importante na agricultura, mas ao mesmo tempo, desvia a atenção do desenvolvimento das ravinas em áreas que não são perturbadas pela aragem do solo, ou seja, onde ravinas mais permanentes podem evoluir, sendo de grande importância geomorfológica.

O primeiro pesquisador a reconhecer a importância geomorfológica das ravinas nas encostas foi Horton (1945), na medida em que chamava atenção do seu papel como condutores de água e sedimento e, ao mesmo tempo, como embriões de um sistema de drenagem, através do recuo do sistema de ravinas e micro-pirataria, que é o processo onde algumas ravinas capturam água de outras ravinas. O conceito de evolução de ravinas, segundo

Horton (1945), baseia-se no fato de que quando a precipitação excede a capacidade de infiltração do solo, se dá o início do *runoff*. A água acumula-se em depressões (microtopografia) na superfície do solo, até que começa a descer a encosta, através de um lençol (*sheetflow*), que pode evoluir para ravina. A remoção inicial de partículas é atribuída por Horton (1945) à força de cisalhamento exercida pelo *runoff*, à medida que este aumenta gradativamente em profundidade, encosta abaixo. É a partir daí que Horton (1945) propõe o conceito de *belt of no erosion* (área sem erosão), ou seja, próximo ao topo da encosta (divisor) a força de cisalhamento imposta pelo fluxo laminar (*sheetflow*) não é suficiente para remover partículas, mas, à medida que esse fluxo de água aumenta e acelera encosta abaixo, ocorre o cisalhamento das partículas de solo e, finalmente, a erosão começa a ocorrer a partir de uma distância crítica. Ou seja, começa a ocorrer uma incisão no solo, onde o fluxo de água tende a se concentrar, formando as ravinas. Mas as ravinas também podem se formar próximo à base das encostas, onde uma pequena incisão pode recuar em direção ao topo da encosta. Segundo Morgan (1986), esta incisão pode estar associada à saturação causada pelo escoamento superficial, em vez de estar relacionada ao fluxo hortoniano. As ravinas podem aumentar em comprimento, largura e profundidade, podendo evoluir para voçorocas, ou então para uma rede de canais conectados, pelo recuo das encostas, formando um sistema de drenagem.

Quanto aos limites em termos de profundidade de uma ravina, o assunto também é bastante controverso, podendo-se encontrar uma série de limites. Bergsma *et al.* (1996) consideram que a remoção de solo, através do escoamento superficial concentrado em vários canais rasos, que denominam de ravinas, deve atingir no máximo 20 cm e serem facilmente obliterados pela aragem do solo. Mas, no mesmo livro, Bergsma *et al.* (1996) também propõem que a erosão em canais com profundidades até 30 cm podem ser consideradas ravinas. Enfim, talvez uma classificação que leve em conta o fato de as ravinas poderem ser obliteradas pela aragem do solo, ou então, que não são características erosivas tão permanentes na paisagem, podendo mudar sua posição a cada ano, seja também aceita. Além disso, as ravinas podem evoluir para voçorocas, em especial quando não são obliteradas pelas práticas agrícolas, ou quando chuvas concentradas caem sobre encostas com ravinas, sem proteção vegetal e que estejam sob superpastoreio. O alargamento e aprofundamento dessas ravinas

pode dar origem a voçorocas, devido à ação erosiva das águas na base e nas partes laterais das ravinas (Guerra, 1995; Guerra e Botelho, 1996).

Em virtude dos fatos analisados acima, o início da formação de ravinas pode ser considerado como crucial no processo erosivo, que pode estar associado a um rápido aumento na concentração de sedimentos contidos no escoamento superficial. Por isso, o desenvolvimento de ravinas adquire uma grande importância prática e aplicada na conservação dos solos. Segundo Foster (1988), a não distinção entre processos erosivos causados por ravinas e inter-ravinas pode explicar a pouca capacidade de prever erosão de alguns modelos, como é o caso da Equação Universal de Perda de Solo.

3. EVIDÊNCIAS DA EVOLUÇÃO DAS RAVINAS

O estudo das ravinas e da sua evolução assume papel relevante na compreensão do relevo terrestre, pois é a partir dessas micro-formas que grande parte do relevo se desenvolve. Segundo Dietrich e Dunne (1993), a paisagem fluvial, como um todo, é controlada pela densidade e pela estrutura da rede de canais, que drena água e sedimentos no terreno. As cabeceiras dessa rede localizam-se de dezenas a centenas de metros, a partir do divisor da rede drenagem (Dietrich e Dunne, 1993). Dessa forma, a escala detalhada da topografia de muitas encostas é dominada por uma rede de vales não canalizados (*unchanneled valleys*), que drenam diretamente para a rede de canais, isto é, a partir das cabeceiras ou da área fonte da bacia, como destacam Dietrich e Dunne (1993). Apesar desses dois autores não mencionarem o termo ravina (*rill*), na parte inicial do seu trabalho, parte dessa rede de drenagem, em especial aquela localizada mais próxima aos divisores, pode ser composta por ravinas, que evoluem a ponto de se transformarem em canais.

Além dessas considerações teóricas sobre o tema, é importante que experimentos de campo, de laboratório e modelos sejam criados, no sentido de compreender a formação e o desenvolvimento das ravinas, bem como no sentido de poder prever a evolução de uma determinada paisagem, a partir da evolução das ravinas, da rede de canais e da conexão existente entre essas diversas formas erosivas, que estão presentes em quase toda a superfície terrestre. Dessa forma, a literatura consultada procura destacar, através de alguns exemplos, como esses objetivos podem ser alcançados.

3.1. Experimentos de campo

Para melhor compreender os processos da água que escoar superficialmente e que se canaliza formando ravinas, que podem evoluir, no sentido de criar uma verdadeira rede de drenagem, diversos experimentos de campo têm sido desenvolvidos. A maioria dos pesquisadores têm, de forma variada, utilizado simuladores de chuva para conseguir obter os resultados referentes a tais processos e, com isso, avançar no entendimento da formação de ravinas. Trabalhos de De Ploey (1983), Bowyer-Bower e Bryan (1986), Dunne e Aubry (1986), Fujiwara *et al.* (1990) e Abrahams *et al.* (1992), são alguns exemplos de pesquisas que procuram seguir essa linha.

De Ploey (1983), por exemplo, procura compreender a geração de *runoff* e a formação de ravinas, em solos arenosos e francos, levando em conta uma revisão da literatura bem detalhada, a partir de pesquisas desenvolvidas em vários países. O referido autor conclui que existem certos limites que devem ser considerados, em relação à formação de ravinas. Um deles é que para que ocorram ravinas é preciso que haja uma declividade de pelo menos 2° ou 3°. A esse limite são acrescentados também fatores relacionados às características hidráulicas do fluxo. De Ploey (1983) também chama atenção da importância sobre *splash*, no sentido de induzir uma poro-pressão positiva no topo do solo, aumentando a formação de poças (*ponds*) e, conseqüentemente, a geração de *runoff*. A partir daí, ocorre uma liquefação, porque a resistência ao cisalhamento é zero, nessas circunstâncias, em especial nos solos arenosos.

Bowyer-Bower e Bryan (1986) utilizaram um simulador de chuvas para comparar a formação e evolução das ravinas, no Canadá, em solos argilosos e arenosos. Após vários experimentos, observaram que nos solos argilosos, as ravinas tendiam a ser mais largas e menos profundas. Além disso, tendem a se formar à uma distância maior, a partir do divisor. Enquanto nos solos arenosos, as ravinas tendem a apresentar uma rede mais densa, sendo mais profundas e com menor largura. Mas o que esses dois autores concordam com o trabalho de De Ploey (1983) é a importância no processo de formação de ravinas, ou seja, é fundamental que haja uma certa concentração do fluxo de água e que certos limites sejam rompidos, em termos de condições hidráulicas.

Experimentos de campo, utilizando simulador de chuvas, foram desenvolvidos por Dunne e Aubry (1986), em encostas com vegetação de savana, no Kenia, com o objetivo de

obterem informações sobre a importância das condições hidráulicas do escoamento superficial e do transporte de sedimentos, relativos à geração e evolução de ravinas. Os autores conduziram esses experimentos, objetivando construir um modelo simples, bi-dimensional do fluxo de água e sedimentos, numa encosta com microtopografia natural que pudesse compreender o padrão espacial da erosão. Segundo Dunne e Aubry (1986), o modelo reproduziu as previsões de Horton (1945), ou seja, de que em encostas suficientemente íngremes, o escoamento em lençol pode tornar-se instável e criar uma rede densa de ravinas. Os resultados obtidos, dessa forma, sustentam a teoria de que tanto a geração de ravinas, como a sua manutenção, dependem de um balanço entre o transporte de sedimentos pelo fluxo de água, o qual tende a causar a incisão de ravinas, e a ação do *splash*, que tende a transportar os sedimentos das partes mais elevadas em direção às ravinas, podendo causar um certo nivelamento da microtopografia existente.

Outros autores também interessados no desenvolvimento de ravinas são Fujiwara *et al.* (1990), que utilizaram um simulador de chuvas no campo, para analisar a evolução desse processo erosivo. Segundo os autores, o estudo da erosão por ravinas não tem sido muito desenvolvido. Em função disso, pouco tem se avançado na compreensão do desenvolvimento das ravinas e também na rápida evolução com o tempo, em relação ao seu padrão evolutivo, que segundo os autores é bastante complexo. Os resultados obtidos por Fujiwara *et al.* (1990) concordam com outras pesquisas sobre esse tema, pois a partir da simulação de chuvas, puderam observar que conforme a capacidade de infiltração do solo diminuía, aumentava a formação de poças. À medida que essas poças começam a romper e a ligarem-se umas às outras, começa o escoamento superficial que, eventualmente, passa a criar pequenos canais (ravinas). Esses pequenos canais tendem, com a continuação do experimento a migrarem ou a ocorrer alguma micro-pirataria, ou micro-captura (*micropiracy*), ou seja, quando uma ravina consegue capturar uma outra ravina. Além disso, alguns desses micro-canais podem ser quase que completamente “soterrados”, durante um experimento. Fujiwara *et al.* (1990) também chegaram a uma conclusão que outros pesquisadores já haviam chegado anteriormente, ou seja, de que o tempo para geração de ravinas depende, em parte, da intensidade da chuva.

Abrahams *et al.* (1992) conduziram experimentos de campo em regiões semi-áridas, no sul do Arizona, nos Estados Unidos. Em áreas de clima semi-árido, todo o *runoff* ocorre sob a forma de *overland flow*, o qual é gerado, quando a intensidade da chuva excede a capacidade

de infiltração do solo (Abrahams *et al.*, 1992). Esse fluxo de escoamento superficial pode ser dividido em fluxo que corre nas ravinas (*rill flow*) e fluxo que corre nas inter-ravinas (*interrill flow*). Infelizmente, nesse trabalho, os autores dedicaram-se apenas a analisar o fluxo sobre as inter-ravinas, confirmando a escassez de trabalhos que se dediquem ao fluxo que corre dentro das ravinas. Os autores observaram que o fluxo entre ravinas aparece geralmente como um lençol de água, que pode convergir ou se dispersar, ao redor de protuberâncias no solo, rocha ou vegetação. Os autores, nesse caso, investigaram o que talvez possa ser considerado como um estágio pré-formador de ravinas, onde o fluxo de água ainda não está concentrado e não está formando incisões na superfície do solo.

3.2. Experimentos de laboratório

Os experimentos conduzidos em laboratório, se por um lado, lidam com condições “artificiais”, pois é praticamente impossível reconstruir as condições naturais do campo, por outro lado, permitem ser replicados e fazer comparações com mais facilidade, além de ser possível também melhor controlar os diversos cenários e as várias condições criadas num laboratório. O levantamento da bibliografia pertinente a esse tema aponta para uma gama variada de experimentos, mas a maioria procura entender como as ravinas se formam, como evoluem e quais os fatores que controlam esse comportamento.

A propósito disso, Merritt (1984) consegue identificar quatro estágios no processo de formação de ravinas, através de simulação de chuva, em laboratório. O primeiro estágio é denominado de fluxo em lençol (*sheetflow*), o segundo de desenvolvimento de fluxo linear (*flowline*), o terceiro de micro-ravinas (*microrills*) e o quarto de micro-ravinas, com cabeceiras (*headcuts*). Segundo Merritt (1984), existem grandes diferenças, em termos de características dos fluxos, entre cada um dos estágios observados, em especial entre o fluxo em lençol e o desenvolvimento do fluxo linear. Esse método pode indicar que é possível fazer distinções mais precisas entre a erosão por ravinas e inter-ravinas. Merritt (1984) enfatiza que o segundo estágio poderia também ser denominado de proto-canais (*protochannels*), descrito em outros estudos (Moss *et al.*, 1982). Além disso, o autor destaca que cada um desses quatro estágios possui características hidráulicas bem distintas.

Um outro experimento de laboratório foi desenvolvido por Rauws (1987), em um flume com dois metros de comprimento e 40 centímetros de largura. Dessa vez não foi

simulada chuva, mas apenas a água foi colocada na parte superior do flume. O gradiente do flume variou de 1,5° a 8°. Nesse experimento, o autor registrou tudo em vídeo. Os resultados apontaram para a formação de ravinas, quando o gradiente do flume era maior do que 2 a 3°, concordando com outros trabalhos consultados. As ravinas, nesse experimento, formaram-se quando a velocidade do fluxo de água era maior que 3,2 a 3,4 cm/s e cabeceiras (*headcuts*) também foram registradas durante a evolução do processo de ravinamento, como nos experimentos desenvolvidos por Merritt (1984).

Rauws e Govers (1988), em um artigo baseado em dados obtidos da literatura existente sobre experimentos de laboratório para investigar a formação de ravinas, procuram observar os aspectos hidráulicos e da mecânica dos solos, nesse processo erosivo. Os autores analisam as relações existentes entre a capacidade de remoção de partículas por *splash* e as características hidráulicas do fluxo. Eles chegam a conclusão de que os impactos das gotas de chuva não parecem ser tão importantes na geração de ravinas, em especial, em materiais mais coesos. Segundo Rauws e Govers (1988), o processo de incisão de ravinas começa assim que as forças hidráulicas conseguem superar um limite de resistência dos materiais do topo do solo.

Um outro trabalho interessante foi desenvolvido por Bryan (1990), utilizando um simulador de chuvas no laboratório, com um flume de 15 metros de comprimento e intensidade de chuvas que variaram entre 22 e 27 mm/h. O autor fez diversas variações, em termos de declividade do flume e de intensidade das chuvas, mas em todos os casos houve formação de ravinas, com cabeceiras e concentração de fluxo de água em micro-ravinas, que rapidamente se formaram. Bryan (1990) estava preocupado em estudar a evolução dessas cabeceiras, que o autor chama de *knickpoints*, que não deixam de ser pontos de ruptura. Bryan (1990) conclui, através desses experimentos de laboratório, que esses *knickpoints*, uma vez formados, têm uma evolução complexa e variada, que inclui o rápido desenvolvimento de uma série de outros *knickpoints* e de bifurcações, tudo isso relacionado à deposição localizada de sedimentos dentro dos canais, que nesse caso seriam as ravinas.

Utilizando um flume de 20 metros de comprimento, Govers *et al.* (1990) conduziram experimentos para avaliar a variação da resistência ao *runoff* nos solos francos. Os resultados obtidos pelos autores sugerem que esses tipos de solos são bastante sensíveis a variações no estágio inicial de umidade do solo, e também, a densidade aparente. A menor resistência à erosão por *runoff* dos solos secos, ao início do experimento, deve-se às mudanças estruturais

que acontecem logo após o molhamento, ou seja, a ocorrência tanto de *slaking* como de micro-fissuras causam um decréscimo considerável da resistência ao cisalhamento do solo e, conseqüentemente, o *runoff* se inicia com maior facilidade. Com o objetivo de evitar o efeito da erosão nas inter-ravinas (*interrills*), Govers *et al.* (1990) cobriram essas superfícies com plástico, para que fosse assegurado o estudo da descarga total das ravinas, sem esse efeito. Os autores destacam ainda que, no caso das argilas ilitas e montmorinolitas, a resistência ao *runoff* aumentou, à medida que a umidade inicial do solo era maior, mas no caso das caolinitas houve um decréscimo da resistência ao *runoff*. Os autores, no entanto, não explicam o porque dessa diferença.

Slattery e Bryan (1992) estudaram as condições hidráulicas para a formação de ravinas, utilizando-se de um simulador de chuvas, no laboratório. As intensidades da chuva variaram entre 30 a 35 mm/h, utilizando um tipo de solo com grande disposição para o desenvolvimento de crostas. Os autores observaram que a formação de ravinas conduz ao aumento da descarga sólida, no transporte de sedimentos. Entretanto, onde ocorreu a bifurcação das ravinas, através da formação de *knickpoints*, houve uma diminuição do transporte de sedimentos, dentro da ravina. Segundo os autores, a condição crítica para a criação de *knickpoints* foi o desenvolvimento da velocidade crítica do fluxo de água. Outra observação feita por Slattery e Bryan (1992) é que a formação de ravinas não foi claramente determinada por limites hidráulicos específicos. Em vez disso, fluxos com ravinas e sem ravinas foram separados por zonas de transição, com diferentes tipos de fluxo.

3.3. Modelos

Desde Horton (1945), que os pesquisadores têm criado modelos, com o objetivo de procurarem compreender a formação e a evolução de ravinas. Esses modelos podem ser baseados em experimentos de campo, de laboratório, experimentos mistos, ou então, modelos de caráter mais teórico. Mas, segundo Favis-Mortlock (1996), ainda são poucos os modelos que procuram prever o desenvolvimento de rede de ravinas. Segundo Dietrich e Dunne (1993), um outro problema importante é a definição de onde exatamente as ravinas iniciam e isso, segundo esses autores, é uma questão chave no desenvolvimento de modelos que empregam dados digitais de elevação. Dessa forma, essa parte do artigo explora, em detalhe, o modelo

teórico recém criado por Favis-Mortlock (1996), que se refere a uma abordagem evolutiva, através da simulação do início e do desenvolvimento de ravinas.

Segundo Favis-Morlock (1996) as micro-ravinas formadas, tanto pelo *runoff*, resultante de gotas d'água, que caem na superfície, como pelo *overflow*, resultante das poças que se formam na superfície e se rompem, através dos *knickpoints*, podem ser imaginados como competitivos. Nessa "competição", as de maior "sucesso" tornam-se ravinas descontínuas, que por sua vez, também competem com outras ravinas descontínuas, para formarem um subconjunto de ravinas contínuas. Segundo Favis-Morlock (1996), o "sucesso" das ravinas vai depender tanto da sua posição na encosta, como da microtopografia. Essa microtopografia, por sua vez, será modificada pelos processos erosivos, a medida que as ravinas crescem (ou evoluem). Daí o autor ter dado o nome de *RillGrow* ao seu modelo, cuja tradução para o português seria "crescimento de ravinas".

No modelo em questão, durante um evento chuvoso, micro-ravinas são formadas. Algumas evoluem para ravinas maiores e podem formar uma rede conectada de ravinas ("sucesso"), enquanto outras não evoluem nesse sentido, sendo consideradas pelo autor como de "insucesso". A probabilidade de "sucesso" e, conseqüentemente, o desenvolvimento de ravinas observáveis, aumenta em direção às partes mais baixas da encosta, a medida que a área fornecedora de água também aumenta, a montante. Para Favis-Mortlock (1996), existe uma analogia do seu modelo com os sistemas biológicos. Assim como os seres vivos, as ravinas podem ser vistas como "competindo por recursos". O modelo pressupõe que a microtopografia não é estática, e como tal, os processos de *splash*, *overland flow* e *rill flow* modificam essa micro-topografia da área onde ocorre, que por sua vez cria um *feedback*. Para Favis-Morlock (1996), a existência de um *feedback* positivo é um pré-requisito para o desenvolvimento de um sistema dinâmico auto-organizacional (*self-organising dynamical system*), que o autor denomina também de sistema complexo. Nesse caso, o modelo assume que é possível visualizar um sistema de ravinas nas encostas, como um sistema complexo evolutivo. Dessa forma, os relacionamentos em escala maior devem ser considerados como características emergentes de tal sistema.

Sendo assim, a hipótese que o modelo proposto por Favis-Mortlock (1996) procura avaliar é a seguinte: "É possível modelar o início e o desenvolvimento de ravinas, numa encosta, usando uma abordagem evolutiva, que é guiada por regras simples, numa escala bem

menor"? O modelo *RillGrow* corresponde a um espaço quadrado, com 2m x 2m, que representa uma porção de uma encosta. No início de cada iteração, uma gota de chuva cai aleatoriamente numa determinada célula desse quadrado. O modelo assume que todas as gotas têm o mesmo volume e os efeitos da erosão por *splash* são ignorados. A infiltração também é assumida como sendo zero, de tal forma que todas as gotas que caem nesse quadrado tornam-se *runoff*. Quando a água sai de uma célula, a medida que ela flui para outra célula situada mais abaixo, nesse quadrado, ou quando ela rompe uma poça formada nesse quadrado, ela erode a célula, reduzindo sua elevação. Cada porção (*packet*) de água é direcionada para baixo, nesse quadrado, até que o *runoff* atinja a beira de uma célula e parta, ou então essa porção de água alcance um ponto, onde não exista uma célula adjacente mais abaixo. O modelo de Favis-Morlock (1996) assume que a água que sai dessas poças erode a célula que se rompe.

O modelo em questão considera cada gota de água separadamente e, dessa forma, não opera em um domínio real de tempo. Sendo assim, não há possibilidade de calcular a descarga resultante do *runoff*, num dado intervalo de tempo. Dessa modo, uma velocidade constante do *runoff* foi assumida nesse modelo, que é de 20 cm/s.

Apesar do *RillGrow* de Favis-Mortlock (1996) ter algumas limitações, os resultados obtidos pelo autor enfatizam uma abordagem evolutiva para o início e desenvolvimento das ravinas, guiadas por regras que atuam numa escala milimétrica. Isso, segundo o autor, parece possibilitar a reprodução de muitas características emergentes dos sistemas de ravinas. Essas características podem ser aqui destacadas como o relacionamento entre as ravinas e a declividade das encostas; o balanço espacial entre a erosão por ravina e inter-ravina; a variação na profundidade das ravinas; e mudanças na micro-topografia do terreno. No entanto, como destaca o autor, nesse estágio do modelo ainda não foram feitas comparações entre situações simuladas e valores mensurados, na realidade. O que o autor procura enfatizar é que o seu modelo, apesar da escala reduzida e de uma série de outras limitações, procura contribuir na compreensão da realidade, no que se refere ao início da formação de ravinas, a sua evolução, bem como na conexão com outros processos erosivos.

4. CONSEQUÊNCIAS NOS SOLOS AGRÍCOLAS

As consequências nos solos agrícolas são as mais variadas possíveis e, nesse artigo, serão examinados apenas alguns casos, com o objetivo de destacar a importância desse processo erosivo, no sentido de dar início ao desenvolvimento de outras formas erosivas, como a evolução de ravinas em voçorocas, discutidas no próximo item, mas também as consequências danosas para a agricultura, devido a perda de solo, de nutrientes, de sementes e a evolução que pode acontecer para uma área degradada.

Diversos pesquisadores, em várias partes do mundo, têm chamado a atenção do problema da formação e da evolução das ravinas, em especial nos solos agrícolas. Um deles é Robert Evans, que tem publicado muitos trabalhos nesse sentido, em especial em relação aos solos da Inglaterra. Dentre as dezenas de trabalhos publicados por Evans, nos últimos anos, dois mais recentes destacam o papel da ravinas nas perdas na atividade agrícola. Em um deles, Evans (1992) avalia a formação de ravinas em solos com diferentes propriedades físicas e químicas e em que medida essas ravinas afetam a produtividade agrícola. O autor chegou a conclusão de que nos solos argilosos, em Bedfordshire, na Inglaterra, as ravinas estão mais confinadas ao fundo dos vales, em função da sua maior resistência ao processo erosivo. Dessa forma, o autor destaca que nas encostas laterais, em cada vale, a ação do escoamento superficial não é suficiente para criar ravinas, no entanto, quando as águas se acumulam no fundo do vale (*valley floor*), vindas de ambas encostas que limitam esses vales, aí a concentração dessas águas é suficiente para formar ravinas, devido a sua quantidade e velocidade que atingem nessa posição topográfica. Segundo Evans (1992), 83,3% das ravinas em Bedfordshire, nesses terrenos argilosos, ocorrem no fundo dos vales. Já na região de Nottinghamshire, onde os solos são arenosos, a maior parte das ravinas (57,6%) ocorrem nas encostas. Além disso, o autor destaca que em Nottinghamshire, a maioria das ravinas se desenvolvem em terrenos onde o solo foi arado de alto a baixo nas encostas, num total de 156 localidades estudadas, enquanto apenas em quatro localidades, as ravinas se desenvolvem em solos cultivados em curva de nível.

Um outro exemplo do papel do *runoff* na erosão dos solos agrícolas foi desenvolvido por Robinson e Naghizadeh (1992), na região de South Downs, no sul da Inglaterra. Os autores utilizaram um simulador de chuvas para examinar em que medida diferentes técnicas

agrícolas podem favorecer, ou não, o processo erosivo. Para tal, utilizaram um simulador de chuvas com intensidades entre 23,3 mm/h e 42,5 mm/h. Os autores chegaram à conclusão de que os efeitos das rodas dos tratores são de grande importância na geração de *runoff*, pois a quantidade de solo erodida nessas condições foi bem maior do que nas áreas sem a influência das rodas dos tratores. Além disso, Robinson e Naghizadeh (1992), também observaram que as técnicas de cultivo superficial provocam menos erosão do que as técnicas de cultivo mais tradicionais, pois o uso de máquinas que compactam o solo, após o cultivo, geram maior escoamento de água na superfície do solo, que eventualmente pode provocar o surgimento de ravinas e maior perda de solo.

Evans (1993), em um outro trabalho sobre a frequência e as taxas de ravinamento, em terrenos agrícolas na Inglaterra, chama atenção de que para se compreender bem o processo de formação e de desenvolvimento das ravinas, é necessário que o monitoramento seja feito numa escala de campo. Para tal, o autor monitorou dezessete localidades, entre os anos de 1982 e 1986, na Inglaterra e no País de Gales. Evans chegou a conclusão de que nas áreas onde a erosão por ravinas é um problema, em média mais de 5% dos terrenos agrícolas foram afetados, em cada ano. A área onde as ravinas afetaram mais os solos foi em Nottinghamshire, nos terrenos arenosos, citados anteriormente, onde 13,9% dos solos foram atingidos por esse processo erosivo. Outra conclusão que Evans (1993) chegou é que a maioria dos terrenos afetados por erosão por ravinas correspondem a solos arenosos e franco arenosos. As taxas de erosão mensuradas no campo variaram de 3 a 5 m³/ha/ano, em um pequeno número de localidades, mas na maioria das áreas monitoradas as taxas de erosão foram inferiores a 1,5 m³/ha/ano. Evans (1993) destaca que com essas baixas taxas erosivas, a maioria dos fazendeiros não se preocupa com o problema, pois nos anos seguintes à formação de ravinas, esses fazendeiros nivelam os solos, com o uso de máquinas agrícolas e a maioria continua cultivando encosta abaixo, sem utilizar culturas em curva de nível, apesar de ser uma técnica bem mais efetiva no controle da erosão.

Guerra e Botelho (no prelo) também chamam atenção para o problema da erosão dos solos brasileiros e da consequente perda de fertilidade dos mesmos, bem como do empobrecimento desses solos, em especial das áreas onde os processos de cultivo não respeitam limites relacionados às propriedades químicas e físicas do solo, bem como às características das chuvas concentradas em poucos meses e características das encostas.

Muitos dos problemas relacionados à degradação dos solos no Brasil começam com a formação de pequenas ravinas, que evoluem para voçorocas (Guerra, 1995) e, muitas vezes, o consequente abandono de determinadas áreas, que tornam-se imprestáveis para a agricultura. Daí a importância de se compreender bem a conexão dos processos de formação de ravinas com outros processos erosivos, que será discutido no item a seguir.

5. CONEXÃO COM OUTROS PROCESSOS EROSIVOS

Desde os trabalhos de Horton (1945), até os mais recentes apresentados nesse artigo, tem havido uma preocupação por parte de alguns autores em compreenderem o processo de formação e de desenvolvimento das ravinas. Mas existe uma conexão entre os primeiros estágios do processo erosivo, quando o escoamento das águas ainda se apresenta difuso (Merrit, 1984), como escoamento em lençol, que também é denominado no Brasil de escoamento laminar, até a formação das ravinas e da sua possível evolução para uma voçoroca (Guerra, 1995), ou para uma verdadeira rede de canais conectados (Dietrich e Dunne, 1993). A compreensão de como essa conexão ocorre ainda não está totalmente definida e, por isso mesmo, deve ser motivo de pesquisa daqui para a frente. No entanto, os trabalhos desenvolvidos até o momento, quer sejam de caráter experimental, no campo, ou no laboratório, conforme a literatura aqui apresentada, ou de caráter teórico e a criação de modelos, por exemplo, o *RillGrow* (Favis-Mortlock, 1996), que procuram compreender como as ravinas evoluem no tempo e no espaço, ainda têm muito que avançar.

Essas pesquisas mais ou menos isoladas, ou compartimentadas da realidade, são importantes, porque tornam possível o avanço do conhecimento nesse aspecto específico da evolução da paisagem, mas não deve-se perder de vista a conexão existente entre os vários processos operantes nas encostas, bem como a conexão existente entre as várias formas erosivas. A propósito disso, Dietrich e Dunne (1993) chamam atenção que muitos estudos sobre as cabeceiras de canais têm abordado uma questão bem aplicada, ou seja, o desenvolvimento de voçorocas, em resposta a diferentes usos da terra. Ainda segundo esses autores, tanto os estudos teóricos, como os práticos têm demonstrado que as cabeceiras dos canais são características importantes, que deveriam ser investigadas em mais detalhe, em especial se queremos compreender como os mecanismos do processo erosivo operam. Nesse sentido, a conexão dos processos de ravinamentos, através da sua evolução, formando

voçorocas e verdadeiras redes de canais de drenagens, pode ser mais facilmente compreendida, se forem consideradas as diversas ligações entre esses processos e as formas resultantes.

Desde as primeiras observações de Horton (1945) sobre as áreas sem erosão, até os modelos mais recentes, como *RillGrow* (Favis-Mortlock, 1996), que procura compreender a evolução das ravinas, como sistemas dinâmicos auto-organizacionais, a perspectiva de conexão entre os processos que ocorrem em micro escala e os processos que ocorrem ao nível de uma encosta, ou de uma bacia, têm sido ainda pouco considerados. Muita pesquisa ainda será necessária, para compreender como essas conexões ocorrem e, que papel possuem na compreensão dos processos erosivos e do modelado de uma determinada paisagem.

6. CONCLUSÕES

De acordo com o que foi colocado no início desse artigo, o presente trabalho teve como um dos objetivos levantar questões sobre um assunto bastante controvertido, que é a formação e o desenvolvimento de ravinas. Baseado numa bibliografia que leva em conta vários aspectos do processo de formação de ravinas, tanto em laboratório, como em campo, como pesquisas de caráter mais teórico e modelos criados para compreender a geração e evolução de ravinas, são levantadas uma série de questões, que não precisam, necessariamente, ter uma resposta imediata.

O artigo teve também o objetivo de procurar reunir sucintamente uma série de teorias e de abordagens sobre o assunto, levando em conta uma bibliografia de caráter internacional, que nem sempre é de fácil acesso por parte de pesquisadores brasileiros. Considera-se, portanto, um ponto de partida, ou mesmo uma continuidade do que vem sendo desenvolvido tanto no Brasil, como em outras partes do mundo, no sentido de se compreender como o processo de formação de ravinas ocorre. Como tem sido afirmado por uma série de autores, e que espera-se ter ficado claro nesse artigo, talvez ainda estejamos um pouco longe de compreender como o processo opera, em diversas condições ambientais, levando em conta diferentes tipos de solos, encostas, climas, uso da terra, etc. Pelo menos, a partir do momento que consigamos entender como as ravinas se conectam com outros processos operantes nas encostas, talvez fique mais fácil compreender o processo como um todo.

A importância do processo de formação e desenvolvimento das ravinas deve-se não só à necessidade de compreendermos o processo por si só, mas também, de como pode ser

diagnosticado e também como pode ser prognosticado, no sentido de que as atividades humanas na superfície terrestre, no presente caso, principalmente as atividades agrícolas, possam ser praticadas, causando o mínimo de danos aos solos e ao meio ambiente como um todo. A contribuição dos geomorfólogos e de todos os cientistas que procuram entender esse processo pode ser fundamental para evitar os problemas que têm ocorrido no mundo todo, mas talvez com maior ênfase nas regiões tropicais, onde as chuvas concentradas têm um papel especial na geração desses processos erosivos, em particular os mais catastróficos.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq por ter me proporcionado uma Bolsa de Pós-Doutorado na Environmental Change Unit, School of Geography, University of Oxford, durante o ano de 1997; ao Dr. David Favis-Mortlock, da Environmental Change Unit (University of Oxford), com quem troquei muitas idéias sobre o tema desse artigo, durante minha estada em Oxford; e aos Professores Visitantes do Departamento de Geografia, da UFRJ, Antonio Soares da Silva e Rosângela Garrido Machado Botelho, que leram a primeira versão desse artigo e fizeram diversas sugestões interessantes.

BIBLIOGRAFIA

- ABRAHAMS, A.D., PARSONS, A.J. E HIRSCH, P.J. (1992). Field and laboratory studies of resistance to interrill overland flow on semi-arid hillslopes, southern Arizona. *Overland Flow - Hydraulics and Erosion Mechanics*. Editores: A.J. Parsons e A.D. Abrahams, University College London Press, Londres, 1-23.
- BERGSMAN, E., CHARMAN, P., GIBBONS, F., HURNI, H., MOLDENHAUER, W.C. E PANICHAPONG, S. (1996). Terminology for soil erosion and conservation. International Society of Soil Science, Holanda, 313p.
- BOWYER-BOWER, T. E BRYAN, R.B. (1986). Rill initiation: concepts and experimental evaluation on badland slopes. *Z. Geomorf. N.F.*, 60, 161-175.
- BRYAN, R.B. (1987). Process and significance of rill development. *Catena Supplement*, 8, 1-15.
- BRYAN, R.B. (1990). Knickpoint evolution in rillwash. *Catena Supplement*, 17, 111-132.

- DE PLOEY, J. (1983). Runoff and rill generation on sandy and loamy topsoils. *Z. Geomorf. N.F.*, 46, 15-23.
- DIETRICH, W.E. E DUNNE, T. (1993). The channel head. *Channel Network Hydrology*. Editores: K. Beven e M.J. Kirkby. John Wiley and sons, 175-219.
- DUNNE, T. (1980). Formation and controls of channel networks. Progress in *Physical Geography*, 4, 211-239.
- DUNNE, T. E AUBRY, B.F. (1986). Evaluation of Horton's theory of sheetwash and rill erosion on the basis of field experiments. *Hillslope Processes*. Editor: A.D. Abrahams. Allen e Unwin, EUA, 31-53.
- EVANS, R. (1992). Rill erosion in contrasting landscapes. *Soil Use and Management*, 8, 4, 170-175.
- EVANS, R. (1993). Extent, frequency and rates of rilling of arable land in localities in England and Wales. *Farm Land Erosion: In Temperate Plains Environment and Hills*. Editor: S. Wichereck. Elsevier Science Publishers, 177-190.
- FAVIS-MORTLOCK, D. (1996). An evolutionary approach to the simulation of rill initiation and development. *Proceedings of the 1st International Conference on GeoComputation*, Leeds, Inglaterra, 248-281.
- FUJIWARA, T., FUKADA, M. E MOTOYOSHI, F. (1990). An experimental study of the rill formation process on a bare slope. *Techonology Reports of the Yamagushi university*, 4, 4, Japão, 313-323.
- GOVERS, G., EVERAERT, W., POESEN, J., RAUWS, J., DE PLOEY, J. E LAUTRIDOU, P. (1990). A long flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15, 313-328.
- GUERRA, A.J.T. (1995). Processos erosivos nas encostas. *In: Geomorfologia - uma Atualização de Bases e Conceitos*. Editores: A.J.T. Guerra e S.B. Cunha, Ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 2ª edição, 149-209.
- GUERRA, A.J.T. E BOTELHO, R.G.M. (1996). Características e propriedades dos solos relevantes para os estudos pedológicos. *Anuário do Instituto de Geociências*, UFRJ, 19, 93-114.
- GUERRA, A.J.T. E BOTELHO, R.G.M. (no prelo). Erosão dos Solos. *In: Geomorfologia do Brasil*. Editores: S.B. Cunha e A.J.T. Guerra, Ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro.
- MERRITT, E. (1984). The identification of four stages during micro-rill development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 9, 493-496.
- MOSS, A.J., GREEN, P. E HUTKA, J. (1982). Small channels: their experimental formation, nature and significance. *Earth Surface Processes and Landforms*, 7, 401-415.

- RAUWS, G. (1987). The initiation of rills on plane beds of non-cohesive sediments. *Catena Supplement*, 8, 107-118.
- RAUWS, G. E GOVERS, G. (1988). Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. *Journal of Soil Science*, 39, 111-124.
- ROBINSON, D.A. E NAGHIZADEH, R. (1992). The impact of cultivation practice and wheelings on runoff generation an soil erosion on the South Downs: some experimental results using simulated rainfall. *Soil Use and Management*, 8, 4, 151-156.
- SLATTERY, M.C. E BRYAN, R.B. (1992). Hydraulic conditions for rill incision under simulate rainfall: a laborarory experiment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17, 127-146.