

1 Introdução

A superfície da terra é formada por processos geológicos que formam as rochas, assim como por processos naturais de degradação e também de erosão. A erosão destrói as estruturas que compõem o solo (argila, areia, óxidos e húmus), e seu transporte é feito pela ação da água da chuva, do vento, da gravidade e até do gelo. O material erodido é transportado para as partes mais baixas dos relevos, produzindo o assoreamento dos cursos de água.

O principal agente erosivo é a chuva, mas existem outros fatores que influenciam diretamente o processo erosivo, tais como a infiltração da água no solo, topografia do terreno (declive), tipo de solo e a proteção natural, isto é, a quantidade de vegetação existente.

A origem e evolução das bacias sedimentares, dentre outros fenômenos, é estudada pela geologia sedimentar, a qual trata do estudo dos processos físicos, químicos e biológicos, atuantes na superfície da terra desde o seu início até os dias atuais. Ela estuda os processos tectônicos, responsáveis pela gênese e evolução dos diferentes tipos de bacias hidrográficas [1].

Na atualidade, o uso de modelos de base física, ou modelos *runoff-erosion*, que permitem analisar processos de escoamento superficial, desprendimento de partículas e de transporte e deposição de sedimentos em bacias hidrográficas, é cada vez mais freqüente. O termo *runoff* não se refere a um único processo, ele na verdade é um processo mais complexo que envolve vários sub-processos que agem conjuntamente e culminam com o fluxo no canal de uma dada bacia [2].

No Brasil, o número desses estudos tem aumentado muito nos últimos anos. Santos *et al* [3] desenvolveram uma equação empírica, baseada nos resultados de um modelo hidrossedimentológico, que calcula a perda de solo para a região semi-árida do nordeste brasileiro. Da Silva e Santos [4] aplicaram um modelo chamado KINEROS (*Kinematic Runoff and Erosion Model*) para estimar a vazão e a produção de sedimentos na bacia do rio Pirapama, localizada na região litorânea do estado de Pernambuco. O grupo de Tecnologia em Computação Gráfica da PUC-Rio, Tecgraf, desenvolveu nos últimos anos um simulador estratigráfico chamado STENO. Esse programa utiliza um algoritmo

para transporte de sedimentos fazendo uma simulação numérica 3D para processos deposicionais nos ambientes de plataforma, taludes e bacias hidrográficas. Os principais objetivos do STENO são: produzir um simulador numérico que opere em escala estratigráfica, isto é, tempo de simulação da ordem de milhões de anos; apoiar a modelagem de bacias e testar cenários exploratórios.

O uso e análise desses modelos demonstram que para escalas de tempo pequenas e áreas não muito extensas, o rebaixamento do perfil dos rios é diretamente afetado pelos processos de deformação tectônica. Por outro lado, modelos de previsão de evolução do relevo associados com intemperismo, erosão e deposição de sedimentos, considerando escalas espaciais do tipo regional ou continental e escalas de tempo relativamente grandes (10^5 anos), devem ser desenvolvidos acoplando tanto efeitos tectônicos como morfológicos (Figura 1). Neste contexto, em um modelo erosional de grande escala o foco principal deve ser a evolução da rede de drenagem e do perfil longitudinal dos rios. O processo de incisão fluvial no leito rochoso inclui o desprendimento das partículas, macro-abrasão (*chipping* e fratura de blocos devido ao impacto), desgaste, intemperismo físico e químico e possível cavitação. Segundo Whipple [5], o grau com que o intemperismo físico e químico facilita os mecanismos erosivos não é bem conhecido, mas claramente depende do substrato do solo e das condições ambientais. A qualidade da rocha controla diretamente a capacidade do fluído de penetrar e interagir com o substrato. Portanto, deve-se estabelecer, na modelagem da rede do sistema fluvial, o tipo de rocha que compõe o leito do canal, já que disto dependerá o valor das taxas de incisão e de outros parâmetros envolvidos nos processos fluviais. É importante ressaltar que as condições ambientais também desempenham um papel extremamente significativo na determinação desses valores.

Interação de Clima, Erosão, Sedimentação, Tectônica

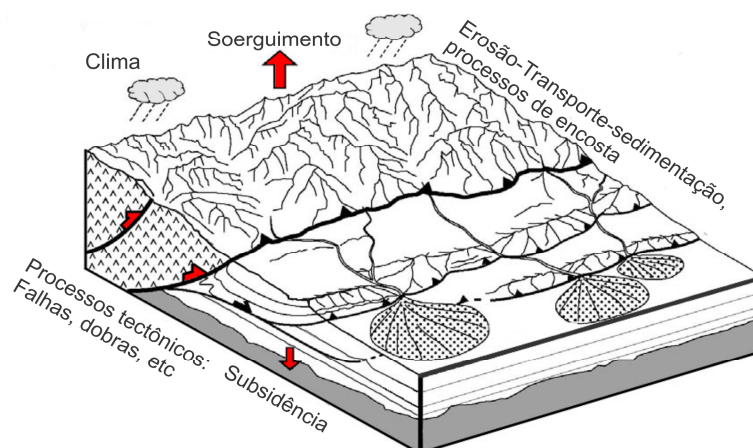


Figura 1 – Interação dos processos de erosão-transporte-sedimentação e tectônica [6].

Alguns pesquisadores sugerem dois pontos relevantes na modelagem dos processos fluviais: a inclusão de valores críticos (*thresholds*) nas equações que governam o processo e a consideração de que grandes inundações na simulação tenham uma influência altamente importante na evolução do relevo e, portanto, nas taxas de denudação a longo prazo [5]. Além disso, baixos valores limites, altas precipitações, inclinações pronunciadas e canais estreitos permitem um alto percentual de inundações que contribuem consideravelmente na incisão fluvial.

Outra consideração importante na representação da rede fluvial é a diferenciação do tipo de canal que será formado durante o processo erosivo. Na literatura, são encontrados vários trabalhos que classificam os canais em dois grandes grupos: canais com transporte limitado pela produção de sedimentos, ou *detachment-limited rivers*; e canais limitados pela capacidade de transporte da corrente, ou *transport-limited rivers*. Os primeiros são aqueles nos que a quantidade de material transportado é inferior à capacidade de transporte da corrente. Os segundos são limitados pela capacidade efetiva de transporte da corrente. Deve ser considerada a necessidade da formação alternada desses dois tipos de canais, pois em uma rede fluvial é comum encontrar canais com trechos com o leito rochoso exposto, seguidos por trechos cobertos com sedimento aluvial. Neste trabalho, será considerada a formação alternada de canais limitados tanto pela produção de sedimentos como pelo transporte, mas o volume de material erodido e transportado jamais poderá exceder a capacidade máxima de transporte do fluxo. Dessa forma, para a avaliação do volume de sedimento que será erodido em um canal, o modelo realizará um balanço entre a

quantidade de material que poderá ser erodido pelo fluxo (capacidade de incisão) e a quantidade de material que o fluxo poderá de fato transportar (capacidade efetiva do fluxo). Sendo assim, será garantida a formação de canais alternados, a conservação de massa do sedimento produzido e transportado e, o mais importante, não serão excedidos os limites básicos entre capacidade de incisão e capacidade de transporte.

Seidl e Dietrich [7] apontam algumas deficiências para calibração dos modelos matemáticos. Segundo eles, a primeira deficiência é a inapropriada descrição de paisagens reais. Os autores sugerem que a validação dos modelos seja baseada em comparações quantitativas entre o relevo real e o previsto por eles e não por uma simples comparação e avaliação visual. Ante isto, é de extrema importância fazer um levantamento adequado das condições iniciais do relevo, das condições climáticas e, principalmente, da história tectônica da região. A segunda deficiência é a falta de dados de campo disponíveis, que permitam definir as relações de transporte de sedimento e que sejam significativos em escalas de tempo geomórfológicas. Nesta pesquisa, o modelo desenvolvido será aplicado a diversos casos analisados em outros trabalhos, alguns deles bacias hidrográficas reais. Dessa forma, se disponibilizará de uma quantidade significativa de informação para a comparação dos resultados e a validação do modelo.

De maneira geral, um modelo fluvial ideal a grande escala deve estar baseado em uma matriz de células. As células que representem um canal de ordem elevada deverão estar rodeadas por células de contribuição da área de drenagem. A dimensão das células deverá variar entre 1 e 10 Km^2 [8]. Os eventos importantes deverão ser uma caracterização da erosão em uma sub-escala do *grid* e da contribuição de sedimentos, do roteamento da rede fluvial para o transporte, das taxas de erosão do leito do canal ou de deposição, da deformação tectônica, das mudanças espaciais e temporais entre os tipos de canais, da direção do fluxo e das condições iniciais e de contorno.

Em uma escala menor podem acontecer situações catastróficas, tais como avalanches, envolvendo escalas de tempo relativamente pequenas, quando comparadas com os processos de incisão fluvial. Apesar desses eventos acontecerem em períodos tão curtos e de maneira pontual, os volumes de material gerado podem chegar a vários milhares de m^3 , influenciando de maneira significativa o desenvolvimento do sistema fluvial e, portanto, a evolução do relevo. Deslizamentos acontecem pela falha espontânea da rocha e/ou solo

(sedimento), podendo viajar a distâncias separadas a vários quilômetros da sua origem. Além disso, são fenômenos que merecem ser estudados isoladamente, pois representam uma grande ameaça para diferentes tipos de assentamentos e construções humanas. Levando o anterior em consideração, será incluído neste trabalho um módulo, que baseado em um modelo numérico, descrito no capítulo 3, analisará esse tipo de processos.

É apresentado neste trabalho, um modelo computacional que permite analisar a evolução na mudança do relevo de bacias hidrográficas, em pequena e grande escala, assim como estimar a produção de sedimento resultante do processo erosivo. O algoritmo de análise, escrito na linguagem de programação C++, considera a simulação de diferentes cenários que incluem deformação tectônica, processos de encosta (difusão e movimentos de massa) e processos de incisão fluvial, dando-se particular atenção à formação e evolução da rede fluvial de drenagem. Para a análise de resultados, o programa oferece a visualização 3D de diferentes superfícies: distribuição dos sedimentos, evolução da rede fluvial, mudanças topográficas do relevo, etc.

No referente aos movimentos de massa será simulado unicamente o processo de *runout*, que representa as fases de movimento e de parada do fluxo.

1.1. Objetivos

Os objetivos principais desta tese são:

a) implementar um modelo computacional que permita estudar a evolução do relevo de bacias hidrográficas e avaliar a quantidade de sedimento produzido nos processos de erosão fluvial, comumente predominantes em bacias hidrográficas. Nessa modelagem, a chuva será considerada o principal agente erosivo. Serão estudados simultaneamente os processos de incisão fluvial e deformação tectônica, dando-se particular importância à modelagem da rede fluvial, assim como as possíveis mudanças espaciais e temporais entre os tipos de canal. Também serão considerados os processos de encostas, os quais serão modelados com a equação de difusão linear. Para isto, será adotado um critério que permita diferenciar esses processos (difusão) dos de transporte fluvial (advectivos). Esse critério é descrito no capítulo 3 do presente trabalho. Em uma escala menor serão considerados os processos de movimentos de massa, resultantes de situações catastróficas, tais como avalanches e

deslizamentos em geral. Para isto, será aplicado um modelo 1D do sistema de equações de Saint Venant, adaptado para deslizamentos e avalanches.

O resultado final será uma ferramenta de modelagem que permite analisar temporal e espacialmente as interações dos mecanismos envolvidos no processo erosivo (incisão, transporte, sedimentação, deformação tectônica e clima, dentre outros) e na produção de sedimentos em geral.

No que se refere ao programa STENO, atualmente, o aporte de sedimentos é definido através de um volume ou depósito ao longo da linha de costa do modelo. Sendo assim, esse volume é atualmente fornecido, por grupo litológico (argila, silte, areia média, fina e grossa), pelo usuário. Se o volume de algumas células não for especificado, este será calculado por interpolação utilizando o aporte das células adjacentes que possuam dado de entrada. Neste contexto, todas as células pertencentes à linha de costa possuirão uma certa quantidade de sedimento, que será transportado subseqüentemente pelas correntes submarinas. No caso particular do STENO, o modelo proposto ajudará a calcular de forma automática o aporte de sedimentos para diferentes bacias hidrográficas. Para isto, além de simular a evolução do relevo, o modelo conta com um algoritmo que quantifica o volume de sedimento produzido pelos processos erosivos e identifica as células, pertencentes à linha de costa, que receberão o aporte.

1.2. Organização do Trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos, incluindo o presente correspondente à parte introdutória.

No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica. Inicialmente será feito um resumo sobre a terminologia utilizada na hidrografia de bacias sedimentares e nos processos envolvidos na evolução do relevo. Nas seções seguintes, serão estudados os processos de erosão, transporte e sedimentação e a influência da tectônica sobre eles. Será feita uma análise detalhada dos mecanismos envolvidos no processo erosivo, abordando os principais modelos numéricos para a simulação do transporte e incisão de rocha. Em uma última seção, serão analisados os processos de encostas. Serão abordados assuntos referentes à produção de solo pelo efeito do intemperismo e, de forma geral, os diferentes tipos de deslizamentos possíveis em taludes naturais, assim como as equações que dominam o problema.

No capítulo três é descrito de forma detalhada o modelo computacional proposto. Serão apresentadas as principais rotinas computacionais utilizadas para a simulação dos processos. É analisada de forma detalhada a modelagem da rede de canais fluviais, os critérios de criação e ordenação da mesma. Também serão mostrados os módulos encarregados de simular os processos de deformação tectônica, de erosão de encostas e de movimentos de massa.

O capítulo quatro é dedicado ao estudo de casos e à validação do modelo computacional. Serão apresentadas diferentes aplicações do modelo envolvendo processos de erosão por incisão fluvial e difusão linear, quantificação do aporte e determinação de pontos de área fonte, processos tectônicos e simulações de deslizamentos.

O quinto capítulo corresponde às conclusões gerais e considerações para futuros trabalhos.