MODELOS HIDRÁULICOS-HIDROLÓGICOS: Conceitos e Aplicações

Laércio Leal dos Santos¹

Artigo recebido em 20/05 /2009 e aceito em 09 /09 /2009

RESUMO

Este artigo tem o objetivo de apresentar uma revisão sobre os modelos hidrológicos, identificando sua importância nos processos de tomadas de decisão por parte de órgãos gestores. A modelagem hidrológica dos processos de escoamento superficial e da produção de sedimentos em bacias hidrográficas tem sido cada vez mais utilizada, dada à possibilidade de poder caracterizar, os impactos que as mudanças climáticas e as ações antrópicas têm exercido sobre o meio ambiente. Em regiões semi-áridas, a quantificação do escoamento superficial e produção de sedimentos, são de extrema importância, uma vez que, a vegetação predominante da região é a caatinga, que não fornece proteção ao impacto das gotas de chuva sobre o solo, e também, devido ao grande desmatamento da região. Todo o escoamento e sedimento produzido são carregados para os rios e reservatórios, produzindo o assoreamento e perda da capacidade de acumulação de água, prejudicando o abastecimento das comunidades. A utilização dos modelos hidrológicos em pequenas bacias são imprescindíveis para a quantificação desses fenômenos físicos, podendo os seus resultados serem extrapolados para áreas não monitoradas e hidrologicamente semelhantes, permitindo a estimativa de toda a produção, tanto do escoamento como da erosão do solo em toda a região.

Palavras-Chave: Modelos hidrológicos, parametrização, erosão, escoamento superficial.

HYDROLOGICAL MODELS: CONCEPTS AND APPLY

ABSTRACT

This article aims to present a review of the hydrological models, identifying their importance in the processes of decision making by management bodies. The modeling of hydrological processes of runoff and sediment production in river basins have increasingly been used, given the ability to characterize the impacts of climate change and human activities have exerted on the environment. In semi-arid regions, the quantification of runoff and sediment production, are of extreme importance, since the predominant vegetation of the region is Brazil, which provides no protection to the impact of drops of rain on the ground, and also because of the large deforestation in the region. All the flow and sediment produced is carried into rivers and reservoirs, producing the siltation and loss of capacity for accumulation of water, damaging the supply of the communities. The use of hydrological models in small ponds are needed to quantify these phenomena, the results can be extrapolated to areas not monitored and hydrologically similar, allowing the estimation of the entire production, both flow and soil erosion across the region.

Keywords: Hydrological models, parameterization, erosion, runoff.

¹ Doutorando do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Área de Recursos Hídricos e Tecnologia ambiental. laercioeng@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

Os modelos hidráulicos-hidrológicos são construídos a partir de abordagens físicas dos processos hidrológicos utilizando-se das equações da conservação da massa e da equação da quantidade de movimento em sua forma completa ou simplificada.

Os modelos hidrológicos com embasamento físico são de grande valia para interpretação e análise de problemas localizados ou em domínios com dados topográficos e de parâmetros hidráulicos confiáveis.

Um aspecto importante em relação ao uso de modelos hidráulicos-hidrológicos é o alcance da modelagem do processo hidrológico. Enquanto os modelos hidrológicos visam fundamentalmente a obtenção do hidrograma de cheia na saída do exutório de uma bacia, os modelos hidráulicos-hidrológicos buscam a compreensão dos processos hidráulicos e hidrológicos que ocorrem no interior da bacia, possibilitando a quantificação de variáveis de importância para a análise e a tomada de decisão. Um exemplo desses modelos é o de chuva-vazão-erosão que tem por objetivo não somente quantificar as relações entre hidrogramas e sidimentogramas observados no exutório,

mas também avaliar as regiões da bacia sujeitas ao processo erosivo e os mecanismos a serem introduzidos para minimizar as perdas de solo.

O monitoramento contínuo do comportamento hidrológico em áreas experimentais, em diferentes escalas de produção, é uma alternativa para o entendimento do fenômeno hidrológico como também serve para fornecer dados para análises tais como: identificação das culturas que provocam a menor perda do solo da região e de técnicas de cultivo que favorecem a conservação do solo.

Modelos hidrossedimentológicos, que possam considerar os efeitos das mudanças de uso do solo, vêm sendo utilizados por pesquisadores em seus estudos. Os modelos de base física, principalmente aqueles que simulam os processos da erosão pela chuva, são ferramentas muito úteis para os tomadores de decisão e órgãos gestores, visto que, uma vez parametrizados, os modelos poderão ser utilizados para a previsão de escoamento superficial e a produção de sedimentos devido a um evento de precipitação, o que auxiliaria na gestão de corpos de água.

2. MODELOS HIDROLÓGICOS

Tucci (1998) define modelo hidrológico como uma ferramenta utilizada

para representar os processos que ocorrem na bacia hidrográfica e prever as conseqüências das diferentes ocorrências em relação aos valores observados.

De acordo com Cadier *et al.* (1987), modelo hidrológico é a representação de algum objeto ou sistema numa forma ou linguagem de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas. Não foge a definição da palavra modelo, porém, requer uma análise mais aprofundada sobre o tema hidrológico. A modelagem hidrológica requer conhecimento aprofundado sobre o ciclo hidrológico, e conseqüentemente, sobre todos os processos físicos que ocorrem durante uma chuva, ou seja, a própria chuva ou precipitação, a interceptação, a evapotranspiração, a infiltração e o escoamento superficial. Todos esses processos são representados através de métodos matemáticos.

A modelagem hidrológica permite verificar a consistência das informações disponíveis (dados observados), que são em geral muito curtas, obtidas a partir das observações hidrológicas nas bacias hidrográficas, e com base nesses dados, os modelos hidrológicos podem ser calibrados, permitindo, por exemplo, a geração de séries sintéticas e a utilização dos modelos como ferramenta de obtenção de dados em bacias não monitoradas.

Para que um modelo seja utilizado adequadamente, faz-se necessário à compreensão da estrutura do modelo e suas limitações. Além desses fatos, deve-se ressaltar que muitos modelos necessitam de calibração para que reproduza o mais próximo possível o fenômeno a ser modelado, uma vez que, devido aos métodos matemáticos utilizados para cada modelo, surge uma série de parâmetros relacionados a estes métodos, que representam as características e os processos físicos da bacia. Pode-se dizer que existem três grupos de parâmetros:

- a) Parâmetros que são obtidos através de ensaios em uma área experimental, em laboratórios ou de acordo com as características geométricas dos elementos;
- b) Parâmetros que são obtidos através da literatura, com base em trabalhos efetuados na bacia em estudo ou em áreas semelhantes;
- c) Parâmetros que precisam de calibração.

Os parâmetros obtidos através de ensaios em uma área experimental ou em laboratórios representam características do solo, por exemplo: densidade, porosidade, capacidade de infiltração, potencial mátrico do solo, granulometria. De uma maneira mais ampla, podemos citar que estes parâmetros também representam a

cobertura vegetal, a declividade, a presença de reservatórios e de rochas.

Quando não é possível efetuar experimentos para obtenção dos valores dos parâmetros, quer seja pela falta de equipamentos ou por técnicos capacitados, costuma-se utilizar os valores advindos da literatura, através de trabalhos já realizados na bacia, ou em bacias hidrologicamente semelhantes.

Entretanto, os valores dos parâmetros que constam da literatura são valores de referência e nem sempre podem ser tomados como os mais indicados para uma dada região. Um exemplo disto seriam os valores dos parâmetros relacionados ao solo (condutividade hidráulica, porosidade, umidade na saturação) visto que para uma pequena área poderão ser encontradas diferentes manchas de solo com diferentes características do ponto de vista hidrológico. No caso da saturação, a sua distribuição acontece de forma não uniforme sobre uma bacia como também muda de evento para evento. Dessa forma, procura-se calibrar esses parâmetros para obter valores mais consistentes para a bacia analisada.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS

De acordo com Tucci (1998) os modelos podem ser assim classificados:

- a) Concentrado ou Distribuído:** o modelo é dito concentrado quando não leva em consideração a variabilidade espacial da bacia. Já o modelo é considerado distribuído quando suas variáveis e parâmetros dependem do espaço e/ou tempo;
- b) Estocástico ou Determinístico:** quando a chance de ocorrência das variáveis for levada em consideração, e o conceito de probabilidade é introduzido na formulação do modelo, o processo e o modelo são ditos estocásticos. Ou seja, quando para uma mesma entrada, o modelo produz uma mesma saída (com condições iniciais iguais) o modelo é classificado como determinístico (TUCCI, 1987);
- c) Conceitual ou Empírico:** os modelos são ditos conceituais quando levam em consideração os conceitos físicos relacionados aos processos hidrológicos. Já os modelos empíricos são aqueles que utilizam funções que não tenham relação com os processos físicos envolvidos e são baseados em análises estatísticas, como métodos de correlação e análise de regressão.

Os modelos conceituais podem ser subclassificados em semiconceituais e físicos. Os semiconceituais estão relacionados às características do processo, embora mantenham razoável empirismo

nos parâmetros das equações envolvidas, enquanto que os modelos físicos utilizam as principais equações diferenciais do sistema físico, para representar os processos e os seus parâmetros são aqueles que mais se aproximam da física do sistema. Dessa forma, as mudanças das características das bacias podem alterar os valores dos parâmetros, os quais podem ser avaliados através de medidas de campo. Portanto, modelos desse tipo, possuem uma característica muito importante, a de poderem ser aplicados em bacias hidrográficas que não possuem dados observados.

Os modelos empíricos utilizam funções matemáticas ou advindas de ajustes estatísticos visando à melhor representação da saída com base na entrada. As principais dificuldades encontradas no uso desses modelos têm sido o empirismo dos parâmetros e as incertezas quanto aos prognósticos da faixa de ajuste.

Os modelos distribuídos permitem analisar, com melhor embasamento, modificações naturais ou antrópicas nas bacias hidrográficas, o que é praticamente inviável com os modelos concentrados, devido ao excesso de empirismo e da característica concentrada da sua formulação.

Mesmo utilizando conjuntamente os modelos distribuídos, modelos digitais de

terreno e o geoprocessamento, a boa representatividade espacial e temporal do comportamento das diferentes partes da bacia não garante que os resultados encontrados possam ser estendidos para outras escalas de bacias hidrográficas. Ao fenômeno de variação dos valores dos parâmetros com a escala da bacia é dado o nome de efeito de escala, ou seja, as condições nas quais os processos ocorrem na escala de tempo e de espaço são diferentes. Portanto, o conhecimento de determinado processo numa escala de tempo e espaço, não implica necessariamente o entendimento desse processo em outras escalas (TUCCI, 1998), sendo este efeito discutido mais adiante.

2.2 MODELOS DE BASE FÍSICA

O processo de erosão é bastante complexo de ser modelado e depende de três fatores básicos: topografia, natureza do fluxo, e características dos solos e dos sedimentos que o compõe. A combinação destas três características torna a erosão um processo extremamente complexo para ser modelado, em contraste com o processo físico de escoamento. Além destes fatos, a modelagem do processo erosivo é dependente da resposta do modelo hidrológico, o que aumenta e muito o grau de complexidade do processo erosivo.

Figueiredo (1998b) cita as vantagens dos modelos de erosão de base física sobre os outros existentes (empíricos e semiconceituais) como sendo: a técnica de modelagem é baseada na física dos processos, os parâmetros possuem significado físico, a bacia é considerada um sistema espacialmente variável com entradas variáveis e parâmetros mensuráveis, possibilidade da extrapolação para áreas hidrologicamente homogêneas não observadas, aplicabilidade onde existem variações na topografia, uso de solo, cobertura vegetal e clima, consideração de áreas mais complexas, e melhor precisão na modelagem dos eventos individuais.

Visto que os modelos de base física requerem maiores informações a respeito da bacia, o requisito básico para aplicação dos mesmos seria colher todos os dados necessários para uma boa representação dos processos envolvidos. Esta prática demandaria tempo e recursos, pois seria necessária a coleta de informação em vários locais da bacia. Para contornar este problema, costuma-se coletar os dados imprescindíveis ao uso do modelo e estimar algumas outras variáveis (parâmetros), de acordo com trabalhos disponíveis na literatura. Para as variáveis características dos processos, que não tiveram seus valores coletados ou

estimados deve-se efetuar a calibração de acordo com dados observados.

As equações básicas para representar os processos hidrológicos são as leis básicas da física tais como o princípio da conservação da massa, energia e quantidade de movimento (equações de Saint Venant). No passado, a impossibilidade de representar o comportamento dos processos como eles ocorriam na prática, como também a limitação em termos computacionais de calcular, em três dimensões, a variabilidade do sistema eram alguns dos fatores que limitavam o desenvolvimento dos modelos distribuídos de base física. Porém, com o advento de novas tecnologias computacionais, as limitações computacionais são quase inexistentes, logo, esses modelos se tornaram cada vez mais utilizados.

Desde a criação dos primeiros modelos de base física (SINGH, 1995), a literatura especializada tem visto uma série de trabalhos que mostram vantagens e desvantagens dos mesmos. Serão citadas aqui algumas das desvantagens mais frequentemente observadas (FOSTER, 1982; BEVEN e O'CONNEL, 1982; ABBOTT *et al.*, 1986 a, b; BEVEN, 1989; GALVÃO, 1990; FIGUEIREDO, 1999): restrição na aplicação deste modelo relacionadas com o problema de escala, calibração, validação e incertezas inerentes

aos valores dos parâmetros e da saída fornecida; além de que, a necessidade de calibração dos parâmetros, e as suposições utilizadas para resolver o sistema de equações geram alguns erros difíceis de serem eliminados.

Mesmo com as desvantagens acima citadas os estudos sobre os modelos de base física têm crescido (SOUSA *et al.*, 2007). Isto acontece devido aos mesmos poderem fornecer, através das suas respostas, um melhor entendimento dos processos hidrossedimentológicos e por poderem representar com uma maior proximidade o desenvolvimento do ciclo hidrossedimentológico. A consideração da variação espacial da bacia e espaço-temporal da precipitação faz com que os mesmos possam ser utilizados para a análise dos impactos causados pelo uso da terra sobre os processos erosivos. O significado físico dos parâmetros permite analisar a variação do comportamento do sistema devido à variação em algum componente do mesmo.

Vários modelos de base física, que calculam a erosão e o transporte de sedimentos, foram desenvolvidos ao longo das últimas décadas. A seguir, serão citados, alguns modelos de base física, dentre eles, os modelos **WESP**, **WEPP**, **KINEROS2**:

- **O Modelo CSU** - usa um sistema de canais e planos para discretizar a bacia. Calcula a erosão e o transporte de sedimentos separadamente para o fluxo superficial e nos canais, e propaga o fluxo através do modelo de onda cinemática. O modelo pode representar grandes e pequenas áreas. Alguns parâmetros devem ser calibrados. Serão produzidas distorções nos resultados caso a representação da bacia não seja adequada (Foster, 1982). É, talvez, o primeiro modelo de erosão distribuído e de base física.
- **O Modelo KINEROS** (*Kinematic Runoff Erosion Model*) foi proposto por Woolhiser *et al.*, (1990) que incorporaram ao modelo hidrológico de Rovey *et al.*, (1977) componentes de erosão, transporte e deposição. O KINEROS é um modelo de eventos, distribuído, não linear, onde a bacia é representada por planos retangulares, canais e elementos de armazenamento. O modelo utiliza a equação da continuidade de sedimentos (BENNETT, 1974) e calcula o desprendimento das partículas pelo impacto das gotas de chuva através da equação de Meyer e Wischmeier (1969). Neste, a infiltração é modelada através da equação de Smith-Parlange (SMITH *et al.*, 1993). O modelo

KINEROS2 é uma versão melhorada do modelo KINEROS, e traz como diferencial a redistribuição da umidade do solo durante a chuva e a capacidade de comportar mais de um pluviógrafo (SMITH *et al.*, 1993).

- **O Modelo WESP** (*Watershed Erosion Simulation Program*) foi proposto por Lopes (1987) e utiliza a componente hidráulica do modelo KINEROS e as técnicas de modelagem desenvolvidas no âmbito do projeto WEPP. Neste modelo, a bacia também é discretizada através de um sistema de planos de escoamento que descarregam em canais de drenagem. É um modelo distribuído, que simula eventos de chuva, e foi elaborado para ser aplicado à pequenas bacias nas regiões semi-áridas. O modelo só considera perda de água por infiltração não sendo considerada a evaporação. O excesso de infiltração é dado pela equação de Green e Ampt (1911) com tempo de empoçamento calculado para uma chuva não permanente (CHU, 1978). A simplificação pela onda cinemática foi empregada para a equação da quantidade de movimento. O modelo considera erosão por impacto das gotas de chuva e pelo fluxo superficial. Estes processos são considerados não permanentes e variados e são descritos

dinamicamente utilizando taxas de erosão e deposição, simultaneamente, ao invés da abordagem convencional onde são utilizadas funções de transporte de sedimentos para fluxo permanente.

- **O Modelo WEPP** (*Water Erosion Prediction Project*) (FLANAGAN e NEARING, 1995) é um modelo desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) para ser aplicado à grandes bacias. Esse modelo é conceitual, e considera a física do solo, a ciência das plantas e a mecânica da erosão. Ele inclui componentes para planos, canais e para irrigação. A infiltração é baseada na equação de Green e Ampt e o escoamento nos canais é tratado através da modificação da componente de escoamento concentrado do modelo CREAMS (KNISEL, 1980). A bacia, também, é representada por planos e canais.
- **O Modelo SHE** (*Système Hydrologique Européen*) foi desenvolvido por consórcio europeu de institutos de hidrologia (BATHURST, 1986a; BATHURST *et al.*, 1995) e consiste num modelo distribuído, de base física e cujas equações físicas são resolvidas através de um esquema de diferenças finitas. A bacia é

discretizada através de uma grade horizontal e vertical. A sua versão melhorada, **SHETRAN**, considera os processos de erosão, transporte e deposição de sedimento e poluentes. Devido à sua concepção, o modelo requer grande número de informações e uma estrutura computacional onerosa, o que inviabiliza a sua utilização em nível pessoal.

Grandes vantagens na utilização de modelos hidrológicos podem ser apontadas na análise dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas. Segundo Nóbrega (2008) a utilização de modelos hidrológicos proporciona custos menores e, além disso, economia de tempo para analisar mudanças físicas e antrópicas na bacia hidrográfica, como por exemplo, a mudança da cobertura do solo e vazão/erosão/etc, que em geral, em uma bacia experimental, levaria muito tempo e pessoal capacitado para analisar os fenômenos hidrológicos.

2.3 EFEITO DE ESCALA SOBRE OS PARÂMETROS DOS MODELOS HIDROLÓGICOS

A necessidade de investigar os efeitos dos impactos antrópicos sobre produção de água e de sedimento, como também de informações sobre os processos hidrológicos e a dificuldade em obtenção

de recursos para a coleta dos mesmos têm estimulado o uso cada vez mais de modelos distribuídos de base física. Porém, limitações dos referidos modelos restringem seu uso em larga escala.

Um fato a ser considerado, é que as pesquisas citadas na literatura dizem respeito a áreas experimentais de pequena à média dimensão (micro à meso-bacias), onde se pode assumir uma certa homogeneidade. Além disso, os dados provenientes destas bacias são coletados de forma pontual e, geralmente, são utilizados como representativos das mesmas. Entretanto, o aumento da escala leva a uma maior heterogeneidade, e processos antes desconsiderados, passam a ser predominante.

Visto que a deficiência de dados é maior nas grandes bacias, se faz necessária uma metodologia de transferência de informações das pequenas bacias para as grandes. Entretanto, um entrave para este processo é o efeito que a variação de escala oferece sobre os valores dos parâmetros (FIGUEIREDO, 1998; LOPES, 2003). Apesar de várias tentativas terem sido efetuadas no sentido de melhor caracterizar este efeito, muito ainda falta fazer. Há uma evidência que mesmo em pequenas escalas pode haver significativa variabilidade espacial nas propriedades do solo. A falta de dados adequados para a caracterização do efeito do tempo e espaço sobre os

valores dos parâmetros e a incerteza na determinação de parâmetros realistas, ainda continua sendo um entrave. Portanto, torna-se evidente a necessidade de investigar funções de transferências que considerem o efeito de escala.

O problema de escala reside no fato de se escolher os parâmetros que basicamente represente os fenômenos físicos que ocorrem na região. Porém, cada área analisada possui características próprias e se apresentam de acordo com a sua heterogeneidade. Em pequenas escalas, a heterogeneidade é pequena, porém, o contrário acontece nas grandes escalas, devendo ser analisadas cuidadosamente. Para pequenas condições de homogeneidade, os valores dos parâmetros podem ser facilmente encontrados, por exemplo: a condutividade hidráulica, dados de vegetação e dados sobre o solo, representando processos de certeza (TUCCI e CLARK, 1997).

Várias abordagens podem ser consideradas para aplicação das escalas no uso de modelo. Dooge (1973) considerou em seus estudos uma melhor apropriação do espaço e do tempo sugerindo quatro importantes escalas: (a) a escala de experimentos em pequenas áreas (10 m^2), (b) a escala para micro-bacias (100 m^2), (c) a escala de sub-bacias (10^3 m^2), (d) e escala da bacia hidrográfica (10^4 m^2).

O estudo de processos em diferentes escalas pode ser feito através de uma abordagem estocástica ou de uma forma determinística. A abordagem estocástica é mais direta e envolve o uso de funções de distribuição de probabilidades. Já a abordagem determinística é mais complexa, no entanto, possui uma maior capacidade de capturar as variabilidades da bacia hidrográfica. O ideal seria que os processos físicos pudessem ser observados na mesma escala que ocorrem e daí derivar diretamente a melhor relação que descreveria o fenômeno físico. Porém, isso nem sempre é possível para qualquer escala da bacia hidrográfica (PIMENTEL DA SILVA e EWEN, 2000).

Pesquisas sobre efeitos de escala podem ser feitas da escala de uma parcela para escalas maiores, ou no sentido inverso, da escala maior para a escala menor. Neste caso, tem-se a desagregação da informação, o que significa a partir da informação conhecida para determinado nível, identificar os fatores relacionados às escalas inferiores que podem ter levado àqueles valores no nível mais alto. Já no sentido inverso, de uma escala menor para uma maior, tem-se a agregação da informação, ou seja, a combinação de informações e teorias que ocorrem no nível mais baixo para a determinação do processo associado no nível mais alto da escala (PIMENTEL DA SILVA, 2000).

Analizando uma pequena área de captação de chuva, como uma parcela de erosão, por exemplo, através do modelo hidrológico distribuído, obtêm-se parâmetros médios para a calibração do modelo. Aumentando-se a área em estudo para uma micro-bacia, os valores médios obtidos na calibração podem ser o mesmo ou um valor diferente do anterior. Se for igual ou próximo podemos dizer que não houve efeito de escala no parâmetro analisado, o que seria ideal, uma vez que, não havendo o efeito escalonar sobre os parâmetros, o valor médio obtido poderá ser estendido para regiões maiores. Caso o valor obtido tenha uma diferença significativa, podemos dizer que o parâmetro analisado sofreu efeito de escala. Esse efeito pode ser devido às características físico-climáticas da área em análise. Logo, deve-se analisar a magnitude da variação do valor do parâmetro para verificar a tendência de aumento para uma área maior.

2.4 EFEITO DE ESCALA SOBRE PARÂMETROS RELACIONADOS AO ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Alguns estudos realizados demonstraram que a escala da bacia hidrográfica realmente afeta os parâmetros relativos aos processos hidrológicos. Dentre eles, tem-se o estudo de Simanton *et al.* (1996) que encontraram uma relação entre o parâmetro CN do método Curva Número do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos e a área da bacia, utilizando três diferentes métodos em 18 bacias no Estado do Arizona, Estados Unidos. Simanton *et al.*, (1996), chegaram à conclusão que o parâmetro CN diminui com o aumento da área da bacia (Fig. 1). A principal razão atribuída a esse comportamento foi a variabilidade espacial da precipitação e as perdas por infiltração nos canais arenosos presentes nas grandes bacias hidrográficas.

Figura 1 - Variação do parâmetro CN com a escala da bacia hidrográfica
(Fonte: SIMANTON *et al.*, 1996)

Figueiredo (1998) utilizou o modelo SHETRAN (BATHURST e PURNAMA, 1991) com dados da Bacia Representativa de Sumé, para a simulação do escoamento superficial nesta bacia, e verificou que o coeficiente de Manning varia com a escala

da bacia (Fig. 2). O aumento do coeficiente de Manning com a escala da bacia pode ser justificado pelo aumento natural da rugosidade da superfície, seja pela presença de vegetação ou até mesmo pelo próprio relevo.

Figura 2 - Variação do coeficiente de rugosidade de Manning com a área da bacia hidrográfica (Fonte: FIGUEIREDO, 1998)

Lacerda Júnior (2002) utilizou dados da Bacia Representativa de Sumé e da Bacia Experimental de Sumé para analisar o efeito de escala sobre alguns parâmetros do modelo NAVMO (KLEEBERG *et al.*, 1989). Como resultado, foi visto que o parâmetro relacionado ao escoamento superficial (ALFA), e o parâmetro CN, do Método Curva Número, sofrem efeito de escala, diminuindo com o aumento da área da bacia hidrográfica. Já, o coeficiente de rugosidade de Manning aumentou com a área da bacia.

2.5 EFEITO DE ESCALA SOBRE PARÂMETROS RELACIONADOS À PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

Sabe-se que somente uma fração do total de sedimentos erodidos em uma bacia hidrográfica alcança a foz da bacia. A essa fração denomina-se de produção de sedimentos (*Sediment yield*). A razão entre a produção de sedimentos de uma bacia e o total erodido chama-se taxa de entrega de sedimentos (*sediment delivery ratio*). Wade e Heady (1978), citado por Walling (1983), relataram valores da taxa de entrega de sedimentos entre 0,1% a 37,8%.

A magnitude da taxa de entrega de sedimentos de uma bacia será influenciada por vários fatores geomorfológicos e ambientais, incluindo a natureza, extensão e localização das fontes de sedimentos, o relevo, a hidrografia, as condições dos

canais, a vegetação e uso e tipo de solo. Walling (1983) sintetizou, em um gráfico (Fig. 3 e 4), os valores de taxa de entrega e produção de sedimentos em suspensão para várias bacias em diferentes continentes.

Figura 3 - Taxa de entrega de sedimentos versus área da bacia hidrográfica para várias partes do mundo (Fonte: WALLING, 1983)

Figura 4 - Valores da produção de sedimentos em suspensão em função da área da bacia para várias partes do mundo (Fonte: WALLING, 1983)

Figueiredo (1998) analisou o efeito de escala sobre a produção total anual de

sedimentos, utilizando dados de parcelas e micro-bacias da Bacia Experimental de

Sumé, e de sub-bacias da Bacia Representativa de Sumé. Foi encontrado que a produção de sedimentos diminui com

o aumento da área da bacia hidrográfica (Fig. 5).

Figura 5 - Produção de sedimentos versus área da bacia hidrográfica
(Fonte: FIGUEIREDO, 1998)

Lopes (2003) analisou os valores do parâmetro relacionado à erosão por impacto das gotas de chuva do modelo KINEROS2 (c_f). Percebeu que este parâmetro aumenta com o crescimento da área da bacia. O estudo de Lopes é baseado nos dados obtidos em nove parcelas e quatro micro-bacias da Bacia Experimental de Sumé (BES) e Bacia Representativa de Sumé (BRS).

Cruz (2004), analisando a variação do valor do parâmetro relacionado ao escoamento superficial e à erosão, através do modelo WEPP, em relação à área da bacia ou área simulada, verificou que o parâmetro da condutividade efetiva do solo (K_e), parâmetro de erosão em vertentes ou planos (K_i) e o parâmetro de erosão em canais (K_r) sofrem o efeito de escala.

Ainda, segundo Cruz (2004), nas simulações da produção de sedimentos nas sub-bacias da Bacia Representativa de Sumé, os parâmetros K_e , K_i e K_r assumiram valores ainda maiores do que nas escalas menores.

Santos (2008) aplicou também o modelo WEPP, dessa vez em duas sub-bacias com áreas variando entre 0,39 a 0,59 ha. Os resultados obtidos nesse trabalho mostra que o modelo WEPP não permite alterar livremente os parâmetros, pois os mesmos estão associados ou, muitas vezes, estão vinculados com as características do solo, da região e da própria estação climatológica, apesar de possuir um grande banco de dados internos, para a escala objeto do estudo, a erosão por impacto de gotas de chuva,

deixa de ser o processo erosivo predominante para dar lugar à erosão por fluxo concentrado em pequenos sulcos e nos canais

Ver aplicações dos modelos WESP, KINEROS2 e WEPP no trabalho de dissertação de Santos (2008).

3. CONCLUSÃO

Modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos a partir da necessidade de entender melhor o comportamento dos fenômenos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica, facilitando dessa forma, uma análise quantitativa e qualitativa dos processos do ciclo hidrológico, tais como, precipitação, evaporação, interceptação, infiltração, produção de sedimentos, escoamento superficial e subterrâneo.

Dessa forma, pode-se utilizar modelos hidrossedimentológicos para avaliar o comportamento de uma bacia hidrográfica, como, por exemplo, prever as consequências de modificações extremas no uso do solo; as vazões decorrentes de determinadas chuvas intensas; o efeito da construção de açudes; o impacto da urbanização de uma bacia; etc.

Um dos mais importantes fatores que deve ser seguido para a escolha de um ou de outro modelo hidrossedimentológico, seria, a familiaridade do modelador com o

modelo utilizado, pois o melhor modelo, dentre aqueles tecnicamente aplicáveis a problemas específicos, costuma ser aquele que o usuário tem maior sensibilidade sobre o seu uso, ou seja, maior sensibilidade sobre a variação dos parâmetros e o seu efeito nos processos simulados.

Além disso, deve-se ter sempre em mente a possibilidade dos parâmetros do modelo hidrossedimentológico sofrerem efeito de escala, ou seja, seus parâmetros assumirem valores diferentes para diferentes escalas da bacia, devido às heterogeneidades e não-linearidades dos processos hidrológicos que aumentam com a escala da bacia.

Modelos hidrossedimentológicos de base física, principalmente aqueles do tipo chuva, vazão e erosão, são ferramentas muito úteis para os tomadores de decisão e órgãos gestores, visto que, uma vez parametrizados, poderão ser utilizados para a previsão de escoamento superficial e a produção de sedimentos, devido ao evento de precipitação, em bacias não monitoradas, mas que estejam localizadas na mesma região de onde os dados utilizados para a parametrização foram obtidos. Isto auxiliaria na gestão de corpos de água através do conhecimento do aporte de água e sedimentos que chegam a estes mananciais. Os parâmetros destes modelos variam com o tempo, com a escala da bacia

e, conseqüentemente, com a forma da representação (discretização) da bacia para o modelo.

Em regiões semi-áridas, a quantificação do escoamento superficial e produção de sedimentos, são de extrema importância, uma vez que, a vegetação predominante da região é a caatinga, que não possui grande proteção ao impacto das gotas de chuva sobre o solo, e também, devido ao grande desmatamento da região. Além do mais, todo o escoamento e sedimento produzido são carregados para os rios e reservatórios, produzindo o assoreamento e perda da capacidade de acumulação de água, prejudicando o abastecimento das comunidades.

A utilização dos modelos hidrossedimentológicos em pequenas bacias, são imprescindíveis para a quantificação desses fenômenos físicos, podendo os seus resultados serem extrapolados para áreas não monitoradas e hidrologicamente semelhantes, permitindo a estimação de toda a produção, tanto do escoamento como da erosão do solo em toda a região.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, M.B., BATHURST, J.C., CUNGE, J.A., O'CONNELL, P.E. e RASMUSSEN, J. (1986a). An introduction to the European Hydrological System - *Système Hydrologique Européen*, "SHE", 1: History

and Philosophy of a Physically-Based, Distributed Modeling System. **J. Hydrol.**, 87: 45-59.

ABBOTT, M.B., BATHURST, J.C., CUNGE, J.A., O'CONNELL, P.E. e RASMUSSEN, J. (1986b). An introduction to the European Hydrological System - *Système Hydrologique Européen*, "SHE", 2: Structure of Physically-Based, Distributed Modelling System. **J. Hydrol.**, 87: 61-77..

BATHURST, J.C. (1986a). Physically-Based Distributed Modelling of an Upland Catchment Using the *Système Hydrologique Européen*. **J. Hydrol.**, 87: 79-102.

BATHURST, J.C., WICKS, J.M., e O'CONNELL, P.E. (1995). **The SHE/SHESED Basin Scale Water Flow and Sediment Transport Modelling System**. In: V.P.Singh (editor). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, United States.

BATHURST, J. C. e PURNAMA, A. (1991). **Design and Application of a Sediment and Contaminant Transport Modelling System**. IAHS, Proceedings of the Vienna Symposium, Publ. 203, 305-313.

BEVEN, K. e O'CONNELL, P.E. (1982). **On the Role of Physically-Based Distributed Modelling in Hydrology**. Institute of Hydrology, Report 81, Wallingford.

BEVEN, K. (1989). Changing Ideas in Hydrology - The Case of Physically Based Models. **J. Hydrol.**, 105: 157-172.

- BENNETT, J. P. (1974). Concepts of mathematical modeling of sediment yield. **Water Resources Research**, 10(3): 485-492.
- CADIER, E., LANNA, A. E, MENEZES, M. e CATNPELLO, M. S.. (1987). Avaliação dos estudos referentes aos recursos hídricos das pequenas bacias do Nordeste Brasileiro. **Anais do VII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Salvador, ABRH. Vol. 2, p. 225-239.
- CHU, S. T. (1978). Infiltration during an unsteady rain. **Water Resources Research**, 14(3):461-466.
- CRUZ, E. S. (2004). Estudo dos Impactos do Uso do Solo Através da Modelagem da Geração do Escoamento Superficial e Erosão do Solo na Região do Cariri Paraibano. **Dissertação de mestrado**. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Área de Recursos Hídricos.
- DOOGE, J. C. I. (1973). Linear theory of hydrologic systems, **Technical Bulletin** n. 1948, ARS, US Department of Agriculture.
- FIGUEIREDO, E. E. (1998b). Estimativa de Parâmetros Físicos do Solo da Bacia Representativa de Sumé com Base na Textura. Anais em CDROM do IV **Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, Campina Grande, Paraíba, ABRH.
- FIGUEIREDO, E. E. E SRINIVASAN, V. S. (1999). Avaliação dos Impactos do uso do solo e da Influência dos Açudes sobre o Escoamento para o açude Sumé - PB. CD-ROM, **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte - MG.
- FLANAGAN, D.C. e NEARING, M.A.(1995). USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Report No. 10. USDA-ARS National Soil **Erosion Research Laboratory**. West Lafayette, Indiana.
- FOSTER, G. R. (1982). Modelling the erosion process. In: Haan, C. T.; Johnson, H. P. e Brakensiek, D. L., Ed. Hydrologic modeling of small watersheds, St. Joseph, **American Society Agricultural Engineers**, p. 297-380.
- GALVÃO, C. de O . (1990). Modelagem do escoamento superficial e da erosão do solo em microbacias. **Dissertação de mestrado**. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Área de Recursos Hídricos.
- GREEN, W. H. e AMPT, G. A (1911). Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. **Journal Agr. Sci.**, 4(1) : 1-24. Apud Mein & Larson (1 973).
- KLEEBOERG, H. B., OVERLAND, H. e PAUS, B. (1989). NAVMO, Version 1.1, Niedeschlag – Abfluss – Verdunstung Modell. Documentation. **Universität der Bundeswehr München**, Alemanha.
- LACERDA JUNIOR, H. B. (2002). Um estudo dos efeitos de escala e uso do solo na parametrização do modelo NAVMO com dados de bacias do Cariri paraibano. **Dissertação de mestrado**. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Área de Recursos Hídricos.
- LOPES, V. L. (1987a). A numerical model of watershed erosion and sediment yield.

Tucson, 148 p. PhD. **Dissertation, University of Arizona.**

Campina Grande – UFCG. Área de Recursos Hídricos.

LOPES, W. T. A. (2003). Efeitos de Escala na Modelagem Hidrossedimentológica na Região Semi-Árida Paraibana. **Dissertação de mestrado.** Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Área de Recursos Hídricos.

SINGH, V.P. (1995). Watershed Modelling. In: V.P. Singh (editor). Computer Models of Watershed Hydrology, **Water Resources Publication**, Highlands Ranch, Colorado, United States.

MEYER L. D. e WISCHMEYER. (1969). Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. *TRANSACTIONS of the ASAE* 12(6):754-758, 762. Apud Foster (1982).

SIMANTON, J. R., HAWKINS, R. H., SARAVI, M. M. e RENARD, K. G. (1996). Runoff Curve Number Variation with Drainage Area, **Walnut Gulch**, Arizona. *Transactions of the ASAE*, Vol. 39(4): 1391-1394.

NOBREGA, R. S. (2008). Modelagem de Impactos do Desmatamento nos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Jamari (Ro) Utilizando Dados de Superfície e do Trmm. **Tese de Doutorado.** Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas – UACA.

SMITH, R. E., CORRADINI, C. e MELONE, F. (1993). Modeling Infiltration for Multistorm Runoff Events. **Water Resources Research**, 29(1): 133-144.

PIMENTEL DA SILVA, L. e EWEN, J. (2000). Modelagem Hidrológica para Grandes Bacias Hidrográficas: a Necessidade de Novas Metodologias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Vol. 5. no 5, pp.81-92.

SOUSA, G. e FIGUEIREDO, E. E. (2007). Simulação Hidrossedimentológica Em Bacias Do Nordeste Semi-Árido Com O Modelo Distribuído Modfipe. **II International Conference on Water in Arid and Semiarid Lands**, Gravatá-PE

ROVEY, E. W., WOOLHISER, D. A. e SMITH, R. E. (1977). A distributed kinematic model of upland watersheds. Fort Collins, Colorado State University, 52p. **Hydrologic Papers 93.**

TUCCI, C. E. M. (1998). **Modelos hidrológicos**, Ed. Universidade /UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 668p.

SANTOS, L. L. (2008). Modelagem Hidrossedimentológica e Avaliação Comparativa de Três modelos em Pequenas Sub-bacias na Região Semi-Árida Paraibana. **Dissertação de mestrado.** Universidade Federal de

TUCCI, C. E. M. (1987). **Modelos determinísticos.** In: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Modelos para gerenciamento de recursos hídricos, Nobel/.ABRH, p. 211-324.

TUCCI, C. E. M. e CLARKE, R. T. (1997). Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão.

In: **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, N. 1, p135-152

WADE, J. C. e HEADY, E. O. (1978). Measurement of Sediment Control Impacts on Agriculture. **Water Resour. Res.**, 14: 1-8.

WALLING, D. E. (1983). The Sediment Delivery Problem. **Journal of Hydrol.**, 65: 209-237.

WOOLHISER, D. A., SMITH, R. E. e GOODRICH, D. C. (1990). KINEROS: A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual. U. S. Department of Agriculture, **Agricultural Research Service**, ARS-77, 130 pp.