

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/51998289>

# Proposta da aplicação do modelo SWAT como ferramenta complementar de gerenciamento de recursos hídricos e estimativa de assoreamento em reservatórios.

Conference Paper · January 2011

CITATIONS

3

READS

517

4 authors, including:



Julio Issao Kuwajima  
University of São Paulo

22 PUBLICATIONS 56 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Marcus Vinicius Estigoni  
NHC Brasil Consultores - Especialistas em Recursos Hídricos

27 PUBLICATIONS 28 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Frederico Fabio Mauad  
University of São Paulo

86 PUBLICATIONS 86 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Studies for Implementation and Monitoring the Sustainable Development Goal 6 in Brazil View project



Estudos Quantitativos e Qualitativos dos corpos hídricos aplicados ao Reservatório do Lobo e seus Afluentes View project

SYSNO. 3001721  
PROD 22594  
ACERVO-EEB

# **Proposta da aplicação do modelo SWAT como ferramenta complementar de gerenciamento de recursos hídricos e estimativa de assoreamento em reservatórios.**

J.I.Kuwajima<sup>1\*</sup>, D.M.Arantes<sup>1</sup>, M.V. Estigoni<sup>1</sup>, F.F. Mauad<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

\*Email de contato: julio.kuwajima@usp.br

## **Abstract**

The siltation processes results in loss of reservation volume, affecting water availability for irrigation, human consumption, and Power generation. Usually the quantification of silting of dams is done by direct measurement using bathymetry. However it cannot be obtained in a continuous time scale, since the data series is limited to the interval of bathymetrics surveys carried out. This paper proposes the applicability of the models SWAT (Soil and Water Assessment Tool), as a complementary tool to estimate daily sediment generation, as well as a tool for managing water resources, since it is possible to generate future scenarios, so it is possible to assess and make predictions on the effect and impact that actions related to soil conservation practices, urbanizations and agricultural practice may influence the reservoir.

**Keywords:** Siltation, reservoirs, SWAT

## **Resumo**

A geração de sedimentos resulta em assoreamento causando perda de volume de reservação, comprometendo a disponibilidade hídrica para irrigação, para o consumo humano, e para geração de energia. A quantificação do assoreamento de barragens é feita através da medição direta por batimetria, que fornecem medidas reais do assoreamento, no entanto os dados não podem ser obtidos numa escala de tempo contínuo, uma vez que a série de dados está limitada ao intervalo de campanhas de levantamento realizadas. O presente trabalho propõe a aplicabilidade do modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool), como ferramenta complementar de estimativa diária de geração de sedimentos, bem como ferramenta para o gerenciamento de recursos hídricos, já que é possível gerar cenários futuros, assim sendo possível prever como diferentes ações tomadas relacionadas a práticas de conservação de solo, urbanização, conservação da vegetação e de práticas de manejo agrícolas, poderão influenciar na vida útil do reservatório.

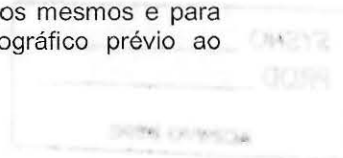
**Palavras-Chave:** Assoreamento, reservatórios, SWAT

## **1. INTRODUÇÃO**

Os reservatórios são usados tanto para abastecimento de água quanto para geração de energia, portanto o volume de água que um reservatório é um aspecto vital para o bom funcionamento dos mesmos. O excedente de água da época de cheia (época de chuvas) é armazenado para ser utilizado na época de seca ou estiagem, o volume disponível para abastecimento ou para geração de energia está diretamente relacionado com a capacidade do reservatório de armazenar água que por sua vez é ligado com a topografia do terreno o qual é construído.

A capacidade de armazenamento dos reservatórios é chamada de capacidade ou volume de reservação, que é o dado-base para a gestão de reservatórios. Todo o gerenciamento de um reservatório é feito através destes dados de volume, geralmente expressados por uma curva que relaciona a cota ou nível da água (profundidade relacionada e um marco de altitude conhecida em relação ao nível do mar) e o volume a ela associado. Sendo assim, com uma simples leitura de régua, se verifica o volume do que o reservatório possui no exato momento. Fornecendo subsídio para se determinar vazões a serem utilizadas em seus diversos usos, a abertura de vertedores, etc.

Nas barragens há a alteração do relevo do fundo do reservatório, geralmente tendo como consequência a perda capacidade de armazenamento devido ao assoreamento. Desta maneira, sedimentos depositam no fundo da barragem, alterando esta capacidade de reservação. Em outras palavras, o volume do reservatório sofre alterações com o tempo, sendo necessário monitoramento constante do nível de assoreamento dos reservatórios para se conhecer a capacidade de reservação real dos mesmos e para atualizar a curva-chave do reservatório, a condição original do levantamento topográfico prévio ao enchimento do reservatório é alterada, passando não mais condizer com a atualidade.



Os principais fatores que afetam a produção de sedimentos na área de drenagem apontados por ICOLD (1989) são a precipitação, tipo de solo e formação geológica; cobertura do solo, uso do solo, a topografia, natureza da rede de drenagem (densidade, declividade, forma, tamanho e conformação dos canais), o escoamento superficial e as características dos sedimentos (granulométricas, mineralógicas etc.).

Quanto maior a idade do reservatório menor será a fidelidade do dado anterior ao enchimento com a condição real, devido a maior quantidade de sedimentos acumulados no reservatório e por isso uma menor capacidade de armazenamento de água, o que pode vir a gerar problemas de gestão.

Mais de 25% da descarga global de sedimentos suspensos é considerada ser retida pelos reservatórios (VÖRÖSMARTY et al. 1997). Este acúmulo de sedimentos infligiu muitos danos desde o fim do século 20: Nos EUA, reservatórios tiveram de ser reformados ou mesmo precisaram ser desativados e removidos; nos rios Eufrates, Mekong, Syr Darya observa-se conflitos de uso da água reservada entre países a jusante e à montante, bem como sedimentação de corpos de água.

Um estudo do Banco Mundial (MAHMOOD, 1987) mostrou que a vida útil média dos reservatórios existentes em todos os países no Mundo decresceu de 100 para 22 anos, sendo avaliado em 6 bilhões de dólares anuais o custo para promover a remoção dos volumes que vão sendo assoreados. Foi demonstrado também que a perda média anual de volume dos reservatórios devido ao depósito de sedimentos era de 1%, sendo variável de país para outro, bem como de região para outra.

Segundo CARVALHO (1994), o assoreamento gradual do reservatório, pode vir a impedir a operação do aproveitamento. No caso de usinas hidrelétricas, isso ocorre quando o sedimento depositado alcança a cota da tomada d'água. Essa retenção de sedimentos no reservatório é de certa forma benéfica, pois promove a limpeza da água para seus diversos usos, embora a sedimentação contínua possa resultar em assoreamento indesejável.

Os custos para recuperação ou desativação das existentes infra-estruturas são provavelmente enormes (WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME, 2009). A reparação, o fortalecimento ou modificação de antigas barragens, por exemplo, implicará em expressivos gastos. Em casos extremos, como nos casos em que é velha e insegura, onde o nível do sedimentado está alto ou em locais onde o fluxo do rio precisa ser mantido para a pesca ou para outros ecossistemas, uma decisão reacionária seria a desativação de uma barragem. A recuperação e a desativação também devem ser escolhidos de acordo com os custos, se os custos de manutenção excederem seus benefícios financeiros e econômicos futuros. (WORLD COMMISSION OF DAMS, 2000)

## 2. BATIMETRIA

Atualmente para se determinar o assoreamento de reservatórios, utiliza-se estudos batimétricos, que consistem no levantamento do relevo do fundo do reservatório, que fornecem o volume atual das barragens, o conjunto de dados históricos de batimetrias fornece dados quantitativos do assoreamento, bem como a previsão do volume útil de uma represa.

Os estudos batimétricos são estudos topográficos subaquáticos que possuem diversas finalidades, como fornecimento de dados para: construção de obras civis, como pontes, canais, etc., manutenção de hidrovias e portos, para garantir o calado da navegação; dragagens; e gestão de reservatórios. Os métodos de levantamento de linhas topobatimétricas e de levantamento de contorno de reservatórios, os mais comuns para levantamento de reservatórios (CARVALHO, 1994).

Através de séries históricas destes estudos é possível obter a taxa de assoreamento de reservatórios, através da comparação dos resultados levantados. Estes estudos são constituídos das seguintes etapas: planejamento de seções batimétricas, o levantamento de campo, o processamento das informações obtidas, a utilização de softwares para a geração de mapas digitais, geração de isolinhas altimétricas (curvas de nível), bem como a geração de curvas cota-área e cota-volume.

As campanhas de estudos batimétricos tendem a ser caras e demoradas, uma vez que é necessário, na fase de coleta de dados, traçar diversas linhas e transectos para na fase de processamento de dados, obter um MDT (Modelo Digital do Terreno) adequado. É necessário também haver dados como um levantamento batimétrico prévio ou a topografia do terreno anterior ao enchimento da barragem para obter a perda de volume por assoreamento.



Estes estudos nos dão medidas reais do assoreamento, no entanto os dados não podem ser obtidos numa escala de tempo contínuo, uma vez que a série de dados está limitada ao intervalo de campanhas de levantamento realizadas, esta frequência depende de vários fatores, sendo os principais a sua capacidade total e a quantidade possível de depósito de sedimento devido à carga sólida dos rios. Em pequenos reservatórios e aqueles cuja carga sólida afluyente é grande devem ser levantados com maior frequência. Por outro lado, reservatórios cuja carga sólida afluyente fica reduzida terão a frequência de levantamento diminuída. Como, por exemplo, no caso em que a área de drenagem foi reduzida pela construção de uma barragem a montante (CARVALHO *et al*, 2000), ou ainda, quando a bacia contribuinte reduziu o valor do deflúvio sólido devido a sua proteção.

Tabela 1 Frequência desejável para levantamentos topo-batimétricos de reservatórios (adaptado de CARVALHO *et al*, 2000)

PORTE DO RESERVATÓRIO	CLASSIFICAÇÃO EM VOLUME ( $10^6 \text{ m}^3$ )	FREQÜÊNCIA DE LEVANTAMENTO
Pequeno	<10	2 anos
Médio	Entre 10 e 100	5 anos
Grande	>100	10 anos

Segundo (ESTIGONI & MATOS *et al*, 2009), até o presente momento ainda não existem uma metodologia padrão para a realização deste estudos e as diferentes metodologias fornecem resultados muito diferentes entre si, devido entre outros aspectos, à incompatibilidade da distribuição da frequência de dados entre eles. Sendo necessários mais estudos para propor uma metodologia padrão, bem como uma metodologia para comparar estas metodologias distintas.

### 3. MODELOS MATEMÁTICOS

Os modelos matemáticos, usados em problemas relacionados aos recursos hídricos, são discretizações e simplificações numéricas dos complexos processos que ocorrem na natureza, a fim de auxiliar pesquisadores e administradores terem uma melhor compreensão dos processos envolvidos e de maneira auxiliar na gestão e tomada de decisões em relação a estes processos.

Estes modelos mostram ser úteis uma vez que monitorar todos os processos que ocorrem em cada terreno e curso de uma bacia é inviável e muito caro, estes modelos permitem entender e reproduzir eventos que ocorreram no passado de forma permitir que possamos planejar eventos parecidos no futuro, estes modelos permitem simular e avaliar o impacto que mudanças que ocorram na bacia, rio ou reservatório podem influenciar a disponibilidade e a qualidade da água, e dessa forma promover a proteção e o uso racional dos recursos hídricos, bem como auxiliar a melhoria e a prevenção de problemas relacionados a estes recursos.

Os modelos hidrológicos podem ser tanto usados para prever, quanto para investigar os fenômenos físicos de uma bacia hidrográfica: Modelos de previsão são usados para obter uma resposta específica para um problema específico, enquanto que os de investigação servem para aprofundar o conhecimento dos processos hidrológicos (GRAYSON *et al.*, 1992).

#### 3.1. Modelos matemáticos de estimativa de sedimentação

A estimativa da erosão hídrica desempenha um importante papel no planejamento, avaliação de uso e ocupação do solo e para o manejo do mundo, não somente nos EUA, mas como na maioria das regiões

do mundo. A principal ferramenta tem sido a equação universal de perda de solo (EUPS ou USLE), que foi desenvolvida por WISCHMEIER & SMITH (1961).

O desenvolvimento de equações matemáticas para estimar a erosão do solo e os efeitos da conservação escolhida, tipo de culturas, práticas de manejo em perdas de solo começou em por volta dos anos 1940, com ZINGG, A.W. (1940) e SMITH, D.D. (1941). Através da análise de mais de uma extensa base de dados a USLE (equação universal de perda de solos), foi lançada em 1961 (WISCHMEIER & SMITH, 1961), sendo revisada posteriormente e atualizada em 1965 e 1978 (WISCHMEIER & SMITH, 1965, 1978).

A RUSLE, a versão revisada da USLE foi desenvolvida para ser uma versão computadorizada da USLE (RENARD et al, 1997). A mesma estrutura da fórmula usada na USLE é usada na RUSLE, porém com diversas melhorias foram feitas, como um sub-fator para avaliar e ajustar valores para o tipo de cobertura do solo, novas equações para calcular a declividade e comprimento das vertentes, bem como outros recursos que a USLE não possui.

Conforme o conhecimento sobre os processos evoluíam, as limitações da USLE se tornaram mais aparentes, como a dificuldade de aplicá-la às novas culturas desenvolvidas e novas técnicas de manejo, bem como a inaptidão da fórmula para atuar em condições para as quais não foi desenvolvida para. Mesmo com suas limitações a USLE tem sido bem sucedida nas tarefas de predição e estimativa da erosão hídrica e como ferramenta de escolha de medidas de conservação de solo e técnicas de manejo.

### 3.1.1. USLE

Segundo (SANTOS et al 2001), o USLE é o modelo de predição de erosão hídrica mais conhecido, inclusive no Brasil, devido ao fato à da simplicidade de seus parâmetros envolvidos e da facilidade de ser implementado. Diz ainda que a USLE possui caráter bastante empírico, o que significa que os resultados estão bastante relacionados às condições de calibragem do ponto quantitativo.

A equação universal de perda de solos, estima a perda média anual de solos usando chuvas, solo, topografia e práticas de manejo, ela é representada pela seguinte equação:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

A = Perda de Solo anual por unidade de área;

R = Fator chuva, erosividade;

K= fator erodibilidade do solo;

L= fator comprimento do declive;

S= fator grau do declive;

C= fator uso e manuseio;

P= fatora prática conservacionista.

### 3.2. SWAT

SWAT é acrônimo para 'Soil and Water Assessment Tool, modelo em escala de uma bacia de um rio, ou bacia hidrográfica, desenvolvido pelo Dr. Jeff Arnold para o USDA-ARS (United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service). O SWAT foi desenvolvido para predizer o impacto das práticas de manejo de solo na água, a geração de sedimento e aporte de agrotóxicos em grandes e complexas bacias hidrográficas que apresentem grande variedade de solos, usos e ocupações do solo e técnicas de manejo através de longos períodos de tempo (NEITSCH et al, 2005).

O SWAT é um modelo físico, com escala espacial de bacias hidrográficas, de escala temporal contínua e parâmetros distribuídos que utiliza informações espacialmente distribuídas de topografia, uso e ocupação do solo e de clima para modelação hidrológica e que opera em escala de tempo diária (ARNOLD et al., 1998). Baseado na topografia, o modelo subdivide a bacia em um número de subbacias com intenção de simulação apenas. As subbacias delineadas dentro do modelo são simuladas como áreas homogêneas em relação às condições climáticas, outras subdivisões são feitas dentro de cada subbacia para representar áreas homogêneas quanto suas características pedológicas, de uso e ocupação e de topografia, estas novas áreas subdivididas são as chamadas HRUs ou unidades de resposta hidrológica.

O modelo apresenta três grandes componentes, subbacias, reservatório e canais, cada um destes componentes apresenta diversos subcomponentes. Por exemplo, o componente subbacia consiste de oito subcomponentes: hidrologia, clima, sedimentação, umidade do solo, crescimento de culturas, manejo agrícola e pesticidas. O subcomponente Hidrologia é composto por: *runoff*, fluxo de subsuperfície lateral, percolação, fluxo de água subterrânea, derretimento de gelo, evapotranspiração, perdas de cargas e lagoas.

Para o balanço hídrico em cada HRU da bacia, são considerados quatro volumes de armazenamento: cobertura de neve, camada radicular (0-2 m), aquífero raso (2-20 m) e aquífero fundo (> 20 m). A camada radicular pode ser subdividida em diversas camadas. Para o método de curva número SCS, o excesso de água disponível após a contabilização para as abstrações iniciais e *runoff*, infiltra no solo. Uma técnica para o cálculo da rota da água armazenada é simular o fluxo através de cada camada de solo. O modelo SWAT simula diretamente apenas o fluxo saturado, assumindo que a água está uniformemente distribuída dentro da camada em questão. O fluxo não-saturado entre as camadas é obtido indiretamente através de funções de evaporação do solo e da absorção da água pelas plantas. O fluxo descendente ocorre quando a camada de solo logo abaixo não se encontra saturada e a quantidade de água na camada de solo excede sua capacidade de campo, o fluxo descendente é induzido pela condutividade hidráulica saturada.

O fluxo lateral é simulado através de técnicas cinemáticas baseadas na declividade, comprimento do declive e condutividade saturada. O fluxo ascendente das camadas inferiores para as camadas superiores é regido pelas taxas de capacidade de campo entre as duas camadas. A percolação da parte inferior da zona radicular recarrega o aquífero raso.

Para a simulação da produção de sedimentos, o SWAT utiliza-se da Equação Universal de Perda de Solos Modificada. Esta equação calcula a quantidade de solos erodida em um HRU que será transmitida em um canal da subbacia na qual está incluída.

Ele tem sido usado extensivamente na Europa, incluindo projetos patrocinados por várias Agências da Comissão Europeia. Vários modelos incluindo o SWAT foram usados para quantificar os impactos da mudança climática para cinco diferentes bacias hidrográficas europeias, e um conjunto de nove modelos incluindo o SWAT, foi testado em 17 bacias hidrográficas europeias diferentes (GASSMAN et al, 2007). Diversos países desenvolveram versões modificadas do SWAT como SWAT-Korea e SWAT-Germany.

### 3.2.1. Desenvolvimento histórico do modelo

O SWAT é resultado de quase 30 anos de pesquisas feitas sobre modelos hidrológicos e erosivos conduzidos pela USDA-ARS (*U. S. Department of Agriculture— Agriculture Research Service*). Este modelo é reconhecido internacionalmente como uma robusta e interdisciplinar ferramenta de modelação de bacias hidrográficas, o que é evidenciado pelas conferências anuais internacionais sobre SWAT, e publicações relacionadas ao modelo apresentadas em outros encontros científicos e revistas científicas.

Segundo GASSMAN et al.(2007), as origens do modelo atual do SWAT é resultado direto de revisões e alterações do SWRRB (*Simulator for Water Resources in Rural Basins*). Este software foi desenvolvido pela USDA nos anos 80, para a gestão de impactos na água e movimento de sedimentos de bacias rurais não monitoradas nos EUA.

De acordo com o mesmo autor, o modelo SWRRB é resultado da fusão de modelos anteriores desenvolvidos pela USDA-ARS como o CREAMS (*Chemicals, Runoff and Erosion from Agriculture Management Systems*), o GLEAMS (*Groundwater Loading Effects on agricultural Management Systems*) e o EPIC (*Environmental Impact Policy Climate*).



O SWRRB começou a ser desenvolvido no início da década de 1980, com a modificação da rotina de chuva do CREAMS. Entre as melhorias incorporadas ao modelo, que podem ser citadas são: o aumento da superfície de *runoff* e de outros cálculos, de apenas um campo, para até 10 subbacias, para a previsão da produção de água em uma bacia; o aperfeiçoamento do método do cálculo de pico de *runoff*; cálculo de perdas de carga; e a adição de novas rotinas com: fluxo de retorno de água subterrânea, armazenamento de reservatórios, o modelo para crescimento de culturas do EPIC, um simulador de clima e transporte de sedimentos. Outras modificações foram feitas ao SWRRB no final dos anos 80, ao modelo foram incorporados o componente do GLEAMS para destino de pesticidas e um método opcional da USDA-SCS (*USDA Soil Conservation Service*) para estimar taxas de picos de *runoff*. Este arsenal de ferramentas aumentou a aptidão deste modelo para lidar com uma vasta gama de problemas relacionados à gestão da qualidade de água em bacias hidrográficas.

O modelo ROTO (*Routing Outputs to Outlet*), foi desenvolvido para resolver outra deficiência do SWRRB, o modelo só podia tratar bacias divisíveis em até 10 subbacias, com extensão limitada até 100 km<sup>2</sup>. Este novo modelo conectava os dados gerados por várias simulações do SWRRB unificando-os em um único resultado. Porém esta nova rotina mostrou-se ser muito pesada, exigindo muito armazenamento computacional, uma vez que eram necessários muitos dados de entrada e saída do SWRRB para combiná-los posteriormente em um único arquivo final. Era necessário rodar o SWRRB várias vezes independentemente para depois alimentar o ROTO com estes resultados para assim gerar o resultado final.

O modelo SWAT foi então concebido solucionando esta dificuldade, ambos os modelos SWRRB e ROTO foram mesclados em um único modelo. Desde sua criação no começo da década de 1990, o SWAT foi constantemente revisado, atualizado e expandido, desta forma aumentaram as potencialidades do modelo. O esquema do desenvolvimento do modelo pode ser visualizado na figura abaixo.

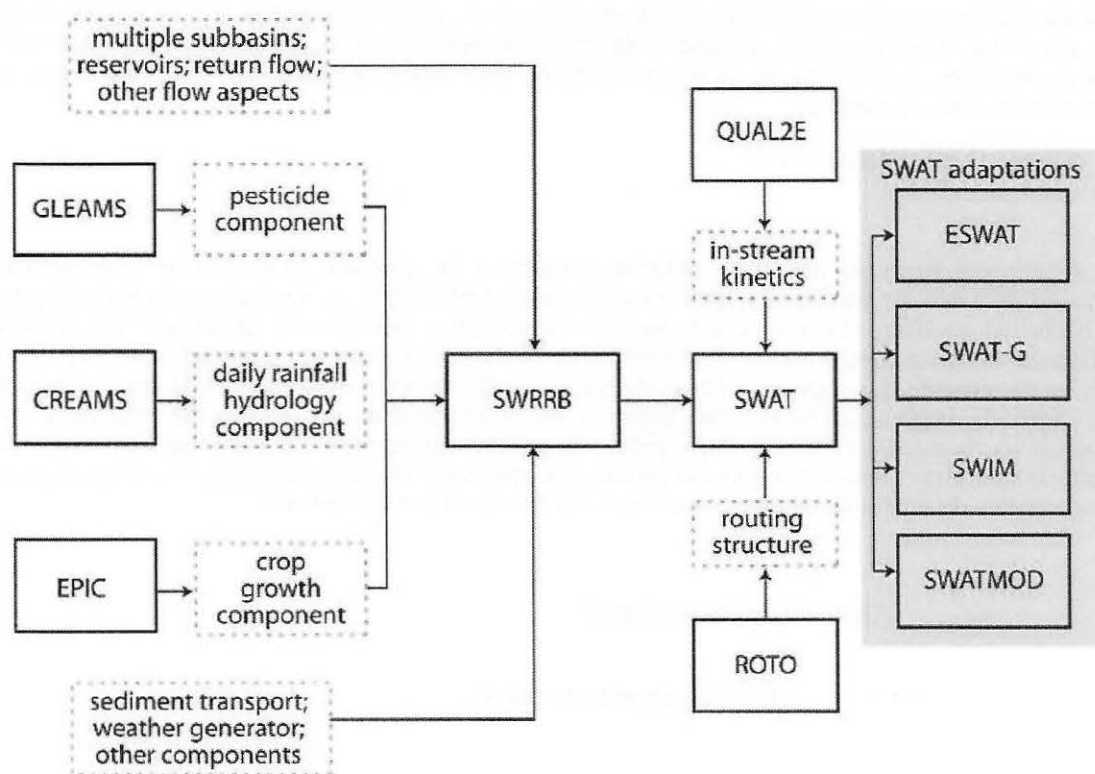


Figura 1 Esquema do desenvolvimento histórico do SWAT (GASSMAN *et al.* 2007)

### 3.2.2. Potencialidades do SWAT

O desenvolvimento primário do modelo enfatiza principalmente impactos do clima e práticas de manejo, carga para a qualidade de água e sua destinação, flexibilidade na discretização de bacias e simulação de tempo contínua. E graças aos avanços na tecnologia de processamento e de armazenamento de dados simulações para extensas áreas são possíveis.

Nos últimos anos, o emprego do modelo e o leque de aplicações em que o SWAT foi aplicado está em franca expansão, o modelo prova ser uma ferramenta robusta e flexível que pode ser aplicada para simular diversos problemas em uma bacia hidrográfica.

Embora, o modelo possua algoritmos para calcular diferentes constituintes dinâmicos de uma bacia hidrográfica, o modelo só conseguirá descrever estes processos se forem usados dados de entrada de qualidade. Os dados de entrada, que descrevem a estrutura física da bacia, são geralmente associados ao modelo através de uma interface SIG.

Os dados de entrada do modelo SWAT estão organizados para terem atributos espaciais. O modelo fornece três níveis espaciais: o de bacia hidrográfica, de subbacias e o de unidades de resposta hidrológicas ou HRUs. Para cada nível há um conjunto de parâmetros e dados de entrada para atribuição. O nível espacial maior, o de bacia hidrográfica, remete-se a toda área representada pelo modelo; o nível de subbacias remete-se às subdivisões da bacia-hidrográfica que são hidrologicamente conectadas. As subbacias são então subdivididas em HRUs, que são representação de áreas dentro das subbacias que apresentem características de solo, uso e ocupação do terreno e de declividades consideradas iguais.

Tanto as subbacias quanto as HRUs são definidas pelo usuário, ou seja, o usuário é quem define os parâmetros para tais subdivisões, desta forma fornecem aos usuários algum controle sobre os resultados obtidos pelo modelo SWAT

Muito embora o modelo utilize-se da escala diária para as simulações, existe a opção de utilizar outras escalas temporais nos resultados das simulações, as opções de escala temporal para os dados de saída são diária, mensal e anual. Os dados de saída são apresentados em arquivos no formato de texto e de banco de dados, nas categorias de volume de fluxo, taxa de produção de sedimentos, taxa de nutrientes e taxa de biomassa de plantas

### 3.2.3. Limitação do SWAT

A principal limitação para a modelação hidrológica de grandes áreas é o detalhamento espacial necessário para simular de maneira correta os processos ambientais, um exemplo disso é a precipitação em uma bacia hidrográfica, ela não ocorre de maneira uniforme, por isso há dificuldade em representar a variabilidade espacial destes dados. Outra limitação do modelo é referente à precisão das HRU ao simular variações de terrenos que incluem práticas de conservação, como por exemplo, HRU em que se pratique a preservação da vegetação ripária. Os arquivos de dados podem ser difíceis de manipular, podendo apresentar vários registros faltando. Outro problema comum à modelação que também é presente no SWAT é o fato de que suas simulações são tão precisas quanto seus dados de entrada. O modelo é incapaz de simular eventos de enchente detalhados e o encaminhamento dos sedimentos.

## 4. OPERAÇÃO DO MODELO

### 4.1.1. Dados de entrada do SWAT

Os dados de entrada do SWAT abrangem são: A área de toda bacia hidrográfica, área da sub bacia hidrográfica, a unidade de resposta hidrológica ou (HRU), os reservatórios, descargas nos corpos de água, dados do solo (número de camadas do perfil pedológico, grupo hidrológico, fração de porosidade, profundidade das camadas, capacidade de carga, condutividade hidráulica saturada, fator erodibilidade K da EUPS etc..), dados climáticos (dados diários de precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar e evapotranspiração), dados do número da curva de escoamento superficial (CN) e informações referentes à cobertura do solo.



#### 4.1.2. Divisão de subbacias

O SWAT divide a bacia em sub bacias e em seguida gera as HRU (Unidades de resposta hidrológica), esta divisão é feita baseada nos usos e ocupações do solo e nas informações do solo (tipos pedológicos e declividade). O SWAT permite também especificar os critérios de distribuição destas HRU, sendo possível optar por dois tipos de distribuição uma única HRU ou HRUs múltiplas para a subbacia.

#### 4.1.3. Curva Número

A Curva Número, o CN é uma técnica para cálculo de runoff desenvolvida pelo Serviço de Conservação de Solos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos na década de 50. O método passou por diversas revisões desde sua implementação.

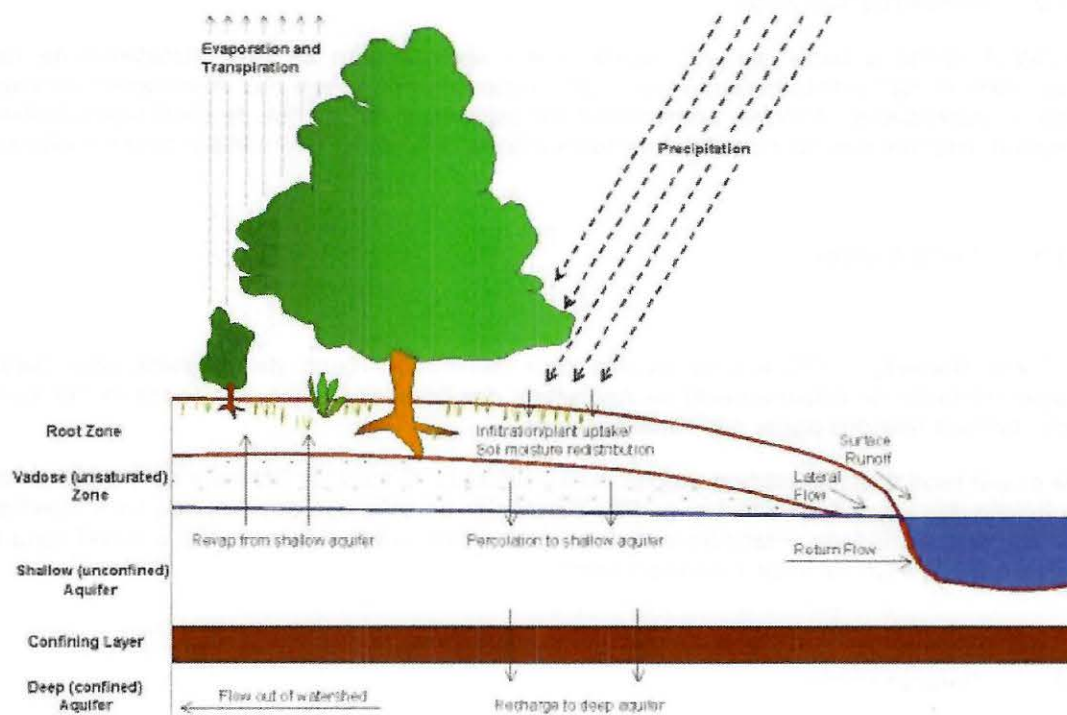
Ela é uma técnica consolidada e simples de ser utilizada. O valor da CN varia de 1 a 100 sendo este valor em função das seguintes variáveis: padrão hidrológico do solo; uso e manejo da terra; condições da superfície do solo; e umidade antecedente. Sendo que quando o CN é igual a 100 o runoff seria igual à chuva total e quando o CN for igual a 1 não há runoff.

#### 4.2. Balanço Hídrico

O balanço hídrico, que é uma consideração primária do modelo para cada HRU "*Hidrologic Response Units*", está representada conforme em (Arnold *et al.*, 1998).

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (2)$$

Onde SW (mm) é o conteúdo de água no solo, i é o tempo em dias para o período de simulação t (dias), e R (mm) a precipitação diária, Q (mm) escoamento superficial ou "*runoff*", ET é a evapotranspiração, P a percolação (mm) e QR (mm) o fluxo de retorno. Os processos descritos na equação estão ilustrados na figura 5 abaixo.



**Figura 2** Ciclo Hidrológico considerado pelo modelo SWAT (NEITSCH *et al.*, 2001)

Os dados de água entram nos limites do sistema do modelo de bacia hidrográfica do SWAT, predominantemente na forma de precipitação. Os dados de entrada de precipitação para os cálculos hidrológicos podem ser dados medidos, ou dados simulados pelo gerador de clima disponível dentro do modelo SWAT. A precipitação é particionada em diferentes cursos de água, dependendo das características do sistema. O balanço hídrico de cada HRU na bacia contém quatro volumes de armazenamento: neve, perfil do solo (0-2 m), o aquífero raso (2-20 m) e do aquífero profundo (> 20 m). O perfil de solo pode estar sub-dividido em várias camadas. Os processos de água no solo incluem infiltração, percolação, evaporação, absorção pelas plantas, e fluxo lateral. O escoamento superficial "*runoff*" é estimado utilizando o número da curva SCS ou a equação de infiltração Green-Ampt. (ARNOLD *et al.*, 1998).

As cargas do fluxo de sedimentos, nutrientes, pesticidas e bactérias dos planaltos para o canal principal são feitas pelas redes de fluxo da bacia. A corrente de processos modelados pelo SWAT é mostrada na figura 6.

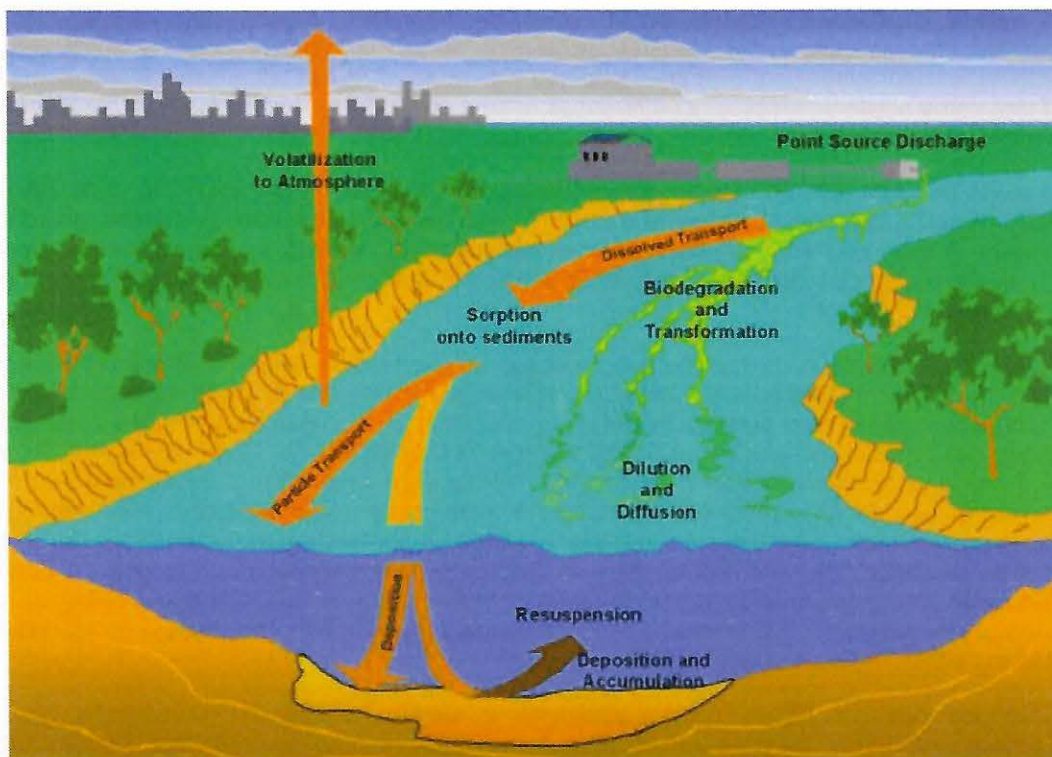


Figura 3: Processos ecológico considerado pelo modelo SWAT (NEITSCH *et al.*, 2001)

#### 4.3. Balanço de sedimentos

A rotina utilizada pelo modelo para simular a erosão de uma bacia utiliza a Equação Universal de Perda de Solos Modificada (EUPSM) ou “*Modified Universal Soil Loss Equation*” MUSLE. Esta equação estima a produção de sedimentos Sed (ton) a partir do volume do escoamento superficial (mm), do pico da taxa de escoamento superficial (m³/s), da área da HRU (ha), utiliza também parâmetros da Equação Universal de Perda de Solos (EUPS) ou “*Universal Soil Loss Equation*” (USLE) desenvolvida por WISCHMEIER & SMITH (1978): K erodibilidade do solo, C de cobertura e manejo do solo, P de práticas conservacionistas e LS parâmetro referente à topografia. A fórmula do MUSLE é dada abaixo:

$$Sed = 11,8 \times (Q_{surf} \times q_{psak} \times area_{HRU})^{0,56} \times K_{USLE} \times C_{USLE} \times P_{USLE} \times LS_{USLE} \quad (3)$$

Segundo o manual do modelo (NEITSCH *et al.*, 2001), após a produção de sedimento ser avaliada através da equação MUSLE, o SWAT corrige esse valor posteriormente considerando efeitos relacionados a neve e retardamentos e atrasos dos sedimentos devido ao escoamento superficial. O modelo calcula também a contribuição de sedimento para canais de fluxo a partir de fontes subterrâneas e laterais. Os sedimentos erodidos, que entram nestes canais, são simulados como sendo transportados a jusante pela deposição e degradação

#### 5. Calibração



Para melhor eficiência do modelo SWAT, que é semi-empírico, é necessário comparar os dados gerados por ele com os observados. Através da análise de sensibilidade é possível determinar quais variáveis são mais importantes para o modelo local, ou seja quais variáveis influenciam mais os resultados. Esta etapa tem como objetivo minimizar as diferenças entre o observado e resultados do modelo através do ajuste dos parâmetros do modelo.

Esta etapa de calibração do modelo possui três etapas principais, a de calibração, a de validação e de verificação. A calibração com já dito seria o ajuste dos valores estimados através do teste dos dados de entrada e saída, a validação seria a etapa onde os resultados do modelo seriam comparados sem que houvesse o ajuste e a verificação seria o estudo da técnica numérica para assegurar que esta representa realmente o modelo conceitual.

A calibração e validação do modelo é o processo de avaliação e teste de diferentes aspectos do modelo, a fim de refinar, melhorar e aumentar a confiabilidade das estimativas do modelo de forma que permitam um melhor julgamento para as tomadas de decisões. O processo de validação a ser utilizado, para que haja uma precisão satisfatória, é o Split Sample Test Method (XU, 1999), neste método, a série temporal é dividida em três: aquecimento do modelo, calibração e validação. O aquecimento do modelo, geralmente no começo da série temporal dos dados, é usada para iniciar condições para subseqüentes simulações. O procedimento de calibração, é a etapa aonde os parâmetros mais sensíveis são ajustados para otimizar os resultados das simulações. Já a validação envolve a aplicação do modelo calibrado sem qualquer alteração por outro período temporal. Nesta etapa espera-se que o modelo responda com a mesma precisão do período de calibração. Caso isto ocorra o desempenho do modelo estará validado e apta ser utilizada para simulações daí por diante.

A fidelidade das simulações com a realidade é aferida através da comparação dos dados hidrográficos simulados com os observados. Esta comparação é possível tanto por funções objetivas WILLMOTT (1981), NASH AND SUTCLIFFE (1970) ou por obtida graficamente, por exemplo comparando os gráficos de picos de vazões simuladas com os gráficos de vazão observados.

Os testes mais utilizados para a calibração são por tentativa e erro, o método automático para estimativa de parâmetros ou uma combinação dos dois.

#### 5.1.1. Coeficientes de correlação de Pearson

Os coeficientes de correlação de Pearson são utilizados como testes globais de eficácia de ajuste. Um  $r$  pequeno é desejado, uma vez que um valor grande é geralmente interpretado como sendo indicador de má eficácia de ajuste do modelo. O coeficiente de correlação do produto-momento tipicamente denotado pelo  $r$  mede a correlação entre duas variáveis  $X$  e  $Y$ , linearmente dependentes entre si, seu valor varia entre +1 e -1. A partir de dados pareados ( $X_i$ ,  $Y_i$ ), a correlação de Pearson da amostra é calculada como:

$$r = \frac{\sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})(Y_t - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

Onde  $\bar{X}$  e  $\bar{Y}$  representam a amostra de médias de  $X$  e  $Y$ , respectivamente

O índice de ajuste  $R^2$  mede a fração da variabilidade total em resposta ao que é estimado pelo modelo. Seu valor varia de 1 (ajuste perfeito) até 0.

#### 5.1.2. Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe



O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe ( $E_f$ ) é uma estatística confiável usada amplamente na avaliação de eficácia de ajuste em modelos hidrológicos. Os valores de  $E_f$  variam de 1 até  $-\infty$ , onde  $E_f=1$  indica uma combinação perfeita entre os dados medidos e os observados;  $E_f = 0$  corresponde aos valores simulados pelo modelo como sendo iguais as médias dos valores medido; já um valor negativo para  $E_f$  demonstra que os valores simulados são inadequados em relação aos observados,

O Comitê tarefa sobre definições de critérios para avaliação de modelos de bacia hidrográfica ASCE (ASCE, 1993) recomendam os coeficientes de Nash-Sutcliffe para avaliação de modelos contínuos de cálculo unidade.  $E_f$  é calculado como:

$$E_f = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^n (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (5)$$

Onde  $Q_o$  é a descarga observada e  $Q_m$  é a descarga modelada, ou simulada em um tempo  $t$ .

### 5.1.3. Índice de concordância (d)

O índice de concordância é a medida de conformidade entre o runoff estimado e o medido (LEAGATES & McCABE, 1999; WILMOTT, 1984; e WILMOTT, 1981). HIEPE & DIEKKRÜGER (2007), CHEKOL (2006) utilizaram tal índice com sucesso nos últimos anos. O modelo foi desenvolvido para superar a falta de sensibilidade de correlação baseado nas diferenças de médias de amostras e variâncias dos valores observados e medidos. (WILMOTT, 1981 e 1984).

$$d = 1,0 - \frac{\sum_{t=1}^n (O_t - P_t)^2}{\sum_{t=1}^n (|P_t - \bar{O}| + |O_t - \bar{O}|)^2} \quad (6)$$

Onde  $O_i$  é o valor observado;  $P_i$  é o valor simulado pelo modelo para os valores  $O_i$ .

## 6. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS

O uso em conjunto de dados batimétricos com modelos hidrológicos matemáticos, podem ser usados para a gestão destes recursos hídricos. A ferramenta da modelação pode fornecer dados para preencher esta lacuna temporal aonde não existem dados batimétricos, como uma ferramenta para tomada de decisões.

O SWAT (Soil and Water Assessment Tool) é uma descrição matemática usada para representar os processos erosivos dos solos. Associado a um Sistema de Informação Geográfica (SIG) pode ser usado para modelar as taxas de perda de solo, assoreamento dos corpos d'água, estruturas de controle de erosão, avaliação de práticas de manejo e estudo e planejamento ambiental. Estas equações podem usadas para avaliar e estudar as condições atuais e futuras de conservação de solo, e assim estimando as vulnerabilidades da bacia em sofrer erosão hídrica e gerar o assoreamento dos reservatórios por transporte de sedimentos.

Estes modelos uma vez calibrados, validados e verificados podem fornecer dados de estimativa da taxa de assoreamento na base temporal de dias, assim fornecendo informações importantes para as políticas de gerenciamento de um reservatório que os dados nos intervalos de anos dos levantamentos

batimétricos não fornecem, como por exemplo, o efeito na taxa de assoreamento, que uma mudança do uso e ocupação do solo ocasionou, ou mesmo a prevenção de impactos futuros através da análise dos impactos para cenários futuros para distintos usos e ocupação dos solos.

Além da estimativa da taxa de assoreamento da represa, outra aplicação para o modelo que pode ser aplicada para o gerenciamento do reservatório é a de geração de cenários e simulação de condições hipotéticas para a região de estudo, a fim de se observar impactos gerados pelas e resultados das alterações impostas em cada cenário. Como por exemplo, o efeito na taxa de assoreamento causado pela degradação das margens da represa para um período de 20 anos, ou o efeito na taxa de assoreamento da recuperação e reflorestamento da área de estudo para o mesmo intervalo de tempo.

## 7. Resultados esperados

Espera-se obter com esta pesquisa uma análise do modelo SWAT, quanto suas potencialidades como uma ferramenta para tomada de decisões e como ferramenta para avaliar assoreamentos de reservatórios. Outros frutos desta pesquisa seriam valores e parâmetros para a calibração do modelo para a região de estudo, o mapeamento das áreas mais críticas do entorno do reservatório em relação à produção de sedimentos e expectativas da vida-útil do aproveitamento hidrelétrico para diferentes cenários de uso e ocupação do terreno.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARNOLD, J. G., R. SRINIVASAN, R. S. MUTTIAH, AND J. R. WILLIAMS. (1998). *Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development*. Journal of the American Water Resources Association 34: 73-89.

CARVALHO, N. O. (1994), "Hidrossedimentologia Prática", CPRM – Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais. Rio de Janeiro-RJ.

CARVALHO, N.O. et al. (2000) Guia de Avaliação de Assoreamento em Reservatórios. Brasília:ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica – Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas , 2000. 132p.

CHEKOL, D.A. (2006) *Modelling of Hydrology and Soil Erosion of Upper Awash River Basin*. PhD Thesis, University of Bonn: 233pp

DI LUZIO, M., R. SRINIVASAN, J.G. ARNOLD , AND S.L. NEITSCH. (2002). *Soil and Water Assessment Tool. ArcView GIS Interface Manual: Version 2000*. GSWRL Report 02-03, BRC Report 02-07, Published by Texas Water Resources Institute TR-193, College Station, TX. 346p.

ESTIGONI, M. V. & MATOS, A. J. (2009), "Comparação de Diferentes Batimetrias do Reservatório da Usina Hidroelétrica do Lobo", XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande, MS.

GASSMAN, P.W., M. REYES, C.H. GREEN, AND J.G. ARNOLD. (2007). *The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future directions*. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers (Invited Paper Series) 50(4): 1211-1250.

GRAYSON, R.B., MOORE, I.D., E MCMAHON, T.A. (1992). "Physically-based hydrologic modeling: Is the concept realistic?", *Water Resources Res.* 26, 2659-2666.

HIEPE, C. AND DIEKKRÜGER, B. (2007) *Modelling soil erosion in a sub- humid tropical environment at the regional scale considering land use and climate change*. Book of abstracts, 4th International SWAT conference, UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft, The Netherlands. July 4-6, 2007

ICOLD (International Commission of Large Dams). 2003. *World Register of Dams 2003*. Paris: International Commission of Large Dams.

ICOLD, International Commission on Large Dams (1989). *Sedimentation control of reservoirs/Maîtrise de l'alluvionnement des retenues*. Committee on Sedimentation of Reservoirs. Paris

LEGATES, D. R. & MCCABE, G. J. (1999) *Evaluating the use of goodness-of-fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation*. *Water Resources Research*, 35, 233-241

e geoprocessamento Tese (doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de quieroz, Piracicaba.

MAHMOOD, K. (1987). *Reservoir sedimentation – impact, extent and mitigation*. World Bank Tech. Paper No. 71. Washington, DC.

NASH, J. E. & SUTCLIFFE, J. V. (1970) *River flow forecasting through conceptual models*. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290

NEITSCH, S.L., ARNOLD, J.G., KINIRY, J.R., WILLIAMS, J.R., (2005). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2005*. Grassland, Soil and Water Research Laboratory; Agricultural Research Service; USA.

RENARD, K. G., G. R. FOSTER, G. A. WEESIES, D. K. MCCOOL, and D. C. YODER. 1997. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Agriculture Handbook No. 703. Washington D.C.: USDA.

SANTOS, I. et al. *Hidrometria Aplicada*. Curitiba: LATEC, 2001. 372 p.

SMITH, D. D. 1941. Interpretation of soil conservation data for field use. *Agric. Eng.* 22(5): 173-175.

VÖRÖSMARTY, C. J., M. MEYBECK, B. FEKETE, and K. SHARMA. 1997. The Potential Impact of Neocartorization on Sediment Transport by the Global Network of Rivers. In *Proceedings of the Fifth IAHS Scientific Assembly at Rabat, Morocco, April-May 1997*, eds.

WCD (World Commission of Dams). 2000. *Dams and Development: A New Framework for Decision-Making*. London: Earthscan.

WILLMOTT, C.J. (1981) *On the validation of models*. *Physical Geography* 2, 184-194.

WILLMOTT, C.J. (1984) *On the evaluation of model performance in physical geography*. In *Spatial Statistics and Models*, G.L. Gaile, and C.J. Willmott (Editors). D. Reidel, Dordrecht, 443-460

WISCHMEIER, W. H., and D. D. SMITH. 1961. A universal equation for predicting rainfall-erosion losses: An aid to conservation planning in humid regions. Special Report No. 22-66. Washington D.C.: USDA-ARS.

WISCHMEIER, W. H., and D. D. SMITH. 1965. *Predicting Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains: Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation*. Agriculture Handbook No. 282. Washington D.C.: USDA.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning*. USDA: Agricultural Handbook No. 537, Washington, 537

WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. (2009). *The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World*. Paris: UNESCO Publishing, and London: Earthscan.

XU, C. (1999) *Operational testing of a water balance model for predicting climate change impacts*, *Jou Agricultural and Forest Meteorology*, 98-99, 295-304

ZINGG, A. W. 1940. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff. *Agric. Eng.* 21(2): 59-64.