

INTRODUÇÃO

Problemática e justificativa

O entendimento de que a água é um bem abundante e ilimitado não é mais aceito. Nos dias atuais há uma conscientização crescente de que as atividades humanas causam impacto no meio ambiente muitas vezes de difícil superação. Entre os exemplos estão as mudanças provocadas pelas práticas agrícolas que envolvem o desmatamento e muitas vezes não levam em consideração o uso racional e conservacionista da água. Em consequência, o processo natural de armazenamento da água no solo e recarga dos aquíferos é incapaz de restabelecer seu equilíbrio quantitativo e qualitativo.

O Brasil possui uma das maiores reservas de água doce do planeta. Em algumas regiões com excelentes níveis de precipitação anual. No entanto, defronta-se com distribuição espacial e temporal não uniforme das chuvas, anomalias e variabilidade natural climática, e situações de risco quanto à disponibilidade dos recursos hídricos intrínsecas aos sistemas naturais. Além das áreas originalmente semiáridas da região Nordeste, aquelas onde a água é abundante têm estado também sujeitas às perdas das características naturais pela ocupação irregular e uso inadequado do solo com atividades que alteram a quantidade e qualidade das águas (ANA, 2007).

Nas áreas rurais o impacto das práticas não conservacionistas do solo implicam na escassez e desabastecimento para os usos consuntivos. Este problema deve ser enfrentado e resolvido de maneira integrada nos níveis local e regional. A abordagem precisa ser multissetorial com foco no monitoramento do sistema hidrológico, avaliação e controle contínuo, frente às demandas humanas, de maneira que ações de curto e médio prazo pelas instâncias de governo não tenham caráter somente mitigador. As soluções devem ser coordenadas e baseadas em políticas efetivas em busca do desenvolvimento sustentável.

O aproveitamento dos recursos hídricos depende da priorização de ações públicas com foco em considerações de caráter legal, político, ambiental, social e econômico. No Brasil, a Lei nº 9.433/97 (Lei das Águas), alterou o arcabouço para gestão desses recursos, tratando a questão de maneira mais específica e sensível ao ciclo hidrológico em relação aos espaços atuais de atuação governamental com suas divisões administrativas e políticas, tendo a bacia hidrográfica como unidade fundamental de estudos multissetoriais. Além disso, impôs a participação do setor produtivo e da sociedade nas discussões e decisões colegiadas.

Na bacia hidrográfica o monitoramento hidrometeorológico e o estudo hidrológico servem para subsidiar a aplicação de instrumentos de outorga e cobrança pelo uso da água, bem como a definição de ações para sua proteção e conservação. Em países de grandes dimensões os estudos para serem eficazes devem visar às questões locais, voltadas para bacias menores, uma vez que as informações neste nível, mais próximas da realidade administrativa municipal, são importantes para o conhecimento da dinâmica hidrológica do sistema hidrográfico regional.

Na presente dissertação o problema a ser investigado relaciona-se ao Noroeste Fluminense. A região com cerca de 310 mil habitantes é de grande interesse para o Estado do Rio de Janeiro por sua localização no trecho baixo do rio Paraíba do Sul, onde este sistema hidrográfico agrega a influência de centenas de quilômetros do que ocorre a montante. Nela as atividades agrícolas e pecuárias nas áreas rurais geram impactos locais com reflexos na extensão restante do rio Paraíba do Sul.

A história do Noroeste Fluminense foi marcada principalmente pelos ciclos agrícolas do café e açúcar que nela se instalaram ao longo dos anos à custa da madeira para construção e produção de energia, promovendo um intenso desmatamento. Atualmente, restam menos de 5% da cobertura original, representada por bolsões isolados de vegetação secundária e de remanescentes da mata atlântica com predomínio de pastagens. Os usos não conservacionistas na agricultura e pecuária são recorrentes e responsáveis pela erosão do solo, assoreamento e eutrofização dos cursos d'água, desaparecimento/migração de nascentes e contaminação dos solos/aquíferos. Tais práticas têm agravado a situação de oferta hídrica entre seus usuários (GEPARMBH, 2003).

Se a degradação ambiental persistir na região Noroeste Fluminense a escassez de água nos próximos anos poderá ter sérias implicações sociais. Vale ressaltar que a disponibilidade hídrica já é uma vulnerabilidade real. Nos períodos com menores níveis de precipitação a água é represada nos córregos para irrigação das culturas de inverno, contribuindo com aumento das taxas de evaporação e diminuição da oferta para consumo humano e animal. A situação se agrava com as atividades agrícolas sem técnicas condizentes de manejo do solo. Do ponto de vista econômico as demandas criam conflitos pelo uso da água, baixa produtividade e custos elevados de cultivo, resultando na falta de oportunidades para as comunidades, baixa qualidade de vida e migração para centros urbanos (GONÇALVES; FIDALGO; BASTOS, 2006; MARTORANO et al., 2003).

As questões ambientais e socioeconômicas do Noroeste Fluminense têm sido motivo de preocupação dos órgãos responsáveis pela gestão territorial no Estado do Rio de Janeiro. Entre as iniciativas ressalta-se em 2003-2005 o projeto “Gestão Participativa da Sub-bacia do Rio São Domingos” (GEPARMBH), que reuniu a Embrapa Solos, COPPE e Politécnica da UFRJ, EMATER, CEIVAP, UERJ e SEAAPI. Nessa ocasião a sub-bacia do rio São Domingos, inserida na bacia hidrográfica do rio Muriaé, importante afluente do rio Paraíba do Sul, foi escolhida como representativa para realização de estudos socioeconômicos e do meio físico-ambiental, de caráter multidisciplinar e interinstitucional, que tiveram como base metodologias integradoras e participativas com envolvimento das comunidades locais. Uma característica relevante da área de drenagem do rio São Domingos é sua quase coincidência com o limite municipal de São José de Ubá. Os estudos visaram sensibilizar a gestão municipal para questões que dessem sustentabilidade às ações futuras de gestão (GEPARMBH, 2003).

O GRHIP/UERJ, associado ao GEPARMBH, concentrou esforços nas vilas de Santa Maria e Cambiocó do município de São José de Ubá, que se tornaram “comunidades piloto” do projeto, entre outras estudadas, realizando monitoramento e estudos hidrológicos na microbacia dos córregos de Santa Maria e Cambiocó. A escolha da microbacia teve como critério possuir boa organização sociopolítica entre os moradores e como base da sua economia o cultivo de tomate, o que significava um grande potencial em consumo da reserva hídrica local na irrigação. Do ponto de vista dos impactos socioeconômicos a escolha considerou a importância dos conflitos pelo uso da água entre os agricultores e demais usos (humano e dessedentação), o aumento dos custos de manutenção da infraestrutura de produção, inclusive com os solos, e a diminuição da qualidade de vida nas comunidades (MORAES, 2007).

Entre os resultados alcançados pelo GEPARMBH destacam-se na microbacia experimental e representativa de Santa Maria e Cambiocó: (i) o levantamento dos solos e sua classificação pela Embrapa Solos, (ii) o estudo realizado por Ottoni (2005) com proposta de classificação físico-hídrica dos solos, e (iii) o estudo de Moraes (2007) sobre o balanço hídrico e estimativa hídrica mensal com implantação e operação do monitoramento meteorológico e hidrossedimentológico.

Vale ressaltar que iniciativas como a do GEPARMBH justificam a importância do uso da bacia hidrográfica como unidade de pesquisa para gestão dos recursos hídricos. Nela, os estudos físico-ambientais podem ser conduzidos de inúmeras maneiras. No caso dos modelos hidrológicos as interações extremamente complexas dos processos físicos nos meios

atmosférico e terrestre podem ser representadas e simuladas considerando cenários e previsão de vazões, úteis ao planejamento e à tomada de decisão na gestão dos recursos hídricos. Os modelos ao serem associados a Sistemas de Informações Geográficas (SIG), programas computacionais projetados para lidar com dados referenciados por coordenadas espaciais ou geográficas, oferecem uma maneira eficaz para investigar, monitorar e analisar os processos naturais e interferências humanas no âmbito da bacia. Nos modelos de base física e de qualidade da água a simulação dos processos amplia a capacidade de estimar e avaliar as consequências das ações antrópicas.

A opção pelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) deve-se ao interesse que este modelo hidrológico passou a ter nos últimos anos no meio acadêmico brasileiro em bacias agrícolas do Sul e Sudeste, em aplicações voltadas para previsão de vazões e avaliação do impacto do uso do solo nos processos erosivos e qualidade da água. O modelo tem como principais características avaliar os impactos de longo prazo em bacias, instrumentadas ou não, requerendo uma base de dados mínima para operar computacionalmente de maneira eficiente. O acoplamento da interface SIG torna fácil a implementação da modelagem hidrológica com relação às entradas, execução e apresentação dos resultados. O SIG tem a função de capturar os dados geográficos, climatológicos, pedológicos e de manejo do solo, tornando transparentes os procedimentos de implantação, desenvolvimento e execução do modelo. O SWAT é uma referência mundial, tendo amplo rol de aplicações nos cinco continentes, principalmente nos EUA onde foi desenvolvido, na Europa e, mais recentemente na Ásia, em países como China e Irã. O modelo está em constante aperfeiçoamento. Além disso, por sua flexibilidade é uma excelente ferramenta para fornecer subsídios aos órgãos de gestão territorial e de recursos hídricos (GARBOSSA et al., 2011; GASSMAN et al., 2007; GASSMAN; SADEGHI; SRINIVASAN, 2014).

A premissa para o desenvolvimento da presente pesquisa baseia-se na comparação das vazões médias diárias simuladas pelo SWAT com as observadas na microbacia experimental, considerando a aderência das recessões e picos dos hidrogramas, e avaliação do seu desempenho por meio de indicadores estatísticos de eficiência e da verificação do balanço hídrico. No caso da hipótese ser atendida o modelo pode ser proposto para novas aplicações nesta microbacia e na região Noroeste Fluminense, sobretudo como apoio ao planejamento de recursos hídricos.

Objetivos geral e específicos

O presente estudo teve como objetivo geral avaliar com o sistema hidrológico computacional SWAT a simulação diária do processo chuva-vazão na microbacia experimental e representativa de Santa Maria e Cambiocó, localizada na região Noroeste Fluminense, no contexto do planejamento de recursos hídricos.

Os objetivos específicos foram os seguintes:

- a) Reunir os dados fisiográficos, de solos e meteorológicos para criação da base de dados necessária ao desenvolvimento do modelo e sua execução;
- b) Utilizar a ferramenta de análise de sensibilidade fornecida pelo modelo para verificar o grau de sensibilidade do conjunto de parâmetros disponíveis que influenciam as respostas de vazão na microbacia;
- c) Utilizar a ferramenta de autocalibração fornecida pelo modelo para obter o melhor ajuste com base no conjunto de parâmetros disponíveis que influenciam as respostas de vazão na microbacia;
- d) Avaliar os resultados obtidos em todas as etapas das simulações, incluindo a calibração e validação, com base na análise dos hidrogramas, balanço hídrico e indicadores estatísticos de eficiência.

Estrutura da dissertação

A fundamentação teórica apresentada no **Capítulo 1** identifica os principais conceitos relacionados com os modelos hidrológicos e questões relacionadas à aquisição e uso dos dados, ajustes de parâmetros e avaliação dos resultados.

O **Capítulo 2** apresenta a metodologia, incluindo a caracterização da área de estudo, preparo de toda base de dados do modelo e sua execução.

Os resultados e discussões sobre análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo são apresentados no **Capítulo 3**, com destaque para tabelas, hidrogramas e gráficos que permitiram a avaliação dos resultados.

No último capítulo são apresentadas as conclusões e sugestões para realização de novos estudos.

1 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

A técnica de simulação hidrológica permite emular virtualmente, com aplicação de um modelo matemático e cálculos baseados no balanço hídrico, os processos que ocorrem na fase terrestre do ciclo hidrológico e suas interações com outros elementos associados à circulação da água na natureza, como precipitação, interceptação, evaporação, infiltração, escoamento superficial, lateral e subterrâneo, armazenamento e transporte de massas.

Tucci (1998) ressalta que dentro do escopo da hidrologia os modelos hidrológicos desenvolveram-se continuamente com vários objetivos, entre os quais, os esforços dos pesquisadores para incorporar na modelagem hidrológica metodologias matemáticas e estatísticas na representação dos processos responsáveis pelas trocas de massa e energia que resultam nas constantes alterações da bacia hidrográfica para melhor compreensão dos sistemas hidrológicos. O uso dos modelos contempla diversos aspectos sobre o gerenciamento dos recursos hídricos em aplicações voltadas para energia, desenvolvimento urbano, agricultura e controle ambiental.

Os modelos hidrológicos fornecem informações importantes, como: (i) hidrograma para análise do comportamento hidrológico, (ii) simulação das vazões com dados de chuva em determinado período, (iii) ampliação das séries históricas das vazões previstas, tendo como dados de entrada séries mais longas de precipitação, (iv) regionalização das vazões ou parâmetros do modelo para bacias que não possuem registros fluviométricos, (v) estimativa do balanço hídrico, (vi) previsão das vazões desconhecidas a partir da definição de cenários de uso e ocupação dos solos, e (vii) estimativa das cargas de sedimentos e poluentes (pontuais e difusas).

As informações geradas pelos modelos hidrológicos podem ser usadas complementarmente nos estudos multidisciplinares como instrumentos para cumprimento de metas ambientais e gerar modelos simplificados como ferramenta regionalizada para auxiliar os tomadores de decisão (VELEDA, 2006).

Em razão da complexidade dos fenômenos ambientais os modelos hidrológicos possuem vantagens, como facilidade de execução, baixo custo e rápida obtenção dos resultados. Esta condição permite a simulação de cenários integrados inviáveis de representação de outra maneira. No entanto, apesar da sua importância em aplicações de recursos hídricos e gestão ambiental, os modelos não são muito usados na área governamental no Brasil (KOBAYAMA et al., 2004).

Rennó e Soares (2000) consideram que os modelos hidrológicos são ferramentas capazes de antecipar acontecimentos e apontar alternativas para a manutenção da capacidade produtiva do ambiente. Os modelos são importantes para auxiliar nos estudos sobre o impacto das mudanças do uso do solo e na previsão das alterações futuras dos ecossistemas.

1.1 Sistemas e modelos

O uso de modelos hidrológicos requer que alguns conceitos relacionados a sistemas e modelos sejam entendidos. Sistema é qualquer estrutura, esquema ou procedimento, real ou abstrato, que num dado tempo de referência relaciona-se com uma entrada, causa ou estímulo de energia ou informação, e com uma saída, efeito ou resposta de energia ou informação. Modelo é uma representação do comportamento do sistema, numa linguagem ou maneira de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas. A modelagem permite compreender o sistema e prever situações de cenários futuros para direcionar as ações decisórias (TUCCI, 1998).

A seguir estão relacionados conceitos importantes para a compreensão do significado de sistemas e modelos:

- a) *Fenômeno* – processo que produz alteração de estado no sistema, em razão das trocas de massa e energia responsáveis pelas constantes alterações das suas variáveis e parâmetros. Exemplos: precipitação, evaporação e infiltração.
- b) *Variável* – valor que descreve quantitativamente um fenômeno. As variáveis podem mudar ao longo do tempo em que o modelo estiver sendo executado. Em um modelo podem ser distinguidos três tipos de variáveis: (i) de estado (ex.: conteúdo de água no solo), (ii) processo ou fluxo (ex.: taxa de infiltração), e (iii) forçante ou impulsionadora (ex.: chuva, como fluxo; aquífero, como estoque; vento, como modulador).
- c) *Parâmetro* – valor que caracteriza o sistema, podendo variar espacialmente, mas que permanece inalterado para todos os intervalos de tempo. Exemplos: características físicas dos solos, declividade do leito fluvial etc.

1.2 Classificação dos modelos hidrológicos

Nas últimas décadas muitos modelos hidrológicos de simulação têm sido desenvolvidos e aperfeiçoados com base em conceitos importantes que os caracterizam, resultando em diferentes classificações. Entre as definições destacam-se as apresentadas por Tucci (1998), relacionadas com os aspectos que as variáveis podem assumir na modelagem.

Se pelo menos uma das variáveis na modelagem tem o comportamento aleatório os modelos são ditos *estocásticos*, sendo estatístico o relacionamento entre entrada e saída do sistema. Se os conceitos de probabilidade não são considerados os modelos denominam-se *determinísticos*. Neste caso, cada valor de entrada produz um único valor de saída.

Os *modelos empíricos* são os que a relação entre as variáveis do sistema se dá pelas observações, sem estarem associados necessariamente a uma lei física genérica para qualquer lugar ou situação. São representados em termos das funções empíricas ou correlativas baseadas em análises estatísticas representadas por equações matemáticas. A formulação das relações entre variáveis e parâmetros usam os dados circunstanciais. Em geral os processos físicos não são considerados.

Os *modelos conceituais* dependem de um entendimento maior do sistema. As funções usadas na sua representação consideram os processos físicos que os descrevem por meio da representação de variáveis de estado e parâmetros de natureza espacial e temporal. Os valores dos parâmetros são determinados com base em dados históricos, tentativas, ajustes ou amostragem. Podem ser *semiconceituais*, se mantêm um razoável empirismo nos parâmetros das equações envolvidas, e *físicos*, se utilizam as principais equações diferenciais do sistema físico para representar os processos.

Na maioria das vezes com relação à escala temporal as aplicações dependem de alguma discretização dos fenômenos. Quanto menor o intervalo maior a precisão e “custo” computacional para geração dos resultados. Se a saída de uma iteração serve como entrada para uma subsequente e, assim por diante, o modelo pode ser classificado como *dinâmico*.

Os *modelos concentrados ou agregados* não levam em conta a variabilidade espacial dos fenômenos. As variáveis e parâmetros são dependentes somente da escala de tempo (contínua ou discreta) e dos seus valores médios para toda a área estudada, sejam elas de entrada ou saída. Portanto, a heterogeneidade espacial no domínio da modelagem não é considerada. Os processos são representados por equações ordinárias com uma variável independente.

Nos *modelos distribuídos* as variáveis e parâmetros dependem que o espaço e/ou tempo sejam discretizados para representar a devida variabilidade dos fenômenos e processos. Dentro de cada unidade elementar (células), correspondente a elementos quadráticos do espaço, o processo é simulado e os resultados obtidos correspondem às características homogêneas para as variáveis e parâmetros. São representados por equações diferenciais parciais com mais de uma variável independente.

Na prática, constitui uma dificuldade intrínseca a representação inteiramente distribuída. Nos *modelos semidistribuídos* a discretização permite agregar no nível de sub-bacias (estas ligadas por uma rede de drenagem) unidades menores que têm características físicas homogêneas, como uso do solo, tipo do solo e declividade. Dessa maneira, outros aspectos como aqueles relacionados com as ações antrópicas podem ser representados de maneira mais apropriada (CUNDERLIK, 2003).

Quanto aos ajustes dos valores simulados aos observados somente os modelos distribuídos permitem estudar a variabilidade do comportamento físico de diferentes partes do sistema hidrológico. As maiores dificuldades devem-se à escassez de dados de entrada, incertezas sobre valores dos parâmetros e manuseio de múltiplas informações sobre o sistema físico-ambiental a ser representado, além de maior esforço computacional.

1.3 Evolução dos modelos hidrológicos

No campo da hidrologia os avanços na representação matemática dos fenômenos hidrológicos permitiram a partir da década de 1930 que estudos quantitativos se tornassem efetivos nas agências governamentais dos EUA e de países europeus. São dessa época o hidrograma unitário usado para o cálculo do escoamento superficial, a fórmula da infiltração, e o modelo de escoamento em rios.

A partir da década de 1950 com o advento do computador as técnicas numéricas e estatísticas passaram a ser usadas de maneira mais eficientes. Os primeiros modelos chuva-vazão foram desenvolvidos para atender aos estudos da hidrologia operacional sobre o aproveitamento do potencial hidráulico das grandes bacias hidrográficas, prevenção de inundações, previsão de afluência da descarga fluvial, dimensionamento e operação hidráulica dos reservatórios. Esses modelos foram formulados com base em funções empíricas e na equação de continuidade para chuva e vazão sem considerar a variabilidade espacial das variáveis e parâmetros.

Na década de 1960 foram desenvolvidos os primeiros modelos conceituais. Os mais complexos consideravam os parâmetros usados para representar os processos do ciclo hidrológico com base na conservação de massa e podiam ser estimados a partir de relacionamentos gerais, e calculados por meio de ajustes com os dados observados. Os conceituais concentrados representavam os processos hidrológicos por meio de um conjunto de reservatórios, cada qual descrevendo uma parcela do ciclo.

A partir da década de 1980 o enfoque ambiental sobre os modelos hidrológicos tiveram como objetivo desenvolvê-los para serem capazes de representar com maior precisão por meio de equações diferenciais os processos físicos, incorporando a variabilidade espacial das variáveis e parâmetros, em parte ou mais amplamente, no espaço tridimensional. Além disso, incorporaram o entendimento sobre como os processos interagem nos limites da bacia hidrográfica, quais as suas implicações no funcionamento do balanço hídrico e de que maneira os impactos no uso do solo afetam a quantidade e qualidade da água. O principal exemplo foi o desenvolvimento do Sistema Hidrológico Europeu (SHE), baseado na conservação de massa, energia e momento, para simular o movimento da água na bacia por meio de equações diferenciais parciais de leis físicas que descrevem os vários processos do ciclo hidrológico.

Atualmente, com o intenso desenvolvimento de hardware e dos sistemas computacionais, e possibilidades de apropriação, monitoramento, armazenamento e manipulação das variáveis e parâmetros ambientais, além das novas abordagens para representação dos fenômenos e processos, as pesquisas têm sido orientadas para modelos mais complexos e eficientes para capturar os sistemas físicos ambientais, que são intrinsecamente dinâmicos.

1.4 Modelagem hidrológica

A modelagem hidrológica é uma tarefa complexa e sistemática que envolve a escolha do modelo para uma dada aplicação, as características da bacia hidrográfica, a aquisição e qualidade dos dados usados como entradas, a parametrização, as técnicas de ajustes dos parâmetros e de avaliação do desempenho.

1.4.1 Escolha do modelo

A escolha do modelo hidrológico requer atenção para verificação de uma série de critérios. Desde os ditados pela familiarização e preferências do usuário às características da plataforma computacional, recursos e tempo. Além disso, o mais importante é o que se pretende atingir quanto aos resultados, intimamente relacionados com o nível de precisão desejado para representação dos fenômenos hidrológicos. Uma dada aplicação pode demandar que o modelo seja capaz de gerar vazões com certo nível de acurácia ou usado com a finalidade de se definirem cenários quanto ao uso do solo. Em qualquer caso, os modelos de base física dependem de um razoável conhecimento dos aspectos físicos e climatológicos relacionados com a bacia hidrográfica, levando em conta que os dados sejam compatíveis para obtenção dos resultados com a resolução espacial e temporal esperada. Na fase de pré-seleção do modelo deve ser feito um levantamento daqueles que atendam à aplicação de interesse, considerando como critérios de escolha alguns fatores, como escala temporal e espacial, processos que podem ser modelados, custo e tempo para implantação, tempo para adquirir expertise, suporte técnico, documentação, facilidade de uso, sistema operacional usado, vantagens e desvantagens, e referências na literatura (CUNDERLIK, 2003).

A realidade ambiental é complexa e pode ser vista como um agregado de sistemas que interagem entre si. Os processos do ciclo hidrológico fazem parte de um sistema mais amplo, onde acontece a interação da água com a atmosfera e o meio terrestre. A base teórica, constituída por equações matemáticas, variáveis e parâmetros, que os representam, é empregada pelo modelo hidrológico de modo agregado ou distribuído para simular o balanço hídrico entre os vários compartimentos da bacia hidrográfica, inclusive a rede de canais, considerando a vazão, sedimentos e poluentes. Nos estudos hidrológicos a melhor maneira de representar a variabilidade espacial depende do que se pretende quantificar e analisar. Além disso, o objetivo precisa ser condizente com a disponibilidade e qualidade dos dados, escala e resolução espacial. A abordagem mais simples é a representação agregada em que o sistema hidrológico é considerado como uma unidade com propriedades espacialmente homogêneas, o que se reflete sobre os valores assumidos para as variáveis e parâmetros relacionados às funções empíricas e/ou equações diferenciais que os descrevem (RENNÓ; SOARES, 2000).

Os modelos agregados são mais simples e adequados para grandes áreas. Neles, as feições espaciais são representadas com dimensão zero. A bacia hidrográfica pode ser dividida em sub-bacias caso seja preciso maior detalhamento, constituindo um sistema agregado conectado por ligações que representam os cursos d'água. No entanto, esta representação não é adequada quando se analisam fluxos superficiais e subsuperficiais em que a topografia é o principal fator determinante da distribuição da água na bacia e, conseqüentemente, do transporte dos materiais. Importante ressaltar que a topografia é responsável pelas características que definem como a água se move através da paisagem. Entre tais características estão a definição da cumeada, inclinação do terreno, comprimento da rampa, forma do declive, orientação das vertentes, forma/constituição dos canais de drenagem, e conexões entre áreas. Todos os aspectos envolvem o conhecimento dos parâmetros e valores de grande importância ao funcionamento dos modelos (MOORE et al., 1993).

Outra maneira de lidar com o espaço da bacia hidrográfica é discretizando-o. Caso em que se aplicam os modelos semidistribuídos e distribuídos. Os semidistribuídos requerem menos dados de entrada que os distribuídos e permitem, por exemplo, dividir a bacia em unidades menores com características semelhantes em relação às variáveis e parâmetros. Os distribuídos são capazes de maior segmentação da bacia e usam diversos parâmetros associados com as características dos processos físicos. A grande quantidade de dados usados determina mais trabalho na preparação das entradas e mais recursos computacionais para o processamento, como memória e velocidade do processador. Do ponto de vista da modelagem tal abordagem impõe a reunião de informações sobre as várias características da bacia. Nestes modelos as opções de discretização temporal dos processos aproximam o processamento da realidade contínua dos fenômenos naturais (JAJARMIZADEH; HARUN; SALARPOUR, 2012).

Em alguns modelos físico-distribuídos a bacia hidrográfica é dividida em sub-bacias e no nível delas em elementos menores com base nas características homogêneas de cobertura/uso do solo, tipo do solo e declividade. É o caso dos modelos semidistribuídos. Estas unidades definem áreas de comportamentos hidrológicos similares que são computadas matematicamente nos processos que ocorrem na superfície/subsuperfície e no balanço de massa entre os compartimentos ou reservatórios, de maneira que sejam capazes de representar com maior fidelidade o sistema real.

Os modelos hidrológicos físico-distribuídos simulam os processos na bacia hidrográfica com foco nos processos individuais ou em múltiplos processos com discretização espacial e temporal. Dessa maneira, podem apropriar pequenos intervalos de tempo e do espaço ou serem mais simples e genéricos, simulando o comportamento de regiões inteiras e/ou períodos de tempo mais longos (décadas, séculos). No entanto, nem sempre é possível traduzir todas as relações existentes entre os diferentes componentes da bacia em termos matemáticos. Muitas vezes as relações são extremamente complexas a ponto de não existir formulação matemática capaz de descrevê-las completamente ou apenas uma parte dos processos envolvidos é parcialmente conhecida. Assim, na maioria dos casos a modelagem torna-se somente uma representação aproximada da realidade (DANIEL et al., 2011).

Com relação à escala espacial e temporal relacionadas aos processos hidrológicos o sistema atmosfera-vegetação tem um ciclo de rápida resposta em que a radiação solar atua sobre a circulação de umidade e calor. As interações água-atmosfera-solo-plantas (da ordem de segundos) refletem-se no balanço de energia da superfície terrestre, umidade e temperatura do solo, e no comportamento das plantas. O ideal é que os modelos combinem fatores empíricos e teóricos para que a expressão matemática dos processos envolvidos atenda ao nível apropriado de conceituação em que certos parâmetros desempenham papel importante, como condutividade hidráulica do solo e rugosidade do canal de drenagem. Outras questões envolvidas referem-se a como os dados são obtidos, na maior parte das vezes de modo pontual e não espacializado (RENNÓ; SOARES, 2000).

1.4.2 Bacia hidrográfica

É no espaço da bacia hidrográfica que se identifica o limite espacial para o entendimento dos fenômenos relacionados com os processos físicos em que a água interage com a atmosfera-solo-plantas, permitindo que os componentes do ciclo hidrológico sejam isolados para compreensão do funcionamento e interação dos mecanismos envolvidos na produção, armazenamento e perda da água dentro do sistema hidrológico. A complexidade da bacia é atribuída a diversos fatores, como localização geográfica e relevo, que determinam os efeitos dos fenômenos climáticos, padrão de drenagem, estrutura/constituição do solo e cobertura/uso do solo. Estas características controlam a quantidade e qualidade da água estocada nos reservatórios, tornando a bacia importante nos estudos voltados à compreensão dos processos físicos.

Percebe-se, quando se consideram a escala de planejamento e as disparidades relacionadas com o nível de conhecimento das bacias hidrográficas e os custos envolvidos, que os esforços de gestão devem ser dirigidos no sentido do estabelecimento de estudos em bacias experimentais. Estas unidades caracterizam-se por serem áreas da ordem de dezenas de km² e funcionam como pequenos laboratórios do mundo real. Os estudos nelas realizados contribuem para compreensão das possíveis alterações no ciclo hidrológico e distribuição espaço-temporal dos recursos hídricos, por causa das mudanças na ocupação e uso do solo, assim como em relação às mudanças climáticas. Adicionalmente, a caracterização física auxilia a aplicação de modelos hidrológicos e climatológicos no planejamento e gestão dos recursos hídricos. Em muitos casos podem ser provocadas alterações intencionais nas características de cobertura/uso do solo na área da bacia.

As bacias hidrográficas podem ser representativas também da realidade socioeconômica, física e ambiental de uma região com maior abrangência espacial, possibilitando, em princípio, a extrapolação dos conhecimentos adquiridos. No âmbito das agências governamentais a implantação de bacias experimentais e representativas é uma estratégia importante que pode contribuir para simulação de cenários críticos relacionados com a exploração excessiva dos recursos naturais, escassez de água, conflitos pelo uso, degradação ambiental e baixo desenvolvimento, tendo como objetivos o planejamento e gestão dos recursos hídricos para o desenvolvimento sustentável (PIMENTEL DA SILVA; EWEN, 2000).

No caso brasileiro, a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997 (Lei das Águas), estabeleceu como princípio fundamental de gestão dos recursos hídricos a “bacia hidrográfica”, descentralizada, com a participação do poder público, dos usuários e da comunidade, sendo previstos instrumentos específicos para sua implementação, como planos, cadastros de usuários, outorga e cobrança. As figuras dos comitês e das agências de bacias representam as dimensões política e técnica da gestão que devem orientar e garantir uma atuação multidisciplinar efetiva no estabelecimento e aplicação de políticas públicas voltadas à exploração, preservação e conservação sustentável dos recursos hídricos.

1.4.3 Definição dos dados

A disponibilidade de dados em uma bacia hidrográfica é fundamental para uso dos modelos hidrológicos. As questões relacionadas à aquisição, uso e qualidade dos dados de entrada correspondem a uma etapa da aplicação que deve ser bem cuidada a fim de que se minimizem as incertezas sobre os resultados das simulações. Em termos de custo e benefício os modelos são aplicados com sucesso nos países em que redes de monitoramentos de chuva, vazão e qualidade da água podem ser mantidas permanentemente ou por longos períodos, fornecendo dados de grande importância para gestão de bacias (urbanas e rurais). Atualmente, a aquisição de dados por meio do sensoriamento remoto sobre as variáveis climáticas e características fisiográficas do espaço terrestre ampliam cada vez mais a capacidade de uso dos modelos.

As informações a seguir (1.4.3.1 a 1.4.3.3) sobre variáveis hidrometeorológicas, parâmetros físicos e ajustes de parâmetros foram baseadas em Tucci (1998, 2004).

1.4.3.1 Variáveis hidrometeorológicas

As escalas espacial e temporal na modelagem hidrológica devem ser consideradas em relação aos dados adquiridos e processos analisados. O ideal é que os dados possam ser estimados com base nas medidas de campo e dependam menos das leituras de séries históricas de vazão na fase de ajustes. As séries hidrometeorológicas dependem essencialmente da representatividade dos períodos históricos (secos, úmidos, medianos) e não necessariamente do número de anos de dados. Em séries não estacionárias devem ser mantidos os registros das alterações físicas e dos períodos de ocorrência e do grau de sensibilidade nas respostas. A exatidão das informações é fundamental na qualidade dos resultados da modelagem.

A principal entrada do sistema hidrológico é a precipitação cuja estimativa com maior precisão requer uma densa rede pontual de monitoramentos. O usuário deve ter um bom conhecimento a respeito dos métodos de aquisição, aparelhos, lugares de instalação e informações sobre problemas, como falhas e ausência de registros. A precisão da medição dos dispositivos depende da área de interceptação e do sistema de medição, contínuo ou descontínuo. Os métodos estatísticos podem ser usados para distribuir a chuva espacialmente. Se existe um ou mais postos de controle deve-se buscar relacionar a precipitação e a curva de cada posto a fim de escolher o mais representativo. Se não existem dispositivos automáticos dos registros, as incertezas são altas e a distribuição temporal dentro do dia depende de

metodologias estatísticas de desagregação ou simples ajuste de uma distribuição empírica. Os eventos chuvosos devem ser discretizados com base no tempo de pico do hidrograma, considerando pelo menos um terço do tempo de pico. Se o interesse principal é o de se obterem séries contínuas de volumes de escoamento o intervalo de tempo pode ser maior, uma vez que o modelo deve representar bem a continuidade do volume.

Os dados de evapotranspiração podem ser monitorados ou estimados por meio de variáveis climáticas que permitem o cálculo da evapotranspiração potencial por métodos específicos, como Thornthwaite e Penman. Os postos localizados fora da área de estudo podem ser usados com boa estimativa, em razão de que a variabilidade espacial e temporal desta variável não é tão grande como ocorre com a precipitação, fenômeno eminentemente variável no tempo com intensidade que muda a cada instante no mesmo lugar.

Os dados fluviométricos podem ser monitorados em seções dos rios e no exutório. Além da sua importância intrínseca são usados nos ajustes de parâmetros e validação dos modelos hidrológicos. São muitos os aspectos que devem ser considerados neste tipo de monitoramento, entre os quais a precisão dos equipamentos e o intervalo de monitoramento a fim de diminuir as incertezas. A discretização das vazões é uma escolha importante, porque da mesma maneira que a precipitação sua intensidade é constante dentro do intervalo de tempo. Caso o intervalo seja grande a intensidade diminui. Com a precipitação pequena no intervalo de tempo grande o modelo tende a infiltrar praticamente todo o volume precipitado, criando tendências nos parâmetros e resultados. Um aspecto importante sobre o monitoramento de vazões é que as medições são demoradas e caras. Uma maneira razoável de obtê-las é pela variação da altura do nível de água (cota) que se altera ao longo do tempo. Dessa maneira, com a medição contínua é possível estabelecer a curva chave (cota x vazão) por meio de métodos teóricos e experimentais. O método automatizado é satisfatório para medir com regularidade os eventos de curta duração especialmente em pequenas bacias. A precisão das medições depende das cotas medidas e do intervalo de tempo de medição.

Os dados de precipitação e vazão consistidos e preparados devem ser analisados sob a ótica do balanço hídrico anual e da coerência dos eventos de chuva-vazão a fim de que se evitem ou minimizem tendências na simulação hidrológica. A análise dos dados observados deve levar em conta os valores anuais de precipitação, evaporação e vazão a fim de se verificarem erros tendenciosos e grosseiros. A análise dos eventos de cheias e da transformação de chuva em vazão é feita para verificar a coerência dos valores simulados e sua ocorrência temporal.

1.4.3.2 Parâmetros físicos

Os parâmetros físicos da bacia hidrográfica são muito importantes na modelagem hidrológica e podem ser obtidos pela via direta em que as características físicas específicas, como área de drenagem, comprimento e seções, são medidas diretamente no campo. Os parâmetros também podem ser obtidos por amostragem e as condições locais serem extrapoladas espacialmente, como rugosidade do rio, capacidade de infiltração do solo, condutividade hidráulica, entre outros. Se as funcionalidades SIG estão associadas com os modelos hidrológicos certas características da bacia são calculadas automaticamente por meio do processamento do Modelo Digital de Elevação (MDE). Da mesma maneira, outros parâmetros relacionados com o meio físico (ex.: solos) são obtidos em trabalhos de campo, ensaios de laboratório ou extrapolados para a área de estudo. Os dados de cobertura, uso do solo e práticas agrícolas também são essenciais.

1.4.3.3 Ajustes dos parâmetros

O modelo resultante da simulação deve-se à modelagem hidrológica prévia da bacia hidrográfica, baseado em simplificações e no conhecimento que se tem sobre os dados climatológicos, séries de precipitação e parâmetros conhecidos e/ou calculados. No entanto, em razão das condições iniciais da bacia (ex.: umidade inicial e aquíferos) não serem bem conhecidas, além da quantidade e complexidade de parametrização envolvida, os resultados são gerados com discrepâncias relacionadas com os parâmetros mal estimados que influenciam o comportamento hidrológico sem a correspondência precisa com a representação do fenômeno.

Por causa da complexidade da realidade existe a necessidade de que um conjunto de parâmetros sensíveis seja definido para a tarefa de ajuste (calibração) a fim de que o hidrograma simulado aproxime-se o máximo possível do observado, de maneira que os desvios possam ser minimizados, reduzindo-se as incertezas dos resultados. A abordagem nada mais é do que a verificação e avaliação de como um componente do modelo (vazão ou cargas) responde quantitativa e qualitativamente às diferentes variações sobre os parâmetros. O estudo pode ser feito de modo manual ou com ferramenta automática, considerando os parâmetros individualmente ou um conjunto deles. A análise permite ordenar a influência de cada parâmetro na modelagem.

No entanto, determinar a magnitude dos ajustes dos parâmetros depende do objetivo que se pretende analisar em relação às séries temporais da bacia hidrográfica, como retratar períodos específicos de estiagem ou enchente ou séries contínuas com grande variabilidade de escoamento em que se deseja conhecer a série de vários anos de um determinado local. No primeiro caso, a prática tem sido considerar o conjunto de parâmetros mais sensíveis de alguns eventos para o ajuste e verificar com outros a validade do modelo. No segundo caso, as séries temporais estacionárias devem ser divididas, sendo uma parte para calibração e outra para validação, que em última análise confirma a qualidade e eficiência dos ajustes feitos nos parâmetros para a série calibrada, a fim de que sua aplicação seja generalizada e usada em outros períodos ou em cenários diferentes daqueles então monitorados. Outras situações exigem técnicas mais específicas existentes na literatura, como no caso de bacias sem dados históricos de interesse ou naquelas em que existem dados, mas ocorrem alterações físicas, caracterizando as séries como não estacionárias.

A determinação dos parâmetros que melhor representem o comportamento físico da bacia hidrográfica baseia-se na calibração da série simulada de vazões comparativamente a série observada. O ajuste manual por tentativa e erro é mais demorado, uma vez que pode ser necessário alterar várias vezes cada parâmetro, enquanto são mantidos constantes os demais. Terminada a simulação para o parâmetro ajustado são feitas as verificações dos hidrogramas simulado e observado e avaliados os indicadores estatísticos até que se tenha um resultado aceitável. Em seguida, um novo parâmetro passa a ser abordado. E assim por diante até atingir o melhor desempenho.

A técnica por otimização considera uma função objetivo para obter a melhor solução de ajuste dos parâmetros fixados como influentes na resposta hidrológica da bacia hidrográfica. A função corresponde à equação matemática dos desvios entre os dados simulados e observados, associada a uma ou mais variáveis independentes e às variáveis que são mantidas constantes. A escolha depende do que se pretende evidenciar dos hidrogramas. O problema refere-se a minimizar ou maximizar a função, isto é, calcular os valores para as variáveis que definem a hipótese de mínima ou máxima, sendo mais frequente a minimização. Dependendo do caso as variáveis independentes podem ter restrições ou não, isto é, faixas de valores que delimitam a região contínua da função.

No entanto, a solução matemática pode convergir para valores não inteiramente representativos da realidade física. Os métodos não garantem necessariamente o mínimo global da função objetivo, pois não conseguem resolver satisfatoriamente o problema com vários mínimos locais. Daí que as técnicas e métodos de calibração não substituem a falta de informações das características mais relevantes da bacia hidrográfica, uma vez que podem ser insuficientes nas condições iniciais de simulação, como no caso dos dados a respeito das características dos aquíferos e séries temporais, e de aspectos do clima e variabilidade dos parâmetros dos solos. Além disso, medições imprecisas, interpolações de amostras, erros posicionais e generalização cartográfica costumam aumentar a fonte de incertezas. Outra questão refere-se à capacidade do modelo representar por meio dos seus componentes os processos físicos da bacia. As considerações sobre as incertezas devem ser esclarecidas durante a análise dos resultados das simulações.

1.4.4 Avaliação do desempenho

A maneira mais comum para avaliar o desempenho de um modelo hidrológico para representar a hidrologia observada de uma bacia hidrográfica na etapa de calibração ou validação faz-se por meio de inspeção visual do hietograma e dos hidrogramas simulado e observado e, se necessário, das curvas de permanência, que reproduzem a frequência das vazões, e cuja similaridade indica simulação adequada. No caso dos hidrogramas convém observar a escala de representação gráfica a fim de que a análise seja coerente com o que se pretende explicar. Nesta abordagem podem ser formuladas avaliações subjetivas que estão geralmente relacionadas ao comportamento dinâmico e aleatório dos processos hidrológicos. No entanto, na avaliação do modelo em termos de eficiência recomenda-se que a estimativa seja feita por meio de indicadores estatísticos (MORIASI et al., 2007).

Os indicadores estatísticos determinam a acurácia do modelo hidrológico pela comparação entre os dados simulados e observados. As estimativas traduzem matematicamente os aspectos específicos sobre a capacidade que o modelo tem de reproduzir o comportamento histórico e futuro da bacia hidrográfica. Além da qualidade das séries temporais alguns aspectos influenciam favoravelmente a obtenção de indicadores confiáveis, como bacias com boa densidade de monitoramento, chuva sazonal, declividades relativamente altas, existência de poucos reservatórios, sem planície de inundação e alto coeficiente de escoamento (KRAUSE et al., 2005; LEGATES et al., 1999; MORIASI et al., 2007).

Existem vários indicadores estatísticos na literatura para avaliação do desempenho dos modelos hidrológicos. No entanto, alguns são pouco testados ou usados em aplicações (KRAUSE et al. 2005). Entre os principais coeficientes destacam-se aqueles sugeridos por Moriasi et al. (2007) para o modelo SWAT. São eles: (i) Nash-Sutcliffe (NSE), (ii) tendência percentual bias (PBIAS), e (iii) equação da razão RMSE (RSR). O coeficiente de determinação (R^2) também é muito usado para verificar a correlação entre os dados. Na Tabela 1 estão descritos os principais coeficientes estatísticos de avaliação e as expressões que os definem.

Tabela 1 – Indicadores usados na avaliação de simulações hidrológicas (continua)

Indicador	Descrição*
Nash-Sutcliffe (NSE)	<p>Medida que compara o desempenho em termos da variância das vazões simuladas em relação às observadas, normalizando-as pela variância das vazões médias observadas. Graficamente representa o ajustamento (aderência) das vazões calculadas em relação às observadas. A amplitude de variação está no intervalo $(-\infty, 1]$. A maior desvantagem do coeficiente deve-se às diferenças entre as vazões simuladas e observadas, que são calculadas como valores quadrados. Como resultado, os erros são superestimados nas vazões maiores da série temporal do que nas vazões mínimas. A expressão de cálculo do indicador é dada por:</p> $NSE = 1 - \frac{\sum(\text{obs} - \text{sim})^2}{\sum(\text{obs} - \text{média obs})^2}$
Determinação (R^2)	<p>Medida de correlação linear entre as vazões simuladas e observadas cuja amplitude de variação está no intervalo $[0,1]$, indicando em porcentagem o quanto o modelo estimado consegue explicar os valores observados. Quanto maior o valor de R^2 melhor o ajuste entre os hidrogramas. A inclinação da reta mostra a relação entre os valores simulados e observados. A interceptação da reta no eixo-y indica a presença de um deslocamento (atraso ou adiantamento) entre os valores simulados e observados, ou que os dados não estão perfeitamente alinhados. Se a inclinação corresponder a “1” e a reta interceptar o eixo-y na origem o modelo reproduz fielmente as magnitudes dos dados medidos. Naturalmente, a análise pura deste indicador desconsidera a existência de erros relativos aos dados observados, o que raramente acontece na prática. Assim como o NSE o coeficiente de determinação é mais sensível às diferenças maiores entre valores simulados e observados. O cuidado que se deve ter quando se usa o indicador isoladamente é que ele apenas correlaciona a dispersão entre os valores das variáveis simuladas e observadas. Um modelo que sistematicamente subestima ou superestima as previsões na simulação pode resultar em valores próximos de “1”, mesmo que todas as previsões estejam erradas. Em termos gráficos se a inclinação da reta for diferente de “1” é porque existem diferenças de magnitude entre as vazões. A expressão de cálculo do indicador é dada por:</p> $R^2 = \frac{\sum(\text{obs} - \text{média obs}) * (\text{sim} - \text{média sim})}{[\sum(\text{obs} - \text{média obs})^2 * \sum(\text{sim} - \text{média sim})^2]^{0.5}}$

Tabela 1 – Indicadores usados na avaliação de simulações hidrológicas (conclusão)

Indicador	Descrição*
Tendência percentual bias (PBIAS)	<p>Medida percentual da tendência das vazões simuladas serem maiores ou menores que as respectivas vazões observadas. Valores próximos de zero ou com baixa magnitude indicam boa simulação sem tendência nas estimativas. Se a fórmula de cálculo considera valores simulados menos valores observados o resultado positivo indica que a vazão simulada está superestimada, e subestimada, se o resultado é negativo. A expressão de cálculo do indicador é dada por:</p> $PBIAS = \frac{\sum(sim - obs) * 100}{\sum(obs)}$
Equação da Razão RMSE (RSR)	<p>Medida sugerida por Moriasi et al. (2007) ainda pouco usada nas avaliações. A normalização da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) por meio da divisão pelo desvio padrão das vazões observadas torna o coeficiente adimensional, permitindo que seja usado mais facilmente para comparar os resultados das simulações. Quanto menor o valor de RSR melhor a simulação. Valor zero indica simulação perfeita. A expressão de cálculo do indicador é dada por:</p> $RSR = \frac{[(\sum(obs - sim)^2)^{0.5}]}{[(\sum(obs - média sim)^2)^{0.5}]}$

* Termos usados nas expressões:

obs = vazão observada, média obs = média das vazões observadas

sim = vazão simulada, média sim = média das vazões simuladas

Fonte: KRAUSE et al., 2005 e MORIASI et al., 2007.

A Tabela 2 reúne os indicadores estatísticos (NSE, PBIAS, RSR) sugeridos por Moriasi et al. (2007) para avaliarem em conjunto o desempenho da modelagem hidrológica em termos do componente vazão do SWAT. As classificações (escores) indicam a qualidade da simulação das vazões médias anuais e mensais, podendo ser estendidas para vazões médias diárias. O coeficiente de determinação (R^2) também deve ser considerado nas avaliações.

Tabela 2 – Classificação das simulações hidrológicas

Classificação	RSR	NSE	PBIAS
Muito bom	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$	$0,75 \leq NSE \leq 1,00$	$PBIAS \leq \pm 10$
Bom	$0,50 \leq RSR \leq 0,60$	$0,65 \leq NSE \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS \leq \pm 15$
Satisfatório	$0,60 \leq RSR \leq 0,70$	$0,50 \leq NSE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 25$
Não satisfatório	$RSR \geq 0,70$	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS \geq \pm 25$
R^2	Santhi et al. (2001) consideram que valores maiores do que 0,60 são aceitáveis para simulação.		
NSE	Santhi et al. (2001) consideram as seguintes faixas:		
	<ul style="list-style-type: none"> • $NSE \geq 0,65$ – Muito bom • $0,54 \leq NSE \leq 0,65$ – Bom • $0,50 \leq NSE \leq 0,54$ – Satisfatório 		

Fonte: MORIASI et al., 2007.

Krause et al. (2005) comparou nove diferentes critérios de eficiência de avaliação para os modelos hidrológicos e concluiu que cada um deles tem prós e contras, devendo ser levado em conta suas características a fim de que os resultados sejam interpretados convenientemente. Os coeficientes mais usados R^2 e NSE são muito sensíveis às vazões de pico do hidrograma, à custa de um melhor desempenho durante condições de vazões baixas. Logo, se o objetivo do ajuste visa à previsão de cheias, os picos de vazão são importantes e deve-se melhorar o coeficiente NSE, minimizando os erros dos picos. No caso em que se deseja verificar o aproveitamento da água nas estiagens, calcular as afluências a um reservatório ou estimar a disponibilidade hídrica o coeficiente NSE tem menos importância, sendo mais útil analisar a curva de permanência, que mostra a distribuição de frequência das vazões. Os erros nas vazões mínimas não afetam muito os coeficientes R^2 e NSE. Ambos os indicadores ao considerarem o termo quadrático em suas expressões contribuem para uma elevada ponderação dos valores extremos.

Na análise do desempenho das vazões simuladas deve-se integrar o conhecimento dos indicadores estatísticos com a inspeção dos diagramas de dispersão e hidrogramas a fim de que seja possível a avaliação da qualidade dos ajustes e eficiência dos modelos. Além disso, deve-se verificar o balanço hídrico dos componentes do ciclo hidrológico, que nem sempre são bem conhecidos na bacia hidrográfica, em razão da não existência de monitoramentos complementares. De qualquer maneira, há sempre a possibilidade por meios indiretos de ter uma indicação da ordem de grandeza dos volumes a fim de melhorar a capacidade de análise das simulações. Até mesmo o conhecimento do comportamento de bacias com características físicas, de ocupação e uso do solo e climas semelhantes servem para orientar as análises (KRAUSE, 2005; TUCCI, 1998).

1.4.5 Análise de incertezas

Apesar da presente dissertação não estar relacionada com o estudo da incerteza, esta questão é importante na avaliação dos modelos em geral e dos modelos hidrológicos em especial. Em um modelo a incerteza está associada ao grau de desconhecimento que se tem dos resultados obtidos na simulação e os dados observados, traduzido por um grau percentual de confiança. No caso dos valores simulados pode-se estabelecer qual a confiança desejada (90%, 95% e 97,5%) em relação à média observada. Portanto, não se trata de avaliar o ajuste das curvas simulada e observada, mas de quantificar a confiabilidade da estimativa em termos do intervalo de confiança, expresso pela média observada da amostra mais ou menos a

margem de erro calculada com base no desvio padrão e número de elementos da amostra (van GRIENSVEN, 2006).

Refsgaard et al. (2007) classificam a natureza da incerteza, em: (i) epistêmica, devido ao conhecimento incompleto e (ii) estocástica, devido à própria natureza do fenômeno. A primeira pode ser reduzida melhorando a análise dos dados, adicionando pontos de monitoramento, aumentando a dimensão das séries temporais de informação ou aprofundando o conhecimento de como o sistema modelado funciona. A segunda, inerente à natureza caótica dos fenômenos naturais, não pode ser eliminada, independentemente do nível de conhecimento do modelo ou a dimensão das séries.

As principais incertezas na modelagem hidrológica referem-se: (i) às variações aleatórias e erros de aquisição das variáveis de entrada e saída, (ii) às limitações da estrutura dos modelos para representar os processos físicos, e (iii) às dúvidas quanto à estimativa dos parâmetros. No primeiro caso as incertezas envolvem a variabilidade natural, erros de medição das mesmas e insuficiência de dados. Se comparados precipitação e evaporação as variações são mais significativas para a precipitação. O adensamento dos postos de observação e registros tomados em intervalos de tempo subdiários podem minimizar as incertezas. As incertezas por causa da evapotranspiração devem-se às equações escolhidas e aos dados. No segundo caso as incertezas devem-se à capacidade do modelo em representar os processos envolvidos. A escolha do modelo e a disponibilidade de dados podem influenciar os resultados. Nem sempre é possível ou trivial desenvolver equações dentro do conceito estatístico das variáveis e parâmetros das equações diferenciais. No terceiro caso é necessário conhecer a influência de cada parâmetro na variação da resposta de simulação (TUCCI, 1998).

O que se pretende com a investigação da incerteza em um modelo hidrológico é caracterizar com a máxima exatidão a variabilidade natural do sistema e não uma previsão determinística. Nas várias etapas da modelagem e simulação a incerteza deve ser avaliada a fim de que possa ser conhecida e, se possível, mitigada. Com relação ao tipo de incerteza (estatística, cenário, qualitativa e falta de conhecimento) e a fase da modelagem existem ferramentas e metodologias para estimativa em que são abordadas as fontes de incerteza em relação aos dados e ao modelo. De maneira geral, o estudo de incertezas na aplicação de um modelo apenas inclui as características da informação, parâmetros e modelo. Tradicionalmente, a avaliação de incertezas é realizada apenas no final da modelagem depois das etapas de calibração e validação (REFSGAARD et al., 2007).

1.5 Sistemas de Informações Geográficas

Os SIG são cada vez mais usados nos estudos dos sistemas ambientais, entre os quais as bacias hidrográficas, por sua capacidade de integrar os aspectos territoriais e temporais por meio de uma base de dados referenciada espacialmente. Os SIG permitem representar o espaço geográfico e seus objetos de maneira eficiente com as técnicas da cartografia e computacionais. Os SIG são ferramentas computacionais criadas para armazenar, gerenciar e manipular dados geográficos que descrevem objetos do mundo real em termos da sua posição em relação a um sistema de referência espacial, geometria, topologia e atributos.

Os SIG podem ser usados como ferramentas para produção de mapas, banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial, e suporte para análise espacial dos fenômenos (hidrologia, geologia, agricultura, etc.). Cada pacote computacional, em função dos seus objetivos e necessidades, emprega os componentes de modo distinto. Em um nível mais próximo do usuário está a interface que define como o sistema é controlado e operado. O nível intermediário corresponde ao processamento de dados (entrada, edição, análise, visualização e saída). Internamente, o banco de dados geográfico oferece armazenamento e recuperação dos dados espaciais e seus atributos (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001).

Nos SIG os objetos existentes na bacia hidrográfica podem ser representados por estruturas do tipo vetorial e matricial (“*raster*”). No formato vetorial os objetos, com ou sem relações topológicas de conectividade e contiguidade, são representados por pontos, linhas e polígonos associados a sua localização geográfica e dados tabulares sobre suas características. No formato *raster* os objetos são representados por uma grade ou matriz de células (pixels) em que cada célula está referenciada geograficamente e contém um valor numérico, associado ao fenômeno, que pode representar uma característica, um atributo qualitativo ou quantitativo, sendo a resolução espacial dada pelo tamanho da célula.

No caso da bacia hidrográfica, importante dado SIG é o MDE, que representa a distribuição contínua das altitudes deste espaço. Com este plano de informação pode ser gerada a drenagem e discretização da bacia, bem como extraídos diversos parâmetros geomórficos, como perímetro, área, declividades e características dos canais, que servem de entradas aos modelos hidrológicos de base física, assim como a criação de perfis/seções, cálculo de volumes, visões sombreadas do relevo etc. A qualidade dos produtos obtidos está relacionada com a resolução espacial do MDE.

Os SIG possibilitam a integração dos planos de informação temáticos, sobre solo, geologia, vegetação, localização de redes de monitoramentos etc., que complementam o entendimento do espaço geográfico da bacia hidrográfica. Dessa maneira, ao integrar o conhecimento da bacia tornam a aplicação compreensiva e por meio de suas funcionalidades permite a manipulação e análise dos dados para geração de novos produtos (mapas, gráficos e tabelas), e modelagem das informações espacialmente distribuídas (TUCCI, 1998).

No caso dos estudos hidrológicos os SIG podem ser usados isoladamente para manipulação e análise dos dados geográficos da bacia hidrográfica ou integrados/acoplados com modelos hidrológicos, aproveitando seu maior potencial no estudo dos fenômenos e processos hidrológicos e suas interações no âmbito da bacia, bem como dos efeitos que as alterações do clima e antrópicas podem causar na produção de água, sedimentos e contaminantes, como meio de aplicar o conhecimento adquirido à gestão, planejamento e tomada de decisão na área dos recursos hídricos.

A integração entre modelo hidrológico e SIG tem sido importante em diversas aplicações. De um lado, os modelos são capazes de representar o comportamento dos fenômenos hidrológicos de caráter espaço-temporal por meio de equações matemáticas. De outro, o ambiente SIG empresta suas funcionalidades, como banco de dados, processamento de MDE, armazenamento e operações sobre informações espaciais e não espaciais para simular os processos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica. Os esforços no sentido dessa integração começaram no final da década de 1980, em razão da diminuição do custo da tecnologia computacional e aumento da velocidade dos processadores, assim como das demandas para melhorar a capacidade analítica para que fossem obtidas representações mais acuradas do ambiente. Os avanços foram dirigidos para modelagem e simulação dos fenômenos hidrológicos, processamento de modelos numéricos para representação topográfica da bacia e espacialização dos dados climáticos.

A conexão entre modelo hidrológico e SIG pode variar. No *acoplamento fraco* os dados gerados no ambiente SIG são usados como entradas para o modelo e as saídas são transferidas ao SIG para exibição. A troca dos dados faz-se com arquivos no formato ASCII ou binários. Esta é uma limitação para os modelos que usam formatos fixos para organizar os dados de entrada. Outra desvantagem é não aproveitar toda a funcionalidade de análise espacial do SIG. Na *ligação forte* os dados são trocados automaticamente e a exibição dos resultados deve ser configurada com as funcionalidades do SIG, que é usado como interface para exibição e interpretação. A vantagem está no desempenho computacional e na interatividade entre os dois softwares. As técnicas de *overlay*, *buffer* e de localização estão

disponíveis, aumentando a capacidade de interpretação dos SIG. O *acoplamento integrado* se dá por meio da incorporação dos componentes funcionais de um sistema dentro do outro, eliminando a necessidade de software intermediário para transferência dos dados. O SIG e o modelo não são mantidos como unidades independentes. Os dados e processos são compartilhados pelos sistemas. A grande vantagem deve-se ao melhor desempenho e flexibilidade da análise espacial, em razão das funções SIG estarem disponíveis para o usuário. A análise de cenários, outra vantagem, tem sido pouco explorada em tais sistemas devido à complexidade do seu desenvolvimento, especialmente em modelos de qualidade da água (MARTIN et al., 2005; SUI; MAGGIO, 1999).

Martin et al. (2005) destacaram algumas questões que devem ser aperfeiçoadas nos SIG para que sejam superadas as limitações em relação aos modelos hidrológicos de base física:

- a) A representação rígida dos dados nos SIG por meio de vetores ou matriz de células não atende aos modelos estocásticos. Em tais modelos o espaço e o tempo são conceitualizados de maneiras diferentes, uma vez que as variáveis são representadas como um campo aleatório, uma região do espaço e do tempo em que o valor das variáveis em cada ponto é definido pela distribuição de probabilidade. Uma nova estrutura precisa ser desenvolvida que considere espaço, tempo e aleatoriedade.
- b) A fraca capacidade dos SIG lidarem com dados que representam fluxos. Nos SIG a representação dos fluxos é baseada em algoritmo que implementa o objeto em movimento, enquanto nos modelos hidrológicos considera-se a visão de um quadro fixo no espaço através do qual o movimento ocorre.
- c) No caso da variável tempo existem várias estruturas para sua representação, como discretas ou contínuas, lineares, cíclicas e associadas a intervalos de duração. Apesar disso, não fazem parte da maioria dos modelos de dados nos SIG. A atual geração SIG somente captura a variação temporal no espaço de maneira estática, não sendo compatível com a representação dinâmica ou temporal dos fenômenos.

- d) No caso da discretização do espaço e da resolução espacial o conhecimento dos impactos nos resultados da modelagem hidrológica tem sido bem discutido. No entanto, há necessidade de pesquisa sobre as interações do clima, águas superficiais e subterrâneas que estão relacionadas com os processos nos âmbitos regional e local.
- e) Ao contrário do que acontece nos modelos em que prevalece o rigor matemático nos SIG os relacionamentos espaciais não conseguem capturar eficientemente os algoritmos hidrológicos, uma vez que a associação entre os dados é feita de maneira clássica em que dois conjuntos de dados usam uma chave comum. Dessa maneira, o uso de algoritmos avançados ou estruturas matemáticas complexas encontram dificuldades de serem integrados inteiramente na base de dados relacional SIG.

1.6 Modelos hidrológicos de base física

Restrepo e Schaake (2009) destacaram a necessidade de que novas pesquisas na área dos modelos hidrológicos de base física incluam aspectos que melhorem seu desempenho nas aplicações, entre eles: (i) inclusão de diferentes fontes de incerteza, (ii) diminuição do esforço requerido na calibração dos parâmetros, (iii) melhorias na previsão e tempo de processamento, (iv) capacidade para realização de ajustes, (v) inclusão de meios para previsão de temperatura, umidade do solo e qualidade da água, (vi) melhoria das técnicas para estimar precipitações por meio da combinação das observações com sensores remotos e previsões obtidas com modelos numéricos de alta resolução, e (vii) inclusão de técnicas estatísticas para adequar a escala global dos eventos climáticos aos processos modelados.

Daniel et al. (2011) destacaram algumas questões importantes relacionadas com os modelos hidrológicos de base física:

- a) Atualmente, os avanços realizados na área das geotecnologias auxiliam a geração, preparação e gerenciamento dos dados necessários à modelagem. Em muitas aplicações pouco ou nenhum dado está disponível para o estudo de bacias. Nestes casos as funcionalidades SIG baseadas em técnicas de interpolação geoestatística oferecem opções para geração de dados.

- b) No campo da estimativa e calibração de parâmetros, assim como na análise de incertezas, alguns desafios estão sendo considerados pelos pesquisadores para o aperfeiçoamento dos modelos. Entre eles, a não linearidade de certos processos, os erros relacionados com os dados, a insuficiência de dados, a correlação entre parâmetros, a resposta irregular de processos para certos conjuntos de parâmetros, a natureza dos objetivos dos modelos, e a melhoria de previsão para bacias não monitoradas, onde os dados são esparsos e de baixa qualidade.
- c) Outras questões devem incluir a modelagem do transporte de contaminantes através dos volumes existentes na bacia e técnicas para avaliar a qualidade da água nos rios, tendo em vista as interações químicas e biológicas no ambiente, assim como a integração dos modelos com sistemas de apoio à decisão.

Na Tabela 3 estão indicados alguns pacotes de domínio público de modelos hidrológicos de base física e de qualidade da água para aplicações em bacias agrícolas. O AnnAGNPS e o SWAT têm os principais componentes: hidrologia, sedimentos e químicos. O PRMS é baseado na equação do escoamento. O HSPF é preferido para áreas mistas (urbanas e rurais). O WEPP é voltado para avaliação dos processos erosivos do solo.

Tabela 3 – Modelos hidrológicos de base física e de qualidade da água (continua)

Modelos	Componentes	Fluxo superficial	Fluxo subsuperficial	Qualidade	Escala espacial	Escala temporal	Representação da bacia
AnnAGNPS <i>Annualized Agricultural Non-point Source</i>	Sedimento, nutriente e pesticida	CN, TR-55 para fluxo de pico de vazão	Equação de Darcy	N, P, pesticidas, carbono orgânico, nutrientes	Distribuído	Passo diário, subdiário	Superfície, canais, corpos hídricos
ANSEWRS 2000 <i>Area Non-point Source Watershed Environment Response Simulation</i>	Escoamento superficial, infiltração, drenagem subsuperficial, solo, sedimento	Equação de Manning, equação de continuidade	Não existe componente	Não existe componente	Distribuído	Evento	Grade regular
HSPF <i>Hydrological Simulation Program – FORTRAN</i>	Escoamento superficial, áreas permeáveis/impermeáveis, canais, corpos hídricos	Base empírica	Percolação, escoamento de base	Temp. da água/solo, CO ₂ , N, NH, N/P orgânico, pesticidas	Semi-distribuído	Contínuo	Superfície, canais, corpos hídricos

Tabela 3 – Modelos hidrológicos de base física e de qualidade da água (conclusão)

Modelos	Componentes	Fluxo superficial	Fluxo subsuperficial	Qualidade	Escala espacial	Escala temporal	Representação da bacia
PRMS <i>Precipitation-Runoff Modeling System</i>	Hidrologia, escoamento superficial, canais, corpos hídricos, solo, sedimento	Equações de onda cinemática	Não existe componente	Não existe componente	Distribuído	Evento	Superfície, canais, corpos hídricos
WEPP <i>Water Erosion Prediction Project</i>	Geração clima, irrigação, infiltração, fluxo superf., crescimento de vegetação, solo	Equações de onda cinemática	Equação de Green & Ampt	Não existe componente	Distribuído	Contínuo	Canais, corpos hídricos
SWAT <i>Soil and Water Assessment Tool</i>	Clima, sedimento, solo, crescimento de vegetação, nutrientes, pesticidas, manejo, canais, <i>reservoirs</i>	CN para escoamento superficial, TR-55 para fluxo de pico de vazão	Fluxo lateral, escoamento de base	N, P, pesticidas, C	Semi-distribuído	Contínuo, passo diário	Sub-bacias, URH, aquíferos, canal principal, <i>reservoirs</i>

Fonte: DANIEL et al., 2011.

1.7 Sistema hidrológico SWAT

O SWAT é um modelo de base física semidistribuído que opera de maneira contínua para simular o ciclo hidrológico e estimar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimento e qualidade da água em bacias hidrográficas agrícolas não instrumentadas. Os processos físicos, associados com o movimento da água e sedimento, crescimento de vegetação, ciclo do nitrogênio, e outros, são modelados por meio de equações matemáticas relativamente simples com base nas informações sobre o clima, propriedades do solo, topografia e operações agrícolas (NEITSCH et al., 2005).

A origem do SWAT pode ser atribuída às ações que remontam à década de 1930, quando as primeiras iniciativas do Serviço de Conservação de Solos dos EUA (*Soil Conservation Service - SCS*) tinham como preocupação entender e analisar os processos hidrológicos nas bacias agrícolas, por causa dos impactos do manejo do solo sobre a erosão dos solos, inundações, recursos hídricos e economia. Daí em diante as equipes que passaram pelo Departamento de Agricultura realizaram monitoramentos contínuos, coletas e pesquisas que culminaram nos dias atuais com o desenvolvimento de vários modelos hidrológicos de simulação (GASSMAN et al., 2007).

A partir da década de 1980 os seguintes modelos contribuíram para consolidação do SWAT:

- a) CREAMS (*Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management*) – desenvolvido (Knisel, 1980) para modelar o impacto da gestão do uso do solo na água, sedimentos, nutrientes e pesticidas. A precipitação diária foi introduzida como componente hidrológico.
- b) GLEAMS (*Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems*) – desenvolvido (Leonard et al., 1987) para simular a contaminação de aquíferos por pesticidas.
- c) EPIC (*Environmental Impact Policy Climate*) – desenvolvido (Williams et al., 1984) para simular os processos de erosão do solo, em particular o impacto da erosão causada pela atividade agrícola.
- d) SWRRB (*Simulator for Water Resources in Rural Basins*) – incorporou (Arnold & Williams, 1987) os componentes dos três modelos CREAMS, GLEAMS e EPIC, e outros novos para simular os impactos do manejo do solo sobre a água e transporte de sedimentos em bacias não instrumentadas.
- e) ROTO (*Routing Outputs to Outlet*) – desenvolvido (Arnold et al., 1990) para ampliar a capacidade do SWRRB em simular áreas maiores.
- f) GRASS (*Geographic Resources Analysis Support System*) – primeira interface SIG (Srinivasan & Arnold, 1994).

O SWRRB é o núcleo do SWAT com seus vários componentes. Com a inclusão do ROTO o modelo ampliou sua eficiência computacional para simular mais de 10 sub-bacias, permitindo a estimativa dos impactos no uso do solo das sub-bacias nas áreas a jusante. Entre as principais mudanças incluídas no SWRRB estão: (i) simulação simultânea da vazão em diversas sub-bacias, (ii) adição do fluxo subterrâneo e do fluxo de retorno, (iii) incorporação do armazenamento em lagos e reservatórios, (iv) incorporação de dados de chuva, radiação solar e temperatura para simulações de longos períodos e sua representação espacial, (v) aperfeiçoamento do método que prevê a taxa de pico de escoamento no canal, (vi) adição do modelo de crescimento de vegetação do EPIC, (vii) adição da rotina para estimar inundação, (viii) adição dos componentes de transporte de sedimentos para simular o movimento em lagos, reservatórios, canais e vales, e (ix) incorporação do cálculo da perda por transmissividade.

Além de servir de base para o desenvolvimento de outros modelos a fim de atender aplicações específicas o SWAT tem sido aprimorado continuamente desde sua criação com a expansão dos recursos de modelagem hidrológica e criação de interfaces SIG para suportar as entradas de topografia, uso do solo, tipo do solo e outras informações espaciais. O SWAT2000 adotou a linguagem de programação Fortran90, disponibilizou no seu *website* os manuais de documentação teórica, das entrada/saída e tutorial. A versão 2005, entre outros recursos, incluiu as ferramentas automáticas de análise de sensibilidade e calibração a fim de aumentar a eficiência analítica dos resultados das simulações (NEITSCH et al., 2005).

Desde 2001 várias conferências internacionais foram promovidas pela equipe do SWAT. A primeira foi na Alemanha e a próxima será realizada em julho de 2014 na cidade do Recife, confirmando a importância que o modelo passou a ter no Brasil. Com relação aos artigos científicos publicados em todo o mundo o SWAT mantém uma lista completa e atualizada no *SWAT Literature Database*.

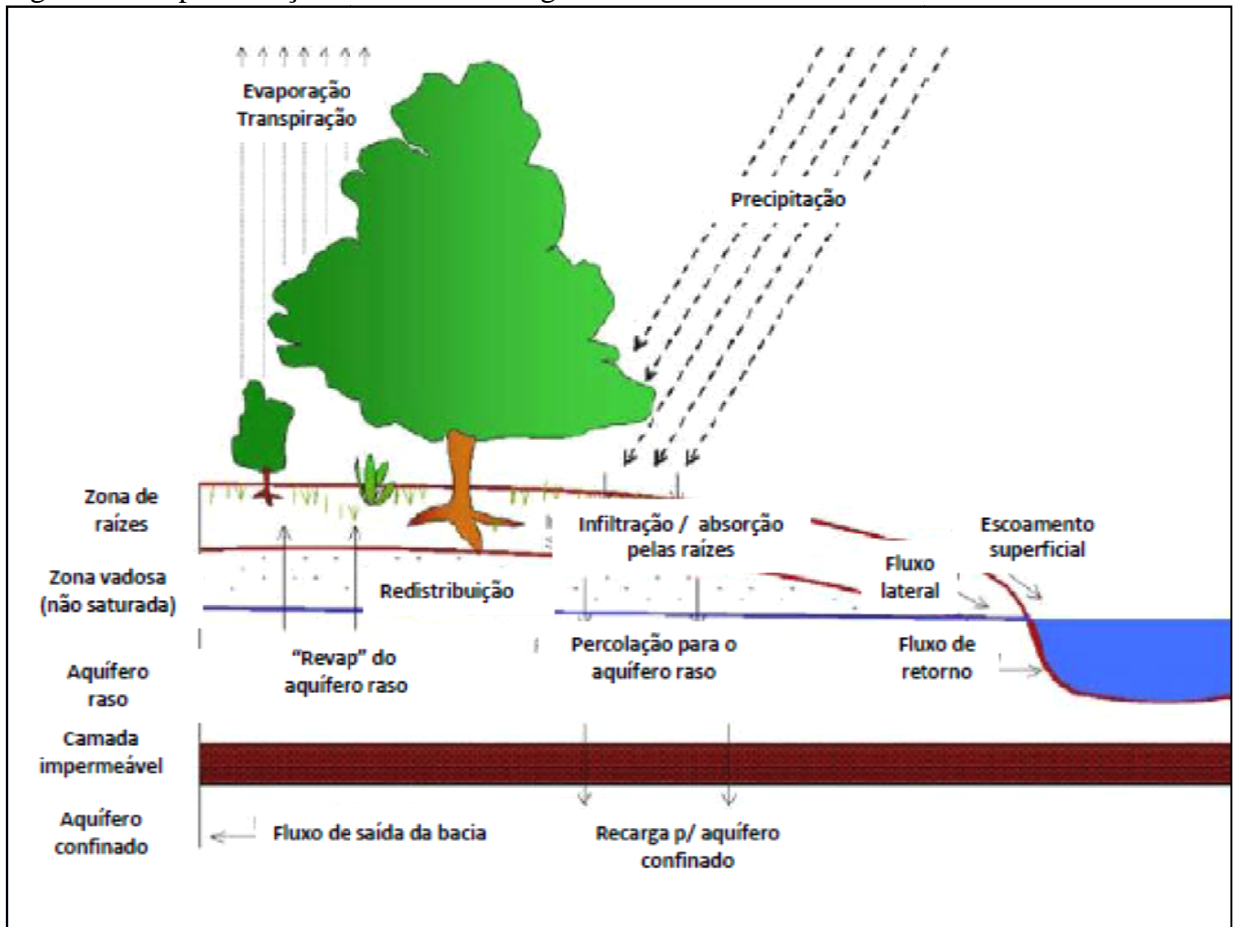
1.7.1 Descrição do SWAT2005

As informações a seguir sobre o SWAT2005 descrevem a maneira como os componentes do ciclo hidrológico são considerados pelo modelo na simulação do processo chuva-vazão, bem como os aspectos de sua implementação pela interface SIG. Todos os conceitos estão disponíveis em Neitsch et al. (2005), no *SWAT Theoretical Documentation – Version 2005* e Winchell et al. (2007), no *ArcSWAT Interface for SWAT 2005 – User’s Guide*.

1.7.1.1 Aspectos conceituais

O SWAT realiza a modelagem hidrológica da bacia hidrográfica com base na fase terrestre (“*land phase*”) e na fase de propagação (“*routing phase*”) do ciclo hidrológico (Figura 1). Os resultados da fase terrestre alimentam o módulo que representa as perdas por amortecimento e propagação das massas de água ao longo da rede de drenagem. O módulo de amortecimento e propagação adota a equação de Manning e gerencia o traslado das massas de água, sedimentos e químicos através da rede fluvial e de canais das sub-bacias que compõem a bacia. O modelo permite também a representação de corpos hídricos dentro e fora da rede de drenagem.

Figura 1 – Representação do ciclo hidrológico no SWAT.



Fonte: NEITSCH et al., 2005.

Os componentes hidrológicos do SWAT estão descritos resumidamente no Apêndice A. Na presente dissertação foram representados e analisados somente os processos que envolvem a produção de água e seu transporte na rede de canais. No entanto, apesar de não ser escopo deste estudo vale destacar que o componente de manejo do solo fornece submodelos que simulam as condições de cultivo, plantio, irrigação, aplicação de fertilizantes e nutrientes, colheita e pastoreio. O modelo também fornece a base de dados que contém as informações para simular a redistribuição de nutrientes e pesticidas que ocorrem em várias operações de preparo do solo para o cultivo com o tipo de equipamento usado e os valores da profundidade e eficiência da mistura desses constituintes. Se entre as operações de manejo houver aplicação de fertilizantes e/ou pesticidas o composto especificado em cada caso correlaciona automaticamente os valores dos parâmetros por meio das respectivas bases de dados.

O SWAT pode ser usado para simular uma única bacia hidrográfica ou um sistema de múltiplas bacias interconectadas. Cada bacia pode ser dividida em uma ou mais sub-bacias e estas discretizadas em uma ou mais combinações homogêneas de cobertura/uso do solo, tipo do solo e declividade, denominada de “unidade de resposta hidrológica” (URHs). A divisão em URHs é particularmente importante em bacias dominadas por usos do solo distintos. Dessa maneira, na fase de simulação a variabilidade espacial dos parâmetros da bacia pode ser capturada no cálculo dos componentes hidrológicos por meio da equação do balanço hídrico.

O cálculo do balanço hídrico baseado no princípio da conservação de massa é realizado separadamente em cada URH. O somatório correspondente à sub-bacia é transferido para a rede de canais que conduzem o volume para o exutório. As URHs na sub-bacia não estão interligadas logicamente. São unidades estanques para a quantificação dos processos. Ao contrário, as sub-bacias são interligadas pelo canal que as atravessa e conduz a água e cargas até o exutório.

O SWAT possui dois métodos para calcular o escoamento superficial. O *método SCS Curva Número* gera o escoamento com base em séries diárias de precipitação, sendo capaz de simular longos períodos para computar os efeitos das alterações provocadas pela ocupação e uso do solo, gerando saídas diária, mensal ou anual dos componentes do ciclo hidrológico. O *método Green & Ampt* simula a infiltração com séries subdiárias de precipitação. Neste caso, a água que não infiltra gera o escoamento superficial.

Na bacia hidrográfica as condições do clima são resultantes da umidade e energia, que dependem das variações de precipitação, temperatura, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar. O modelo controla além dos volumes líquidos, a perda de solos por erosão, os vários modos de transformação dos nutrientes com base nos ciclos do nitrogênio e fósforo, o transporte dos pesticidas em solução ou absorvidos nos sedimentos direcionados para os canais ou para as zonas inferiores dos solos até os aquíferos.

O crescimento de vegetação tem como base os conceitos sobre o desenvolvimento fenológico. O crescimento pode ser inibido pelo estresse devido à temperatura, água e nutrientes. O modelo tem informações sobre diversos tipos de coberturas e culturas vegetais e simula o crescimento para calcular a remoção de água e nutrientes através da zona radicular, transpiração e produção de biomassa. O modelo pode diferenciar entre plantas anuais e perenes. Estas mantêm um sistema radicular durante o ano, ficando em dormência no inverno. O ciclo do crescimento é importante nas aplicações que consideram o manejo do solo ou não. Dessa maneira, atende às necessidades das aplicações em que existem coberturas naturais ou culturas não manejadas. A produção de biomassa em condições ideais é calculada diariamente

se a temperatura diária estiver acima da temperatura basal, sendo função da energia interceptada pela planta, que é função da radiação solar e do índice de área foliar, e da eficiência em converter energia em biomassa.

A temperatura média do solo impacta o movimento da água e a taxa de decaimento de resíduo no solo. É calculada com base na temperatura da superfície do solo, que é função da cobertura vegetal, cobertura residual de colheitas, temperatura do solo nu e temperatura anterior da superfície do solo, e com base na temperatura no centro da camada do solo, que é função da temperatura da superfície e profundidade do solo. A profundidade é dependente da densidade volumétrica do solo e do seu conteúdo de umidade. Se a temperatura do solo for menor ou igual a 0°C não há movimento de água.

1.7.1.2 Planos de informação

Os dados espaciais são fundamentais para introduzir a bacia hidrográfica no SWAT e requer a entrada dos planos de informação MDE, hidrografia, cobertura/uso do solo e tipo do solo. A topografia da bacia é usada para determinação das direções dos fluxos, localização dos canais e energia potencial para o transporte de água, sedimentos e nutrientes durante a simulação. Quanto maior a resolução do MDE maior a acurácia em relação à representação altimétrica e das direções dos escoamentos na bacia.

Inicialmente, o MDE é processado para gerar a superfície de direção de fluxo acumulado. Em seguida, a rede de canais é definida com a especificação de um valor limite de área para formação dos canais. Quanto menor esta área maior o detalhamento da drenagem e o número de sub-bacias que podem ser criadas. O modelo fornece uma faixa de valores para a área limite que pode ser testada a fim de que se defina o esquema de representação da hidrografia, compatível com a escala da aplicação. Finalmente, com o processamento da área limite a rede de canais é formada por segmentos e junções (“*outlets*”). As junções definem os pontos divisórios das sub-bacias.

A interface depois da geração da rede de canais permite qualquer configuração de sub-bacias por meio da eliminação ou inclusão de junções. Esta característica flexibiliza os estudos hidrológicos, porque podem ser definidos pontos de interesse específicos na drenagem, onde exista, por exemplo, estação de monitoramento em seção do canal mesmo que não corresponda a uma confluência de canais. Neste caso, o ponto criado torna-se do ponto de vista da modelagem uma junção que determina a montante a área que se quer estudar (sub-bacia). A adição de junções é recomendada se for necessário: (i) reduzir o tempo de

transporte nos canais a fim de que não supere um dia na sub-bacia, (ii) igualar a área das sub-bacias, e (iii) otimizar a simetria da sub-bacia a fim de que o tempo que a água leva para atravessá-la seja igual em todos os seus pontos.

Estabelecido o esquema de junções deve ser fornecida a localização do exutório. Em seguida, o processamento culmina com a geração de uma ou mais sub-bacias que ficam espacialmente conectadas pelos segmentos dos canais. O modelo considera os canais com o formato trapezoidal para os cálculos de transporte e amortecimento das cargas e perdas associadas. Além do perfil de seção transversal, os canais têm outras características, como comprimento, declividade, largura e profundidade. As sub-bacias ficam definidas por suas localizações, perímetros e áreas. A introdução de corpos hídricos se necessários à modelagem pode ser feita nesta etapa.

Terminado o delineamento da bacia hidrográfica os planos de informação cobertura/uso do solo e tipo do solo devem ser inseridos e reclassificados a fim de que as classes existentes sejam associadas ao esquema de distribuição das sub-bacias que foram geradas e aos seus dados. Nesta etapa as bases *Land cover/Plant growth* e *User soil database* são ligadas modelo. O plano de declividades é gerado a partir do MDE e reclassificado de acordo com o número de classes e respectivos intervalos que devem ser especificados. A divisão em classes de declividades é recomendada para aumentar a distribuição espacial da variação topográfica nas URHs. O limite máximo de cinco classes permitido pelo modelo em geral é suficiente. Uma boa definição de classes pode influenciar o tempo com que o escoamento superficial atinge os canais de drenagem, implicando em menores ou maiores vazões e ocorrência dos picos. Posteriormente à reclassificação deve ser feita a sobreposição (“*overlay*”) dos planos de informação.

O conhecimento da distribuição das áreas temáticas com base no relatório gerado pelo modelo depois da reclassificação/*overlay* é relevante para o procedimento subsequente de geração das URHs, que pode (ou não) considerar a eliminação de classes minoritárias referentes à cobertura/uso do solo, tipo do solo e declividade. A eliminação das classes tem como objetivo reduzir/simplificar o número de combinações elementares. Neitsch et al. (2002) sugerem que o número máximo de URHs não deve ultrapassar 10 por sub-bacia, uma vez que sua quantidade aumenta muito a complexidade para o controle dos parâmetros e processos na etapa de calibração, além de exigir maior esforço computacional. Em certos casos pode ser mais interessante trabalhar com um número maior de sub-bacias.

O modelo admite três opções para geração de URHs no nível da sub-bacia, sendo duas automáticas com base na cobertura/uso do solo, tipo do solo e declividade dominante, e na URH dominante. A terceira opção gera múltiplas URHs. Neste caso podem ser definidos níveis de sensibilidade para eliminação de classes de cobertura/uso do solo, tipo do solo e declividade, considerando aquelas que não tenham influência significativa nos resultados da simulação. A sequência é feita seguindo uma ordem em que pelo menos um dos temas seja considerado. Se todos os temas têm classes para serem eliminadas, em primeiro lugar eliminam-se classes de cobertura/uso do solo em relação à área da sub-bacia. Em segundo lugar, eliminam-se classes de solos em relação à área de cada classe de cobertura/uso do solo remanescente da fase que a precede. Em terceiro lugar, eliminam-se classes de declividades em relação à área de cada classe de solo remanescente da fase que a precede. No caso dos solos é recomendado que classes com área igual ou menor do que 3% em relação à área de cobertura/uso do solo podem ser eliminadas. No entanto, percentuais maiores podem ser considerados com base nas particularidades da área estudada. A mesma lógica vale para classes de cobertura/uso do solo em relação às áreas das sub-bacias.

O papel desempenhado pelas URHs na bacia hidrográfica é muito importante, considerando que a maior parte da parametrização é feita no nível destas unidades homogêneas e muitos processos são simulados com esta abrangência espacial. Não existem interações entre as URHs em uma sub-bacia (fato já mencionado), uma vez que o modelo não implementa esta conectividade. Caso seja importante a interação entre as áreas em termos de fluxos hidrológicos deve-se optar pela discretização mais abrangente em sub-bacias, porque somente neste nível as relações espaciais podem ser especificadas pelo modelo. Como regra geral uma sub-bacia deve ter de 1 a 10 URHs. Se houver necessidade de incorporar maior complexidade à bacia deve ser definido um número maior de sub-bacias.

1.7.1.3 Dados de entrada

O SWAT tem um forte componente físico e requer uma grande quantidade de dados. A seguir são listadas as entradas essenciais do modelo:

- a) Parâmetros físico-hídricos dos perfis dos solos que devem ser inseridos na base *User soils database*.
- b) Parâmetros de cobertura/uso do solo fornecidas na base *Land cover/Plant growth database*.

- c) Séries meteorológicas diárias com dados de precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar. As entradas de precipitação devem ser subdiárias para aplicações com o método de infiltração Green & Ampt.
- d) Dados mensais das variáveis meteorológicas que devem ser inseridos na base *User weather stations database* necessários para gerar o clima se não estão disponíveis as séries diárias.
- e) Localização das estações meteorológicas e climática que fazem a ligação com os dados meteorológicos e com a base *User weather stations database*. Um arquivo deve ser criado para cada variável e pode conter uma ou mais estações. O modelo considera com base nos centróides a estação mais próxima da sub-bacia.

No SWAT um aspecto importante sobre os solos refere-se ao parâmetro Curva Número (CN), que é função da permeabilidade, do uso do solo e da condição inicial de umidade do solo, que determina a relação entre a infiltração e o escoamento superficial durante os eventos de precipitação. O parâmetro CN é ajustado em função da retenção de umidade no solo. O valor de CN aproxima-se de 100 à medida que o solo atinge a saturação. No modelo sua estimativa pode ser um fator de incerteza em função da variabilidade espacial dos parâmetros físico-hídricos do solo. A condição de umidade antecedente corresponde ao valor do parâmetro CN2 relativo à situação média de umidade do solo, entre seco (CN1), relativo à umidade do solo no ponto de murcha permanente, e saturado (CN3), relativo à umidade do solo na capacidade de campo. Os valores de CN1 e CN2 são calculados a partir de CN2. O modelo calcula o parâmetro de retenção em função da disponibilidade de água no solo ou em função da evapotranspiração da vegetação.

O SWAT usa a equação de infiltração de Green & Ampt modificada (Mein e Larson, 1973) para calcular o escoamento superficial com dados de precipitação subdiários. Neste caso, são necessários os parâmetros de precipitação, condutividade hidráulica efetiva, potencial matricial da frente de umedecimento, variação do conteúdo de umidade do solo e infiltração acumulada no intervalo de tempo. A condutividade hidráulica efetiva é função da condutividade hidráulica saturada e do parâmetro CN2. Este incorpora na equação de infiltração os impactos no uso do solo no cálculo da condutividade hidráulica efetiva. Se operações de manejo do solo fazem parte da aplicação o valor de CN2 pode ser substituído pelo valor de CNOP relativo ao tipo de operação envolvida.

Se não são fornecidas as variáveis meteorológicas o modelo pode gerar o clima para a bacia hidrográfica por meio do “gerador climático” que usa os dados estatísticos mensais do *User weather stations database*. Esta base é obrigatória e deve ser criada com série histórica de dados, não inferior a cinco anos (preferencialmente 20 anos ou maior), que seja representativa das condições climáticas da área estudada. Vale ressaltar que nem sempre as séries disponíveis são longas ou contêm todas as variáveis desejadas. Se existem tais dificuldades podem ser feitas composições com outras fontes de dados ou mesmo serem obtidos indiretamente, o que é muito comum para velocidade do vento, radiação solar e temperatura do ponto de orvalho. Mas neste caso a aplicação está sujeita a incertezas maiores nos resultados.

Se não forem fornecidos os dados de evapotranspiração potencial o modelo dispõe de três métodos para calculá-la: (i) Hargreaves, (ii) Penman-Monteith e (iii) Priestley-Taylor. Os métodos variam em função da quantidade das variáveis usadas nas equações. A escolha do método deve levar em conta as características da bacia hidrográfica e a qualidade dos dados usados nas fórmulas matemáticas.

1.7.1.4 Parametrização

Os dados referentes à parametrização advêm do processamento dos planos de informação e dos dados fornecidos ao modelo. Ao terminar a associação dos dados meteorológicos por meio das tabelas de localização das estações é liberado o comando *Write all* para criação dos arquivos parametrizados (“*Inpu files*”) no nível de bacia, sub-bacia ou URH, conforme a abrangência espacial do macroprocesso/componente hidrológico a ser simulado. Nesta etapa ainda não se dispõem de todos os dados necessários à modelagem, como manejo do solo, uso de água, aplicação de fertilizantes e pesticidas, além dos parâmetros relacionados com métodos/algoritmos específicos para execução do modelo. Vale ressaltar que se houver alteração na distribuição das URHs nova associação com os dados de clima e parametrização devem ser realizadas.

1.7.1.5 Edição

Antes que se passe à execução do modelo (simulação) pode existir a necessidade da definição/alteração de alguns parâmetros relativos à aplicação. Nesta etapa são disponibilizadas para edição as bases de dados e arquivos parametrizados (“*databases / Input files*”). Os parâmetros de configuração, execução, métodos e controle também devem ser informados. Os parâmetros necessários que ainda não haviam sido especificados podem ser inseridos, como aqueles relacionados com aquíferos, manejo do solo, química do solo, usos consuntivos, qualidade da água, corpos hídricos e fontes pontuais de poluição. Além disso, certas alterações podem ser necessárias para corrigir dados que foram fornecidos inicialmente, em razão de conhecimentos específicos que se tem sobre a bacia hidrográfica. Finalizadas as modificações a parametrização deve ser atualizada por meio do comando *Rewrite input files*, ficando o modelo pronto para execução.

1.7.1.6 Simulação

Nesta etapa a simulação é realizada considerando um determinado período de tempo, coberto pela existência de dados de precipitação. Em função do intervalo dos registros de precipitação é definido o método para o cálculo do escoamento superficial. As opções de saída para os resultados do balanço hídrico podem ser nos formatos diário, mensal ou anual. O formato horário é admitido somente nos casos em que a série de precipitação usada for subdiária, mas neste caso o modelo fornece somente os dados dos componentes de vazão total e escoamento superficial. As saídas para o conteúdo de umidade do solo também podem ser geradas se houver interesse.

1.7.1.7 Análise de sensibilidade e calibração

A etapa de calibração pode ser árdua, em razão do grande número de parâmetros e processos determinados pelo nível de discretização da bacia hidrográfica. A identificação dos parâmetros mais relevantes e o peso que cada um tem nas respostas hidrológicas tornam a tarefa difícil e demorada. Nestes casos, antes do ajuste pode ser verificada a sensibilidade dos parâmetros. A ferramenta automatizada facilita identificar e classificar com rapidez os parâmetros escolhidos para análise. A análise de sensibilidade pode identificar os parâmetros que melhorem um processo/característica do modelo ou que são afetados pelas características

da bacia hidrográfica. No primeiro caso, a análise é feita apenas com os dados simulados para identificar o impacto de ajustar o valor referente ao conjunto de parâmetros com base em alguma medida de saída, como vazão média, ou um valor mínimo/máximo. No segundo caso, a análise é feita com as vazões observadas para comparar com os dados simulados.

O SWAT2005 executa a análise de sensibilidade sobre um conjunto de parâmetros que estão relacionados com o componente que se pretende ajustar: vazão, sedimento ou qualidade. Em cada simulação o resultado pode ser comparado com a própria saída (vazão média, mínima, máxima) ou com os dados observados. No caso em que os resultados são comparados com os dados observados duas funções objetivo estão disponíveis para encontrar o mínimo que representa a melhor solução: (i) SSQ – Soma dos Quadrados dos Resíduos e (ii) SSQR – Soma dos Quadrados das Diferenças dos Resíduos Ranqueados. Estas funções consideram o somatório dos quadrados das diferenças entre o valor simulado e observado (resíduos). A primeira função é similar ao método do erro médio quadrático e aproxima os pares da série simulada à observada. A segunda função aproxima a distribuição de frequência da série simulada à observada. Na função SSQR ao contrário da função SSQ o tempo de ocorrência de um dado valor da variável não é considerado, uma vez que antes de se aplicar a diferença entre os termos as séries são ordenadas.

No SWAT2005 a análise de sensibilidade é feita pelo método estatístico LH-OAT, que combina os algoritmos LH (*Latin Hypercube*) e OAT (*One-factor-At-a-Time*). O LH realiza amostragens estratificadas sobre o conjunto de parâmetros escolhidos. Cada um dos parâmetros está associado a um valor mínimo e máximo de variação. O LH divide a distribuição do parâmetro em “N” intervalos de valores, todos com a mesma probabilidade de ocorrência “1/N”. O LH requer um número de repetições que deve ser operado sobre o conjunto investigado. Inicialmente, o LH define de maneira aleatória os valores da primeira amostra que contém todos os parâmetros a serem investigados, considerando os intervalos de valores em que foram divididos. Com esta amostra o OAT seleciona um dos parâmetros do conjunto e modifica seu valor com base num percentual de alteração. Em seguida o modelo é executado e gera um resultado. Novamente, um novo parâmetro é selecionado e variado. E assim até que todos os parâmetros tenham sido variados dentro do mesmo ciclo. O processo recomeça com a seleção pelo LH de uma nova amostra. Depois que todas as repetições forem concluídas o processo termina. O efeito final é calculado pela média dos efeitos parciais de cada ciclo para todos os pontos. Este índice permite a análise comparativa e hierarquização (ranqueamento) entre os parâmetros. Uma classificação em diferentes categorias de sensibilidade dos parâmetros foi sugerida por van Griensven (2006) em que a posição “1” é

“muito importante”, as posições de “2” a “6”, “importantes”, e as posições de “7” a “20”, “pouco importantes” (VAN LIEW; VEITH, 2010).

No caso da autocalibração o SWAT2005 usa o método PARASOL (*Parameter Solutions*) para testar o conjunto de parâmetros escolhidos do componente hidrológico a ser simulado (vazão, sedimento ou qualidade) e comparado com a série observada. Inicialmente, uma população de pontos é gerada entre os limites mínimo e máximo de cada parâmetro e separada em complexos que se desenvolvem baseados no processo de reprodução. A otimização é feita buscando o mínimo da função objetivo SSQ ou SSQR. Os resultados fornecem simulações boas (“good”), ruins (“not good”) e a melhor (“best”).

1.7.2 Aplicações do SWAT

Na última década houve um grande aumento de aplicações do SWAT em vários países em estudos hidrológicos e ambientais de bacias agrícolas. Do ponto de vista da escolha do modelo algumas das suas vantagens podem ser destacadas, como: (i) modelo interdisciplinar, (ii) robustez e eficiência computacional, (iii) software de domínio público e código aberto, (iv) suporte e constante aperfeiçoamento, (v) funcionalidades do ambiente SIG, (vi) estudos de cenários de cobertura/uso do solo atuais e futuros, (vii) grande número de alternativas de operações agrícolas (manejo), e (viii) qualidade da água. Todos os fatores citados reforçam o potencial do SWAT, confirmado pela quantidade de artigos publicados anualmente em revistas, jornais e periódicos científicos (GASSMAN et al., 2007; KRYSANOVA; ARNOLD, 2008).

Gassman et al. (2007) agruparam 261 aplicações do SWAT em estudos hidrológicos, estudos de qualidade, ou ambos, separando-as, em: (i) calibração e/ou análise de sensibilidade (14,1%), (ii) impacto de mudanças climáticas (11,4%), (iii) descrições das interfaces SIG (3%), (iv) estimativas hidrológicas (16%), (v) variações na configuração ou efeitos dos dados de entrada (13,6%), (vi) comparações com outros modelos ou técnicas (5%), (vii) interfaces com outros modelos (12,9%), e (viii) transporte de poluentes (24%).

Gassman, Sadeghi e Srinivasan (2014) analisaram 22 artigos apresentados no *2011 Conference & Workshops*, realizado na Espanha. Neste evento foram apresentados 160 trabalhos científicos de 37 países sobre o SWAT. Em praticamente todos os estudos havia algum nível de testes hidrológicos, sendo a maioria com foco em um ou mais indicadores ambientais. Mereceu menção o artigo brasileiro (Bonumá et al., 2014) em aplicação do SWAT2009 sobre a simulação do transporte de sedimentos na bacia do rio Arroio Lino, com 4,8 km², no Sul do Brasil. Em geral, as simulações hidrológicas incluíam uma ou mais das etapas de análise de sensibilidade e/ou análise de incertezas, calibração manual e/ou automática com posterior validação, e medidas estatísticas e/ou gráficos para avaliação dos resultados. Do estudo realizado pelos autores foram destacadas as seguintes informações sobre os indicadores do desempenho:

- a) Os coeficientes de determinação (R^2) e Nash-Sutcliffe (NSE) foram os mais usados para avaliação dos modelos. Muitos estudos relataram a tendência percentual bias (PBIAS). A maioria dos estudos citaram Moriasi et al. (2007) em relação aos critérios usados para análise dos resultados com base nos indicadores estatísticos.
- b) A abordagem diária compreendendo a calibração e validação foi considerada em dez estudos para o R^2 , e em 22, para o NSE. A mesma relação foi verificada para avaliações mensais e um número pequeno para anual. Em geral, os resultados excederam 0,50 para o NSE. Os melhores resultados corresponderam aos intervalos anual e mensal. Contudo, em mais da metade dos estudos diários foram verificados bons resultados, confirmando a tendência no aumento dessas aplicações.
- c) Vários estudos replicaram satisfatoriamente ou com acurácia os dados observados. Em muitos casos os picos de vazão foram subestimados. Em alguns, o modelo superestimou os picos de vazão, apresentou baixa representatividade da sazonalidade das respostas aos eventos e baixa acurácia nas vazões de estiagem. Em outros, houve problemas relacionados com as entradas, como falta de precisão espacial e/ou temporal dos dados de precipitação, resolução do MDE e incertezas sobre os parâmetros de uso e solo. No caso do MDE a resolução pode influenciar a aplicação, especialmente aquelas que avaliam as perdas por erosão e transporte de sedimentos.

Gassman, Sadeghi e Srinivasan (2014) concluíram que o SWAT é uma ferramenta eficaz em diversas aplicações sobre recursos hídricos e manejo do solo. Além disso, salientaram que o modelo tem tido suporte de instituições governamentais nos EUA e do setor privado responsável por um número crescente de aplicações e adaptações espalhadas pelo mundo. Com relação às fraquezas sugeriram a ampliação dos testes e avaliações e/ou aperfeiçoamento do modelo, assim como mais estudos para considerar o método de infiltração Green & Ampt, que requer dados subsidiários de precipitação, e questões relacionadas com calibração e validação para se evitarem esforços que considerem ajustes de número exagerado de parâmetros. E também a realização de pesquisas para se estabelecerem critérios de avaliação estatística na mesma linha desenvolvida por Moriasi et al. (2007).

1.7.3 SWAT no Brasil

Garbossa et al. (2011) com base em 70 aplicações acadêmicas do SWAT no Brasil em 1999-2010 identificaram 60 casos de estudos sobre vazão, sedimento e qualidade. Independentemente das diferenças entre as bacias hidrográficas simuladas quanto ao tamanho, condições topográficas e clima concluíram que o desempenho do modelo foi considerado bom, podendo ser usado nos processos de suporte à decisão por órgãos municipais, comitês de bacias, organizações ambientais e instituições federais. No entanto, relataram que isso não acontece, porque a maior dificuldade deve-se principalmente à falta de dados a respeito das bacias.

Garbossa et al. (2011) destacaram que a maior parte dos estudos verificou a capacidade do modelo em representar adequadamente as respostas hidrológicas dos processos que ocorrem nas bacias hidrográficas. A razão para que as aplicações estivessem voltadas mais para testes deveu-se à carência de séries de vazões e de qualidade da água. Os artigos foram agrupados conforme as principais saídas, em: (i) nutriente, com 16%, (ii) sedimento, com 43%, e (iii) vazão, com 41%. Do total de artigos, 61% corresponderam a São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, e o restante entre Rio de Janeiro, Minas Gerais, Espírito Santo, Bahia, Alagoas e Paraíba. Em sua maior parte foram realizados procedimentos de calibração e validação e usados os indicadores estatísticos R^2 e NSE em simulações principalmente anuais e/ou mensais. Em poucas situações por insuficiência de dados temporais não foram capazes de validarem os resultados.

Na Tabela 4 estão listadas algumas aplicações com os resultados dos indicadores estatísticos em bacias hidrográficas inferiores a 100 km² no Brasil, considerando o escopo desta dissertação em que a microbacia experimental tem área de 13,5 km². Estão relatados somente os desempenhos para vazão mesmo que a aplicação tivesse considerado os componentes sedimento ou nutriente.

Tabela 4 – SWAT no Brasil em bacias menores do que 100 km² (2003-2010)

Referência	Ano	Localização	UF	Área da bacia (km ²)	Aplicação	Indicadores na calibração
Machado et al.	2003	Rio Marins	SP	59,73	Vazão	NSE = 0,92 e R ² = 0,94 (mensal)
Bittencourt e Gobbi	2006	Rio Piraquara	PR	58,00	Vazão	R ² = 0,82 (anual)
Paiva e Paiva	2006	Rio Menino Deus I	RS	18,00	Vazão	R ² = 0,54 (diário) NSE = 0,88 e R ² = 0,88 (mensal)
Lopes e Kobyama	2008	M2 Experimental	SC	8,56	Vazão	NSE = 0,23 e R ² = 0,51 (diário)
Marchioro	2008	Rio Santa Maria	RJ	13,50	Vazão	NSE = 0,72 (mensal)
Lubitz	2009	Rio Concórdia	---	30,74	Vazão	NSE = 0,88 (mensal)
Uzeika	2009	Arvorezinha	RS	1,19	Vazão	NSE = 0,84 (mensal)
Baltokoski et al.	2010	Rios Conrado e Pinheiro	PR	52,97	Vazão	NSE = 0,70 (mensal)
Blainski et al.	2010	Rio Lajeado dos Fragosos	PR	59,00	Vazão	NSE = 0,73 (mensal)
Bonumá et al.	2010	Arroio Lino	RS	3,20	Vazão	NSE = 0,87 e R ² = 0,90 (mensal/validação)
Garbossa et al.	2010	Rio Lajeado dos Fragosos	PR	59,00	Vazão	NSE = 0,73 (mensal)

Fonte: GARBOSSA et al., 2011.

Garbossa et al. (2011) relataram que não foram encontrados no Brasil documentos a respeito de aplicações de cunho prático, embora algumas instituições públicas e privadas usassem o SWAT para tomada de decisão sobre erosão do solo e transporte de sedimentos. Em relatórios de empresas da área de energia hidrelétrica em estudos de transporte de sedimentos e qualidade foram verificadas recomendações para o uso do SWAT.

Com relação às pesquisas realizadas com o SWAT no Brasil nos anos de 2011-2013 constavam no *SWAT Literature Database* 18 artigos. Desse total, dez foram publicados em revistas estrangeiras. Os trabalhos invariavelmente consideraram o componente de vazão nos estudos e aplicações relacionadas com a perda e transporte de sedimentos, calibração, sensibilidade e/ou análise de incerteza, estimativas hidrológicas, mudanças climáticas e impactos no uso do solo.