
Projeção de cenários ou modelos de simulação: uma metodologia de AIA

Maurício Novaes Souza

<https://doi.org/10.4322/mp.978-65-994457-2-9.c3>

1. Introdução

O método de Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) denominado “Projeção de cenários ou modelos de simulação” se baseia na análise de situações ambientais prováveis em termos da evolução de um ambiente (cada situação corresponde a um cenário) e, ou, de situações hipotéticas, referentes a situações diferenciadas geradas por proposição de alternativas de projetos e programas. Tem por objetivo orientar as autoridades governamentais no cumprimento de suas metas de longo prazo, por meio de indicadores de tendências prováveis.

Será apresentado um Estudo de Caso da tese de doutorado da autoria deste autor inicialmente denominada “Planejamento e gerenciamento do uso do solo e dos recursos hídricos nas bacias do ribeirão Entre ribeiros e do rio Preto: gestão ambiental com enfoque na dinâmica de sistemas” (SOUZA, 2008).

O presente Estudo de Caso é uma compilação dos seguintes artigos (SOUZA, 2006; SOUZA *et al.*, 2010; SOUZA *et al.*, 2010b; SOUZA *et al.*, 2012; SOUZA *et al.*, 2012b; SOUZA *et al.*, 2013; SOUZA *et al.*, 2014; SOUZA, 2015). Todo o processo tem por base a modelagem de um dado ecossistema.

2. Etapas da modelagem

O objetivo básico da AIA e da gestão ambiental, considerando a consciência de que os recursos naturais são finitos, é a obtenção dos maiores benefícios por meio da aplicação dos menores esforços. Dessa forma, o indivíduo, a comunidade e as empresas, buscam aperfeiçoar o uso dos

recursos disponíveis, sejam eles de ordem financeira, material ou humana. De fato, a gestão de um sistema tem por objetivo assegurar seu bom funcionamento e seu melhor rendimento, mas também sua perenidade e seu desenvolvimento (SOUZA, 2006).

As AIAs são ferramentas que permitem que os “Sistemas de Gestão Ambiental” (SGA) tenham subsídios para melhorar o desempenho ambiental e a operacionalização de uma organização, levando as organizações a adotarem uma postura preventiva ao invés de corretiva. Por essas questões, a proposta deste Estudo de Caso é apresentar o desenvolvimento de um modelo de oferta e demanda hídrica baseado na Dinâmica de Sistemas, com o auxílio do “software” STELLA 9.0. Seu objetivo é o de se analisar e avaliar os Impactos Ambientais (AIA) e a sustentabilidade dos recursos hídricos das bacias hidrográficas do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto, afluentes do rio Paracatu: principal afluente do rio São Francisco.

Tal programa tem sido empregado para identificar as soluções mais adequadas aos requerimentos de conservação do solo e dos requerimentos hídricos, relativos ao Desenvolvimento Sustentável local, aos aspectos ambientais e as necessidades ecológicas e socioeconômicas e políticas de diversos locais e regiões; ou seja, trata-se de uma ferramenta de AIA que auxiliará nos procedimentos de gestão e monitoramento dos recursos hídricos de uma dada região.

Para o desenvolvimento do modelo é preciso conhecer o histórico da região em estudo. Dados precisam ser levantados e avaliados. No presente estudo se observou que nas últimas décadas o principal agente consumidor de água na bacia do rio Paracatu foi a atividade da irrigação: teve sua participação elevada de 78% para 93% do total da vazão consumida, gerando um complexo quadro de conflitos pelo uso da água na região. Ao mesmo tempo, o crescimento na demanda desse recurso, resultado do crescimento das atividades econômicas, vem acelerando o crescimento populacional, que estimula a implantação de outras atividades como aquelas de reflorestamento com o uso de espécies exóticas e das atividades de pecuária.

No caso da agricultura irrigada, o modelo a ser desenvolvido funcionará como uma ferramenta para prevenir os destinos dos eventuais setores irrigáveis que possam ser implantados ao longo das bacias hidrográficas da

região. Dessa forma, o modelo se converterá em um valioso instrumento computacional de auxílio aos formuladores de políticas públicas para o planejamento, gestão e monitoramento dos recursos hídricos do local de estudo, eliminando os riscos da ocorrência de impactos ambientais.

Entretanto, sua construção implica em uma ampla investigação, além de um trabalho eminentemente criativo, que será estruturado por meio das seguintes etapas (ORELLANA GONZÁLEZ, 2006): a) conceitualização; b) formalização; e c) simulação - esta etapa inclui a avaliação e exploração. As duas primeiras etapas serão agora elaboradas e descritas; e a derradeira, apresentada e discutida no capítulo referente aos Resultados e Discussões.

3. Etapa de conceitualização

Existe um consenso de que projetar cenários futuros só é possível com o entendimento do espaço natural e suas condições passadas e atuais: essa questão é complexa, dada às inter-relações existentes nos diversos ecossistemas, naturais e urbanos. Entretanto, ao entender o que acontece nesse espaço é possível projetar cenários futuros e quantificar suas consequências - afinal, é no futuro que existirá a obra construída, assim como o impacto que causará no campo, na cidade e em seus habitantes.

Desta forma, esta etapa consiste na familiarização dos problemas relacionados à área em estudo, tendo como objetivo os definir. Busca-se identificar os elementos que configuram o sistema de recursos hídricos das bacias hidrográficas do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto, concluindo com o estabelecimento do diagrama causal.

3.1. Enfoque sistêmico dos recursos hídricos

Na elaboração do modelo da água para as bacias hidrográficas do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto, para o seu pleno sucesso, far-se-á necessário conhecer o processo de aprendizagem e as etapas no processo de construção de modelos em Dinâmica de Sistemas. Por intermédio de uma análise sistemática dos recursos hídricos dessa região, serão determinadas as principais variáveis e suas respectivas inter-relações, conformando-se assim, a estrutura do modelo de oferta e demanda hídrica.

Esta estrutura será representada no diagrama causal, que servirá como base para a elaboração do diagrama de estoques e fluxos, por meio do qual se estabelecerá o modelo matemático que permitirá efetivar a simulação numérica. Serão aplicados testes de validação do modelo. Com os resultados obtidos, permitir-se-á constatar que o modelo está estruturado e se comporta de forma coerente aos dados existentes na realidade, o que o torna adequado para a situação.

A importância em identificar os principais problemas e as características dessas atividades e as possíveis medidas mitigadoras, amparadas atualmente pela legislação ambiental e pela obrigatoriedade da AIA, é permitir que fossem reduzidos os impactos ambientais negativos. Por meio da utilização de ferramentas na fase de planejamento, implantação e monitoramento, tais como o licenciamento ambiental e os sistemas de gestão ambiental, têm favorecido tais procedimentos. Cabe ainda considerar que a utilização de medidas preventivas visa à utilização dos recursos naturais de forma racional, com vistas aos princípios e anseios do Desenvolvimento Sustentável.

As informações adquiridas sobre esse sistema, considerando que atividades antrópicas provocam a sua retroalimentação interna e interferem nas suas relações com o meio no qual está inserida; o modelo poderá propor as mudanças que se façam necessárias, ou sugerir novo direcionamento para que lacunas diagnosticadas dentro do atual modelo sejam alteradas, atingindo, assim, os resultados esperados. Devem ser considerados os contextos político e socioeconômico, bem como as principais inter-relações no qual o setor em estudo está inserido para que se possam elaborar os círculos de causalidade.

Assim, esse modelo permitirá aumentar a compreensão acerca das atividades antrópicas e seus empreendimentos existentes na região de estudo, bem como as interferências promovidas em seus diversos ecossistemas. Dessa forma, os usuários poderão entender como que os diversos cenários atuais e futuros afetarão o desempenho dos ecossistemas, aquáticos e terrestres. São fundamentais, a partir de uma visão holística e integrada, que sejam identificadas as atividades agropecuárias, florestais e urbanas que geram focos de poluição e degradação. O seu entendimento será a base para a construção do modelo e da estrutura matemática, que permitirá representar e entender a dinâmica de funcionamento desses sistemas.

Foi escolhido como horizonte de planejamento um período de sessenta e cinco (65) anos. Esse período se enquadra acima do tempo mínimo, segundo Orellana González (2006), de 25-30 anos, que é normalmente empregado para a implantação da maioria dos planos de desenvolvimento socioeconômico: representa uma melhor visão para o planejamento e tomadas de decisão no longo prazo.

3.2. Definição do problema

Os modelos de desenvolvimento agropecuário e urbano-industrial, executados nas últimas décadas na bacia do rio Paracatu, produziram uma série de impactos ambientais, com a geração de inúmeras áreas degradadas. A provável origem desses problemas se deve ao imediatismo nas fases de elaboração e implantação dos diversos empreendimentos e atividades, com displicência, ou mesmo ausência, de planejamento ambiental, não considerando, por exemplo, as questões relativas à predição.

Tal comportamento têm posto em risco a quantidade e a qualidade do capital natural, particularmente dos recursos edáficos e, conseqüentemente, dadas as suas inter-relações, dos ecossistemas aquáticos. Nesse contexto inserem-se as bacias hidrográficas do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto, afluentes do rio Paracatu, objetos deste estudo.

Nesse local, tem ocorrido a intensificação de atividades silviculturais, que substituem a vegetação nativa, como também a intensificação da agricultura irrigada, cuja participação no consumo de água se elevou de 78% para 93% do total da vazão consumida no período de 1970 a 2000. O Desenvolvimento Sustentável sugere que se considerem os aspectos ambientais, econômicos e sociais na implantação de um determinado projeto.

O sistema hídrico que compõe as bacias hidrográficas do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto está conformado por um conjunto de elementos e componentes que cumprem diferentes funções. O resultado final, quando se deseja uma condição de homeostasia, é a obtenção de que se atinjam as adequações e distribuições da água para possibilitar a vida e a produção da vegetação nativa e das culturas, dos animais e da população. O sistema está constituído pelo solo e pelos diversos elementos que o compõe, unidos entre si

e formando uma rede de inter-relações, organizados de forma interconectada aos propósitos e, ou, objetivos que devam satisfazer.

Tendo esses princípios como ponto de partida, se analisou a sustentabilidade destes sistemas hidrológicos. Com o modelo das referidas bacias, buscou-se determinar se as gerações presentes e futuras contarão com os recursos hídricos que necessitarão para garantir o Desenvolvimento Sustentável da referida região e mesmo de toda a bacia do rio São Francisco.

Esta análise se dará por intermédio de uma visão de longo prazo (65 anos) dos recursos citados. Serão examinados oito (8) cenários que compreenderão futuros aumentos de demanda de água, e restrições da oferta deste recurso, a fim de avaliar a sustentabilidade da oferta de água disponível, nessa região. As tendências atuais do sistema de recursos hídricos dessa região considerarão no seu primeiro cenário o agronegócio atual. A partir deste, será criado um índice para determinar a sustentabilidade. Esse índice refletirá se o sistema está abaixo ou acima, durante o período de estudo em uma situação de superexploração ou estresse, o que permitirá responder aos seguintes questionamentos:

- ✓ Estar-se-á utilizando um volume acima da capacidade de suporte e autodepuração desses recursos?
- ✓ Tem ainda % excedente que poderá ser utilizado sem prejudicar a sustentabilidade do sistema?
- ✓ A qualidade da água se encontra afetada?
- ✓ A sustentabilidade do sistema se encontra comprometida?
- ✓ Quais são as atividades principais que têm contribuído para essa situação?
- ✓ Qual deverá ser o posicionamento dos órgãos de fiscalização?

O modelo será desenhado para representar a estrutura da demanda de água da produção agrícola e da demanda ambiental requerido para manter a vida dos ecossistemas da região. Compreende também a oferta de recursos hídricos disponíveis regionalmente, a qual foi estimada com base na vazão média (Q_{med}) dos rios.

De acordo com Orellana González (2006), utilizando o enfoque de Dinâmica de Sistemas se rompe com a análise isolada do destino efetivo da água. Dessa forma, descortina-se um novo paradigma, enfocando-se algo mais

importante: o uso final e o controle do recurso, centrando-se, em particular, no quanto se usa. Com este objetivo exposto de forma bem nítida, espera-se superar as políticas atualmente desenhadas para resolver problemas, que contrariamente ao seu propósito inicial, podem muitas vezes reforçar os problemas que se tentavam solucionar.

3.3. Relação entre os elementos do sistema: diagrama causal do modelo

A Figura 1 descreve de forma esquemática o sistema de recursos hídricos e seus elementos principais que o compõe. Conforma-se pelos agregados principais: o primeiro representa a oferta de água disponível; e o segundo que engloba a demanda do referido recurso. Destes grandes agregados se derivam o balanço hídrico do modelo.

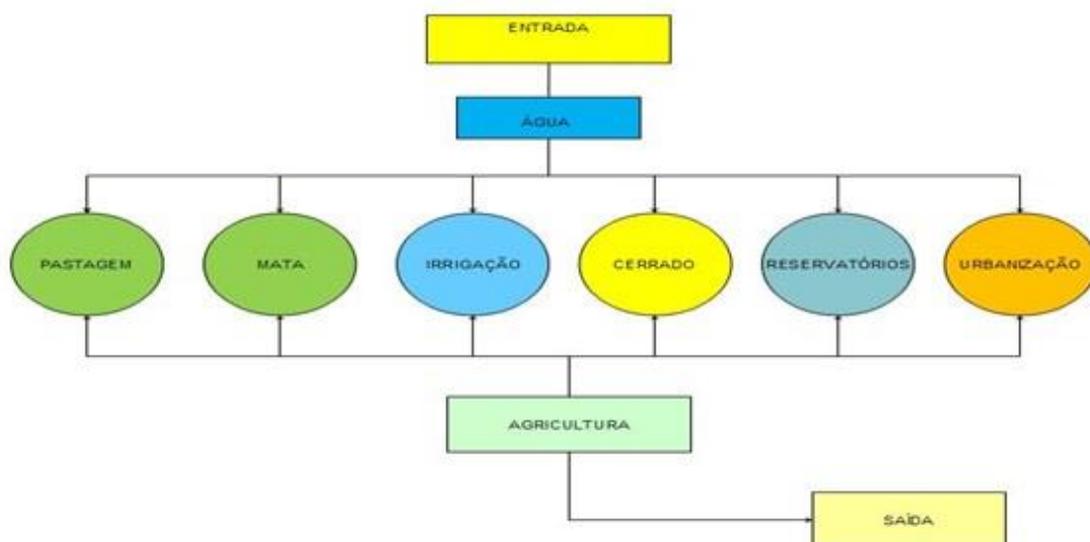


Figura 1. Fluxograma representativo da estrutura do modelo de recursos hídricos. Fonte: Souza *et al.* (2014).

Para o desenho do diagrama causal, que representa as relações principais e relevantes para o estudo da estrutura de oferta e demanda hídrica das bacias do presente estudo, tomou-se como base o fluxograma utilizado por Orellana González (2006) em seu trabalho, que de acordo com Xu *et al.* (2002), contém os componentes principais da estrutura de um modelo de recursos hídricos que analisa o balanço entre oferta e demanda de água.

O esquema anterior permitiu estabelecer os principais componentes do modelo das bacias hidrográficas do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto, e identificar as relações de causalidade mais importantes que existem entre eles. Como resultado destas análises, elaborou-se o diagrama causal específico para as bacias em estudo. Este diagrama (Figura 2) permite visualizar o tipo de relações que existem entre os elementos que compõem o modelo.

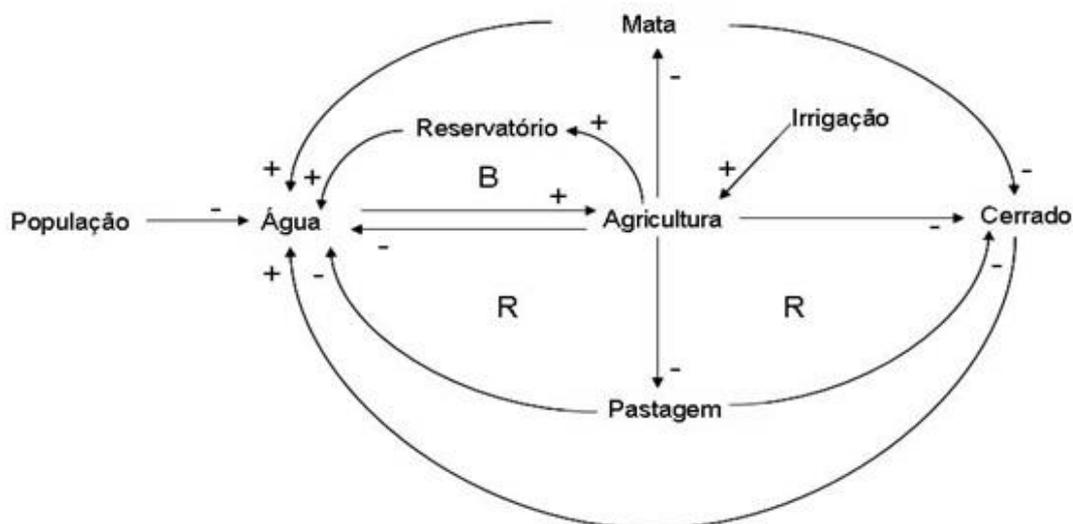


Figura 2. Diagrama causal do modelo das bacias hidrográficas do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto. Fonte: Souza *et al.* (2012).

Na Figura 2 estão identificados os componentes básicos do sistema, bem como a interação que se dá entre eles, sendo esta última a que proporciona as características estruturais do sistema que nos ocupa.

Apresenta-se “Água”, como a oferta de água limpa disponível e, por outro lado, as demandas estudadas; “População”, que indica a demanda de água para consumo doméstico, tanto na área rural como na urbana; “Cerrado”, que é o Bioma regional, representa produção e estoque de água; “Mata”, conforme descrito anteriormente, tanto de espécies nativas, representadas por florestas de galerias ou ripárias, entre outros, também representam produção e estoque de água; “Agricultura” ou “Cultivo”, que engloba os requerimentos hídricos dos cultivos, como também os plantios florestais; “Pastagem”, evidenciando a demanda de água requerida por este setor.

A variável “Reservatórios” significa estoque de água, em face da retenção do excesso de água que se perderia pelo elevado escoamento superficial das referidas bacias em estudo, estimulando a rápida drenagem (Balanceamento); e, por último, tem-se a variável “Irrigação”; que no presente estudo tem sido considerado o fator de injeção de recursos financeiros nas atividades agrícolas. Esta última variável está dinamizando e incrementando as atividades do setor produtivo e de serviços dessas bacias, além de ser a maior responsável pela demanda hídrica.

Com respeito aos laços de realimentação existentes entre os componentes do sistema, podem-se destacar os seguintes pontos: a injeção de recursos financeiros provenientes da irrigação gera um impacto positivo sobre as atividades do setor agrícola, e se manifestam os efeitos de uma variável sobre outra que caminham na mesma direção, sendo representadas com um sinal (+) ao final da seta (Figura 2). Por exemplo, se a atividade de irrigação aumenta, ela repercute em um aumento das atividades agrícolas, e vice-versa.

Ao contrário, um aumento do consumo de água do setor agrícola, pecuário e da população, gera um impacto negativo sobre a oferta de água disponível; assegura que o crescimento destas variáveis ocasiona diminuição da oferta de água limpa, aumento da contaminação (não considerado nesse estudo), e vice-versa. Pode-se então afirmar que os efeitos caminham em direções contrárias, representadas com um sinal (-).

Pode-se também observar que, apesar de não representado no diagrama causal, o aumento das atividades agrícolas, pecuárias e o consumo da população ocasionam um aumento no nível de contaminação da água, posto que exista um efeito positivo derivado da relação entre essas variáveis – se uma cresce a outra também, e vice-versa. Também, a variação na atividade agrícola (que foi considerado como o principal dinamizador da economia dessas bacias) gera efeitos no mesmo sentido da variação; na pecuária e na população.

Produto dos efeitos das relações entre as variáveis, o modelo está caracterizado, em síntese, por um laço de realimentação positivo (R). Isto significa que a variação de um elemento se propaga em toda a sua extensão reforçando a variação inicial, gerando um crescimento exponencial do sistema a partir de onde toda a variação é amplificada provocando mais movimento na

mesma direção. No caso da sustentabilidade dos recursos hídricos nessas bacias em estudo, torna-se um ciclo vicioso, que provoca uma piora do sistema, posto que ficou evidenciado que as atividades produtivas exercem forte pressão sobre a oferta do recurso água, e a piora da qualidade da mesma.

✓ Etapa de formalização

Nesta etapa se efetuou a formalização do diagrama anterior empregando para isto uma linguagem matemática. O ponto de partida foi a elaboração do diagrama de estoque e fluxo, por base ao qual se escreveu as equações do modelo.

3.4. Diagrama de estoque e fluxo

O diagrama causal do modelo (Figura 2) permitiu desenhar o diagrama de estoque e fluxo das bacias hidrográficas em estudo, que de forma mais detalhada descreve o funcionamento do sistema representado (Figura 3), tendo por base os dados da estação fluviométrica da Fazenda Barra da Água (EFFBE).

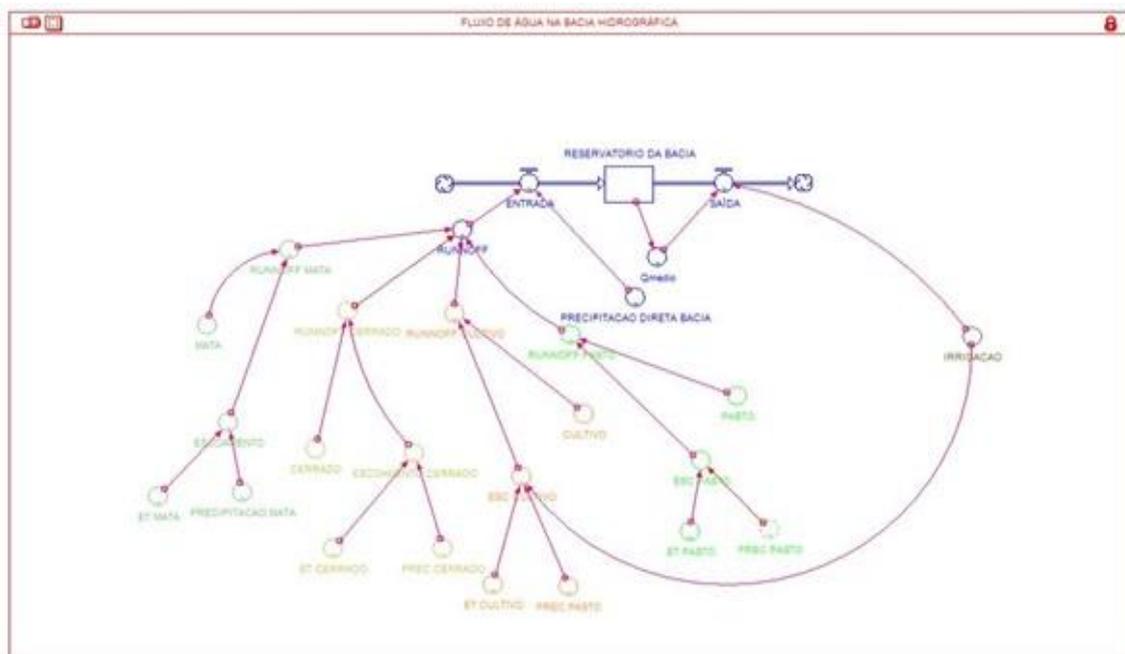


Figura 3. Diagrama de estoque e fluxo das bacias hidrográficas do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto. Fonte: Souza *et al.* (2012).

A conversão se deu da seguinte forma: uma vez representados no diagrama causal, os componentes principais do modelo de oferta e demanda de recursos hídricos das bacias (água, pastagem, mata, irrigação, cerrado, reservatórios, urbanização/população e agricultura/cultivo), assim como as relações principais existentes entre eles, que de forma abstrata é a base do enfoque do pensamento sistêmico, construiu-se e procedeu-se a sua formalização em linguagem de Dinâmica de Sistemas, auxiliados pelas ferramentas empregadas na construção de modelos que se elaboram a base deste enfoque. As estruturas básicas para o desenho do diagrama são os estoques e os fluxos (Figura 2).

Os estoques representam no modelo as acumulações de recursos e também as restrições destes. Representam as condições, informando como está a situação; e suas variáveis que acumulam trocas influenciadas pelos fluxos. Neste caso, os estoques constituem por um lado, a água limpa que se denominará “água” e representa a oferta hídrica do modelo; e por outro, nesse trabalho, será considerado principalmente, as áreas de “Cultivo” e “Irrigação”, determinam a demanda de água requerida pelos diferentes setores econômicos e sociais das bacias.

Os fluxos se representam com válvulas – identificam as ações que acumulam e, ou, esvaziam os estoques, e dizem como os fatos estão se desenrolando – são variáveis dependentes do tempo. Como se pode observar na Figura 3, neste modelo se tem os fluxos nomeados com taxas que são controladas pela (s) taxa (s) da (s) variável (eis) em conexão, que usualmente é uma variável auxiliar ou uma constante, e que estão alimentando a oferta hídrica. Esta oferta está constituída pelas águas superficiais (ribeirão Entre Ribeiros e rio Preto) e seus respectivos escoamentos.

Por outra parte têm-se os fluxos que representam a demanda hídrica do modelo. Estes estão compostos pelos requerimentos de água dos setores agrícola, pecuário, população urbana e rural, e pela demanda ambiental, constituída esta última, pela vazão mínima que o rio deve ter, para manter a vida dos ecossistemas correspondentes - equivale a uma oferta mínima de água limpa. Neste estudo, será considerado vinte por cento (20%) da vazão média. Estas demandas têm um fluxo de saída que alimenta o estoque de água residual.

Os outros elementos do modelo evidenciados no diagrama causal, e que determinam os fluxos, convertem-se em variáveis auxiliares ou constantes, tal como o consumo de água do setor agrícola, pecuário, populacional, entre outros.

As relações entre as variáveis, que no diagrama causal se estabelecem por intermédio de flechas, neste diagrama se indicam da mesma forma, sendo chamados de conectores. Estes vinculam os estoques e as variáveis auxiliares ou as constantes; os estoques aos reguladores de fluxos; e as auxiliares ou as constantes a outras auxiliares ou constantes.

3.5. Descrição matemática do modelo

Os modelos de dinâmica de sistemas são construídos por meio de um conjunto de equações diferenciais, que são matematicamente resultantes ao longo de um período por um algoritmo que gera comportamentos dependentes do tempo para as variáveis contidas no modelo. Nesse estudo, para se determinar a consistência dimensional do modelo, cuja equivalência se pode constatar durante todo o período da simulação e em cada um dos anos dos cenários avaliados, a seguinte equivalência foi verificada (Figura 4).



Figura 4. Oferta de água igual à soma da demanda de água com a saída.
Fonte: Souza *et al.* (2013).

A seguir, serão apresentadas as equações necessárias à composição do modelo (ORELLANA GONZÁLEZ, 2006). Todas as fórmulas estão embutidas no programa e não estão aqui relacionadas. Observa-se abaixo, algumas equações que foram utilizadas:

3.6. Estimativa da demanda de água (em milhões de metros cúbicos)

$$D = DPOPULACIONAL + DAGP + DAMB \quad \text{(Equação 1)}$$

Em que:

D = quantidade total de água demandada;

DPOPULACIONAL = engloba por uma parte, a demanda urbana de água para consumo doméstico, e por outro, a demanda rural de água usada para os mesmos fins;

DAGP = demanda agrícola e pecuária de água;

DAMB = demanda ambiental de água.

3.7. Demanda ambiental de água

A demanda de água para a proteção do meio ambiente e dos ecossistemas será assumida como um valor constante. Para este estudo, se considerará igual a um volume mínimo registrado na estação pluviométrica sobre as bacias hidrográficas do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros, denominada com o código 152 da rede existente no Estado de Minas Gerais que engloba uma série de cinquenta 50 anos (TEIXEIRA SOUZA, 1993). Na verdade, tomar-se-á como base a vazão mínima registrada nesse período.

3.8. Estimativa da oferta de água disponível

$$S = SSUP + SRET \quad \text{(Equação 2)}$$

Em que:

S = oferta total de água disponível;

SSUP = oferta disponível de água superficial;

SRET = oferta disponível de águas de retorno.

3.9. Índice de sustentabilidade

É fundamental a criação desse índice, posto ser um dos critérios para avaliar se o funcionamento de um sistema de recursos hídricos se encontra com confiabilidade, vulnerabilidade e capacidade de recuperação (XU *et al.*, 2002). Nesse estudo, será implementado um índice de sustentabilidade (IS) definido como a relação entre um possível déficit de água com respeito à oferta correspondente na mesma região, com os seguintes critérios:

$$IS = \left\{ \begin{array}{l} (S - D) / S \quad \text{se } S > D \\ 0 \quad \text{se } S \leq D \end{array} \right. \quad (\text{Equação 3})$$

Em que:

D = demanda de água;

S = oferta disponível de água.

Caso o valor de IS seja maior que 0,2, indica-se um baixo ou nenhum estresse na oferta de água, o que implica que a demanda de água é menor ou igual a 80% da oferta potencial de água. Valores menores a 0,2 refletirão condições de vulnerabilidade, o que supõe que a demanda de água é maior que 80% da oferta potencial de água. Valores iguais a zero indicam que a oferta de água é insustentável, o que sugere que a demanda de água é igual ou excede a toda a disponibilidade de recursos hídricos locais.

O Diagrama de estoque e fluxo das bacias hidrográficas do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto representa um modelo de simulação explícita do sistema de Recursos Hídricos das referidas bacias. As equações “time”, expressas como equação diferencial implícitas no Modelo da água do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto, encontram-se no ANEXO A de Souza (2008).

▪ Estruturas matemáticas implícitas nos modelos

Segundo Duvoisin (2000), quando se observam a desintegração (variação) de uma substância radioativa, constata-se que o número de desintegrações por unidade de tempo é proporcional à quantidade de substância presente em cada instante. Assim X representa a quantidade de substância presente em cada instante t; a equação diferencial que representa o fenômeno é dada por $dx/dt = -kx$ (1).

A equação dx/dt representa a variação instantânea (desintegração) sofrida pela substância e k representa o coeficiente de proporcionalidade, que é constante dependendo de cada tipo de substância radioativa; portanto na utilização de sistemas quantitativos de modelagem, surgem equações diferenciais, porém para transformar essas equações em linhas de programa, para ser modelada no computador o mais adequado é transformar as equações diferenciais em equações de diferenças.

Ao se analisarem as variações em um modelo simplificado, pode-se observar que a diferença entre as duas medidas sucessivas da substância é proporcional à quantidade de substância existente na primeira medida, isto é:

$$X(t+\Delta t) - X(t) = KX(t) \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde:

$X(t)$ é a quantidade de substância medida no tempo t ; e

$X(t+\Delta t)$ é a quantidade medida um tempo depois, ou seja, o tempo varia discretamente.

Pode-se observar que as leis de formação dos dois modelos são idênticas, embora em (1) seja uma equação diferencial e em (2) uma equação de diferenças. A analogia ocorre porque a derivada de uma função é definida como o limite de um quociente de diferenças

$$dX/dt = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta X/\Delta t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} [X(t+\Delta t) - X(t)]/\Delta t \quad \text{Equação (5)}$$

e quando $\Delta t \rightarrow 0$, o caso discreto (equações de diferenças) aproxima-se de um limite que é o caso contínuo (equações diferenciais). Portanto, um mesmo problema pode ser analisado do ponto de vista das equações diferenciais, ou do ponto de vista computacional, usando-se as equações de diferenças. Para trabalhar com modelagem computacional, descrevemos a equação de diferenças em forma de conjunto:

$$\begin{aligned} t &= t + dt \\ dX &= K * X * dt \\ X &= X + dX \end{aligned} \quad \text{Equação (6)}$$

Que se repete de modo iterativo, a partir de certo t e certo x iniciais. Esta estrutura é chamada de exponencial e tem a seguinte representação semiquantitativa (Figura 5).

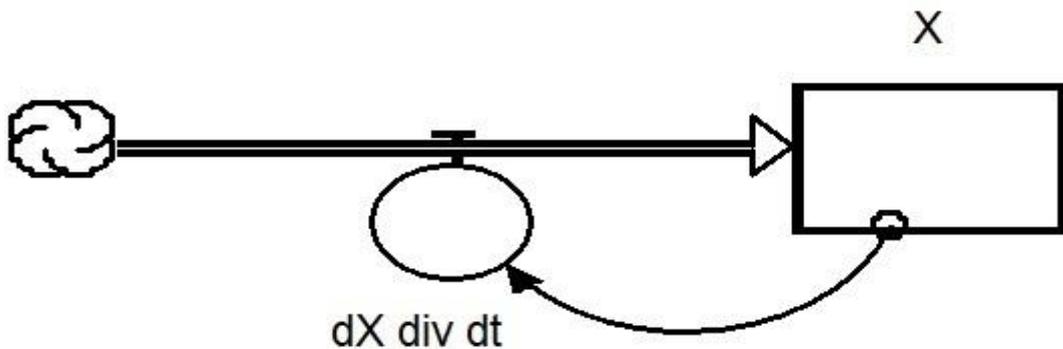


Figura 5. Representação semiquantitativa da equação de diferenças de crescimento exponencial. Fonte: Duvoisin (2000).

A representação gráfica é a seguinte (Figura 6):

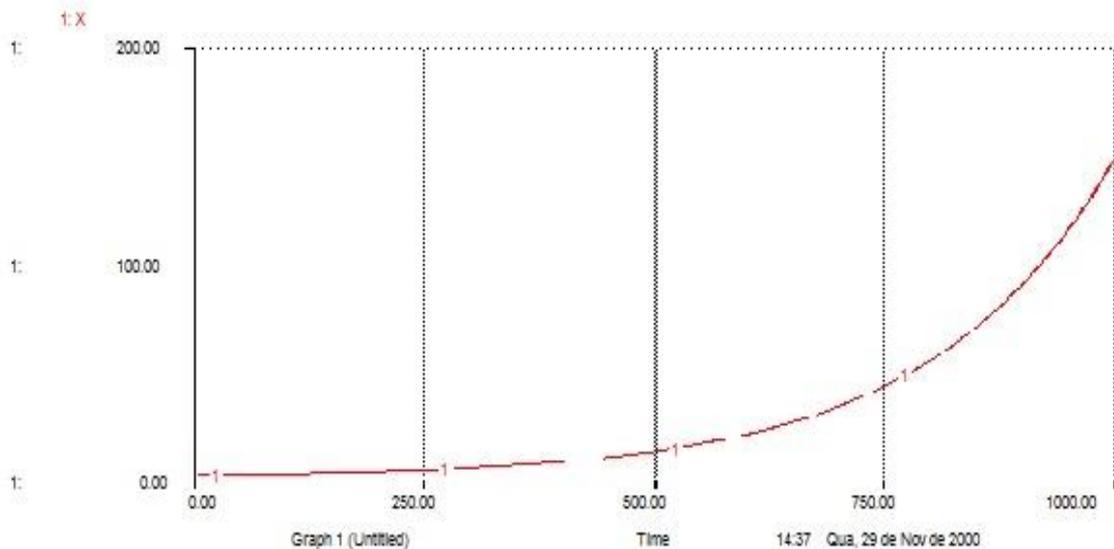


Figura 6. Crescimento exponencial. Fonte: Duvoisin (2000).

A equação diferencial pode ser solucionada analiticamente assim:

$$\int_{x(0)}^{x(t)} [dX/x] = \int_0^t K^* dt \Rightarrow \ln X \Big|_{x(0)}^t = k^* t \Big|_0 \Rightarrow \ln X(t) - \ln X(0) = kt \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \ln X(t)/X(0) = K^* t \Rightarrow X(t)/X(0) = e^{k^* t} \Rightarrow X(t) = X(0) * e^{k^* t},$$

Cuja representação gráfica é idêntica ao modelo computacional utilizando equações de diferenças.

Outros modelos podem ser estudados, por exemplo: processos lineares ou exponenciais construídas; ou processos que geram equações de segunda ordem; ou ainda processos logísticos de caos; cada um deles podendo ser trabalhado com equações diferenciais ou de diferenças. O Programa STELLA utiliza equações “time”, que se orientam por essa lógica.

4. Resultados e discussão

4.1. Validação do modelo matemático

Os modelos de simulação dinâmica se prestam para a realização de descrições abstratas da realidade, tornando possível a representação de problemas complexos, caracterizados como dinâmicos e não-lineares. Nesses modelos existem relações de retroalimentação ou retardos (“delays”); ou seja, muitas vezes o impacto de uma política não aparece no momento em que é implementada; pode aparecer posteriormente, de forma temporal e, ou, espacialmente distribuído. O objetivo das simulações dos modelos é tornar evidentes as pressuposições conduzidas sobre o mesmo (ORELLANA GONZÁLEZ, 2006).

Sobre esses aspectos, cabe considerar dois importantes conceitos - Cumulatividade e Sinergia. Tais conceitos partem do princípio de que as mudanças ao meio ambiente que são causadas por ações antrópicas em combinação com outras ações do passado, presente ou futuras, podem de alguma forma, potencializar os efeitos ambientais em uma dada região, a partir de processos interativos e sobreposições sucessivas de processos antrópicos (EPE, 2008).

Os efeitos cumulativos são entendidos como aqueles resultantes da simples soma de outros que vão se sobrepondo em diferentes escalas temporais e espaciais por interação, combinação e composição, de tal maneira que os efeitos gerados frequentemente superam a simples soma dos impactos prévios isolados. Já os sinérgicos ocorrem de tal forma que os efeitos gerados a partir dessas interações, combinações e composições frequentemente diferem da simples soma dos impactos prévios isolados (*ibidem*).

A sinergia ocorre, portanto, quando um impacto associado a um determinado recurso natural, tal como os recursos hídricos, potencializa efeitos sobre outros recursos e, ou, aspectos sociais, tais como a biota aquática, a irrigação, a pesca ou a qualidade de vida da população. Por este motivo, neste trabalho, as ações de identificação destes efeitos foram desenvolvidas de forma integrada à atividade anterior, por meio dos dados do trabalho de Latuf (2007); a partir dos cenários propostos nesse estudo, buscando identificar em quais destes cenários as mudanças climáticas e as alterações de uso das classes de solo, que produzirão novas demandas por “Água”, possam provocar impactos de caráter cumulativo e sinérgico.

Assim, para atingir da melhor forma possível esse objetivo, é importante que o comportamento real do sistema esteja reproduzido pelo modelo. Não obstante, como comentado por Grcic; Munitic (2006), ao elaborar um modelo, algumas características de sua dinâmica não são quantificáveis, razão porque os dados qualitativos e empíricos são usados, perdendo então a eficácia de testes de validação quantitativa. Como resultado dessa questão previamente exposta, levanta-se a necessidade de realizar uma validação qualitativa do modelo, procurando estabelecer de maneira prioritária, se este é útil para o objetivo proposto tal como sustentando por Ford (1999).

Para Sterman (2000), os modelos não representam a realidade, razão porque sua veracidade não pode ser constatada: são suscetíveis de falsificação ou refutados de acordo com alguns testes ou teorias. É importante, então, e deve-se tornar prioridade, identificar o modelo que da melhor maneira alcance o objetivo do problema a ser estudado e determinado. Nesse contexto, torna-se prioritário identificar de forma clara e precisa o problema a ser estudado e contextualizá-lo a fim de especificar seus objetivos reais.

De acordo com Forrester (1990), na Dinâmica dos Sistemas a validação dos modelos de simulação se julga de acordo com suas conveniências e utilidade. É preciso confiar em seu comportamento sob circunstâncias limitadas e de acordo com um objetivo específico. Para Ruth; Hannon (1994), o modelo de simulação dinâmica deve somente capturar os fatores essenciais de um sistema real, sendo necessário abstrair os demais fatores. Sua validação deve ser considerada de acordo com a consistência lógica de sua estrutura interna.

Alguns testes e procedimentos são usados a fim de dar ao modelo de simulação dinâmica, maior confiabilidade, além de evidenciar suas limitações. Há de se considerar em qualquer um desses testes: a) a padronização da documentação dos componentes do modelo; e b) a replicação do modelo e da disponibilidade de suas equações para revisões. Entre os que se destacam, podem-se citar (FORRESTER, 1990; FORD, 1999; STERMAN, 2000):

- ✓ Testes de Erros Mecânicos: usado na busca de erros mecânicos da simulação a fim garantir a estabilidade inicial;
- ✓ Teste de Robustez: refere-se às condições extremas e se aplica com o objetivo de se avaliar a consistência do modelo;
- ✓ Teste de Consistência Dimensional: análise dimensional das equações do modelo;
- ✓ Teste de Políticas: É usado para indicar e descobrir formas de mudar o desenvolvimento do sistema;
- ✓ Testes de Sensibilidade: analisa a solidez das políticas por intermédio da variação dos valores dos parâmetros do modelo;
- ✓ Teste do Limite: indica se os limites do modelo e os conceitos que o descrevem, representa de forma apropriada o sistema real sob o estudo.

Neste estudo, buscaram-se representar as inter-relações existentes da mudança das classes de uso do solo e suas influências sobre os fatores climáticos e os ecossistemas aquáticos, nas bacias hidrográficas do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto. Por meio de uma análise do comportamento hidrológico, examinou-se se os recursos estão sendo usados de forma sustentável.

Este sistema é constituído por um conjunto de elementos organizados em torno do objetivo do ajuste e da distribuição da água para tornar possível a vida humana e dos demais componentes ambientais, bem como a produção agropecuária, visando à melhoria da condição socioeconômica regional. Construiu-se o sistema, os elementos-chaves que o compõe foram previamente identificados, e se utilizaram os procedimentos anteriormente mencionados.

Considerou-se que a dinâmica do sistema é determinada pela demanda dos recursos hídricos, para satisfazer às necessidades da população e do setor agropecuário. Esta demanda compreende as necessidades de água nas citadas bacias e repercute de forma direta a sustentabilidade do sistema. Não se incluiu

a demanda do setor industrial, que é muito reduzida. A demanda ambiental será avaliada posteriormente considerando a vazão mínima; ou 20% da vazão média.

Para alimentar o modelo, entretanto, será utilizada a vazão média, por se entender que a bacia já está altamente antropizada e a vazão mínima, que normalmente é utilizada para a concessão de outorga, não representaria de forma adequada as propostas de sustentabilidade sugeridas por este estudo. Esse fato se justifica quando se analisa pelo lado da oferta, como no estudo realizado por Latuf (2007) durante o período de 1985-2000, onde se verificou que a “Precipitação Direta” na bacia e as vazões máxima, média e mínimas vêm sofrendo significativas reduções.

Durante todo o processo de simulação se conhece a quantidade exata de água requerida por cada setor frente à oferta de água disponível, embora só a “Irrigação” tenha merecido destaque e análise particularizada. Tomando como base os dados de 1995, o comportamento das demandas setoriais foi simulado até 2060, cujos resultados estão representados na Figura 7. Tais dados ilustram a quantificação da demanda da bacia, de acordo com os parâmetros especificados para cada uma das atividades nelas desenvolvidas.

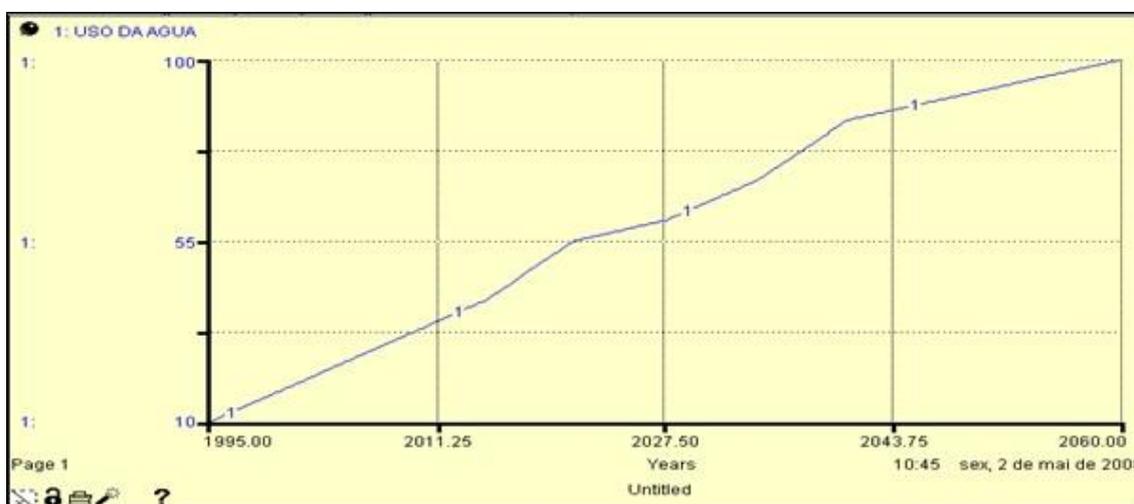


Figura 7. Simulação do uso da água (em porcentual) no período 1995-2060 para a bacia do ribeirão Entre Ribeiros. Fonte: Souza *et al.* (2013).

Analisando a tendência da curva da Figura 7, observa-se que as demandas hídricas estão aumentando na medida em que a população cresce e

que se aumentam as áreas cultivadas. Para se evidenciar o crescimento populacional, o município de Paracatu apresentava uma população de 6.304 habitantes em 1970, passando para 75.216 habitantes (63.014 de população urbana) em 2000 (IBGE, censos de 1970 e 2000).

Dessa forma, caso nenhuma medida regulatória, estruturadora ou indutora de comportamento seja adotada e implementada, observa-se na Figura 7 que no ano de 2011, aproximadamente 35% da água disponível já estará sendo consumida; em 2027, aproximadamente 60%; ou seja, a tendência apontada pela simulação do modelo indica o consumo excessivo do recurso água.

Este resultado é coerente com a lógica de que na medida em que cresce a população e as áreas cultivadas irrigadas se intensifica, maior volume de água é requerido para satisfazer às suas respectivas demandas. Por outro lado, o crescimento populacional que tem estimulado o aumento das áreas de “Cultivo”, vem provocando a redução das áreas de “Cerrado”, como pode ser observado no Quadro 1, tendo como referência os dados de uso do solo da Estação Fluviométrica Fazenda Barra da Água (EFFBE), no período de 1985-2000.

Quadro 1. Uso do solo na área de drenagem da EFFBE no período 1985-2000.

Uso do solo	Área (Km ²)			Variação (%)	Cobertura das classes (%)	
	1985	2000	Diferença	85 a 00	1985	2000
“Cerrado”	635,23	332,55	- 302,68	- 47,65	39,93	20,90
Cultivo	154,68	461,09	+306,41	+198,09	9,72	28,98

Fonte: Latuf (2007).

Observa-se, no Quadro 1 que as áreas de “Cerrado” sofreram uma redução de 302,68Km² (-47,65%), enquanto que as áreas de “Cultivo” sofreram um incremento de 306,41 Km² (+198,09%) no período 1985-2000. Assim, pode-se esperar que ocorresse ainda maior redução das vazões mínimas; ou seja, compromete a oferta de água necessária para se atender à demanda

ambiental, e o índice de sustentabilidade, provavelmente, apontará a tendência da exaustão do recurso água.

Isso pode ser justificado pelo estudo realizado por Latuf (2007), quando se considerou as diversas classes de uso do solo, tais como “Urbanização” e “Cultivo” - foi verificado que com os seus incrementos se espera uma tendência de aumento das vazões máximas, devido à alta taxa de impermeabilização do solo. Ao mesmo tempo, observou-se que houve redução das vazões mínimas, devido à menor infiltração de água no solo e conseqüente deficiência na realimentação dos aquíferos. Observou-se, ainda, tendência de redução para as vazões médias - devido ao acelerado escoamento superficial nestas áreas, as precipitações foram convertidas em enxurradas.

Há de se considerar, ainda, para agravar essa situação, de acordo com Costa; Botta; Cardille (2003), com a substituição de “Cerrado” ou “Mata” por “Pasto”, diminui a interceptação da água da chuva, o que aumenta o escoamento superficial e diminui a infiltração de água nestas áreas, causando uma redução das vazões média e mínimas e provocando o aumento da vazão máxima. Como agravante, considere-se que “Pasto” não consegue manter a mesma taxa evapotranspirométrica que “Mata”. Como tem um dossel linear, diferentemente de “Mata” e “Cerrado”, a dinâmica do ciclo hidrológico será alterada em face da ausência de movimentos de turbulências dos ventos.

O mesmo pode ser esperado com relação ao uso do solo “Cultivo”: devido a este estar relacionado com uma menor proteção da superfície do solo, principalmente em cenários de mudanças climáticas com elevação de temperatura, possibilitará o aumento do encrostamento superficial e conseqüente aumentos de escoamento e da vazão máxima. Ao contrário, para as vazões média e mínimas, espera-se sua redução.

O processo de validação de um modelo baseado em Dinâmica de Sistemas tem como alvo principal estabelecer a sua validade estrutural com respeito aos objetivos para que ele fosse construído: este é o aspecto determinante. Isto porque a intenção de um estudo conduzido sob essa ótica é servir de base para a avaliação de diferentes estratégias e políticas que permitam melhorar o desempenho do sistema (ORELLANA GONZÁLEZ, 2006).

Contudo, aperfeiçoar o comportamento de um sistema, só tem sentido a partir do momento em que se tem a confiança na estrutura do modelo. Uma vez

que este é construído de forma confiável, devem-se efetuar testes de validação, cuja ênfase deve ser orientada prioritariamente aos padrões da predição, mais do que a resultados precisos, particularmente, quando se trata de modelos projetados para fornecer uma visão de longo prazo do comportamento dos sistemas em estudo (BARLAS, 1996).

Nesse estudo a calibração do modelo foi realizada por intermédio de determinados parâmetros para os quais existiam dados registrados no período 1985-2000. Nesta simulação a dinâmica do crescimento da área cultivada (Figuras 8 e 9) e o crescimento da prática de irrigação (Figura 10).

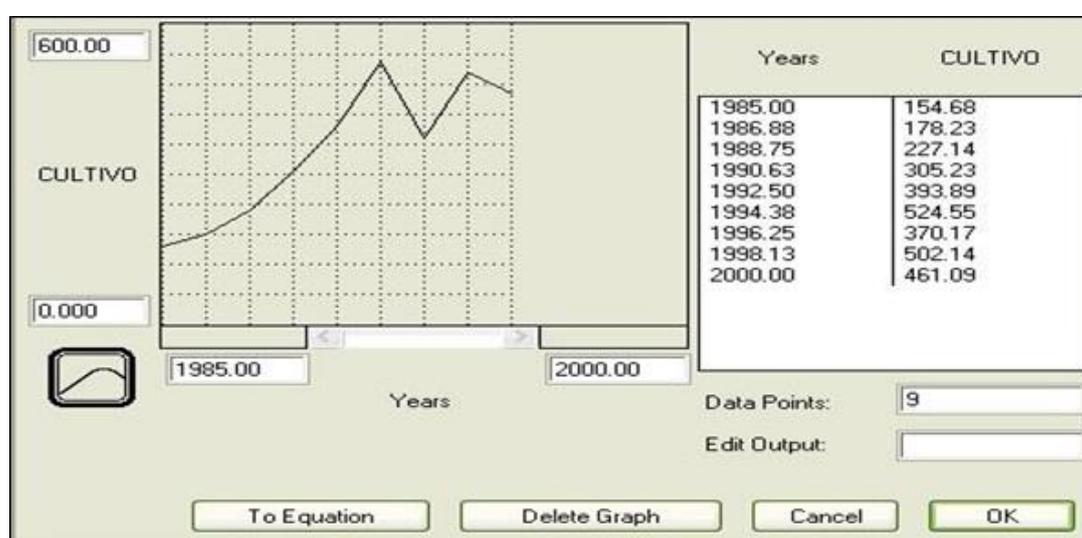


Figura 8. Crescimento da área cultivada na área de drenagem da EFFBE (1985-2000). Fonte: Dados compilados Censos Agropecuários do IBGE (1970, 1975, 1980, 1985 e 1996).

Baseado no trabalho de Latuf (2007) foi selecionado para a realização deste trabalho duas “Estações Fluviométricas” localizadas nas bacias do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto, respectivamente a estação Fazenda Barra da Égua (42435000) e Porto dos Poções (42600000). O principal motivo dessa escolha se deve ao fato de que ambas as estações representam as características das bacias onde se inserem: tem a maior área de drenagem; possui maiores conflitos pelo uso da água; e onde ocorreram as modificações mais significativas nas classes de uso do solo. Dessa forma, subsidiará posteriores associações entre modificações do uso do solo e comportamento

hidrológico, devido ao seu maior percentual de cobertura de área de drenagem, além de estarem localizadas no ponto mais inferior de cada uma das bacias; ou seja, traduzem todas as modificações sofridas à montante.

Verifica-se que o comportamento do modelo correspondeu de forma satisfatória aos dados disponíveis. Contudo, é importante assinalar que nenhum modelo pode ser 100% validado. Isso porque as variáveis incluídas não podem ser precisamente quantificadas, e também, devido às suposições feitas sobre o comportamento esperado dos parâmetros avaliados, posto que frequentemente possa diferir do que acontece, de fato, na realidade. Observa-se na Figura 9 a tendência geral de crescimento das áreas cultivadas nas bacias do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto.

A validação em Dinâmica de Sistemas é uma prática realizada em cada etapa da modelagem, com o propósito de se detectarem falhas nos sistemas construídos. De acordo com Forrester; Senge (1980); e Barlas (1996), entre os procedimentos formais está a aplicação de testes orientados de comportamento estrutural, entre os quais se tem os testes de condições extremas, de sensibilidade e de relacionamento.

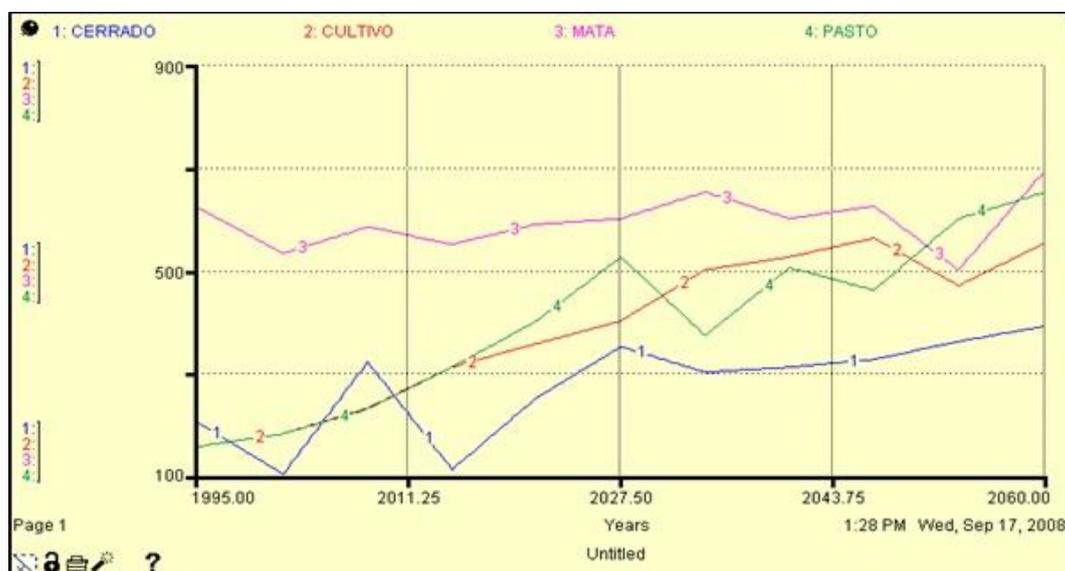


Figura 9. Simulação para a dinâmica das mudanças das classes de uso do solo nas bacias do ribeirão Entre Ribeiros rio Preto e do no período 1995-2060. Fonte: Souza *et al.* (2013).

A Figura 10 reflete a tendência crescente de crescimento das áreas irrigadas na bacia hidrográfica do rio Paracatu no período de 1970-1996.

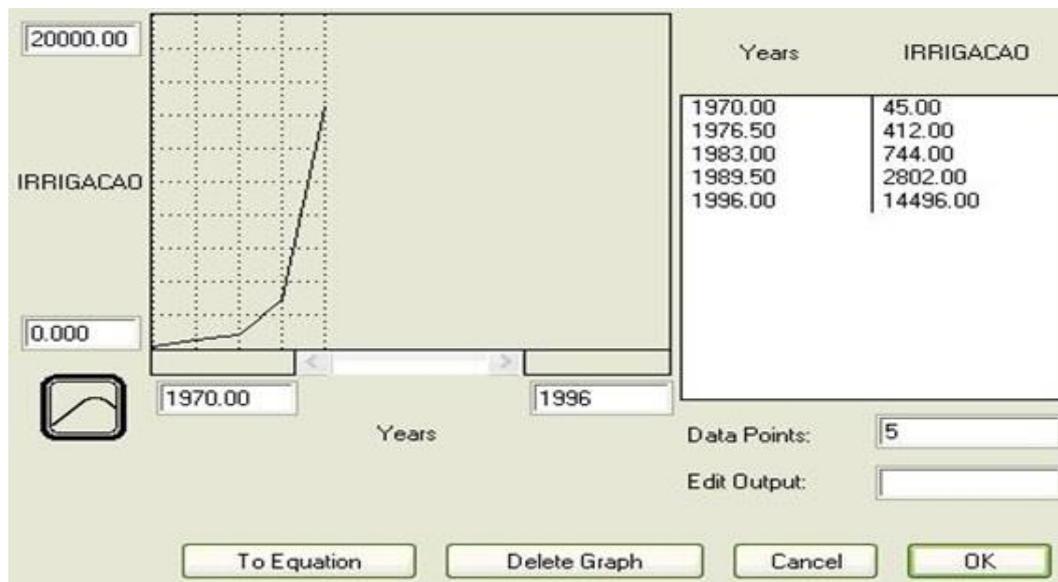


Figura 10. Resultados consistidos do crescimento da área irrigada na bacia hidrográfica do rio Paracatu no período 1970-1996. Fonte: Censos Agropecuários do IBGE de 1970, 1975, 1980, 1985 e 1996.

4.2. Etapa de simulação e aplicação do modelo

A escala temporal do modelo foi determinada de acordo com a natureza do problema e ao objetivo baseado no qual ele foi desenvolvido. Neste estudo, o objetivo principal foi o de avaliar os impactos e as influências das mudanças do uso do solo sobre os ecossistemas aquáticos, em longo prazo, nas bacias hidrográficas do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto, tendo como base de dados a análise do comportamento hidrológico observado no período de 1985-2000 pelo estudo de Latuf (2007).

É necessário já ter uma perspectiva sistêmica dos recursos hídricos no longo prazo. Isso porque se escolherá um futuro, ainda distante e, de fato, apenas quando esse tempo chegar, será possível avaliar se estes recursos estarão sendo usados de maneira sustentável.

O processo de simulação do modelo compreende diferentes cenários de oferta e demanda de água, de acordo com as seguintes especificações:

- ✓ Horizonte temporal: se propõe a um horizonte de 65 simulações. Cada simulação é caracterizada por unidade/ano que determina um horizonte de tempo de 65 anos;
- ✓ Passagem do tempo ou etapa: a passagem do tempo é de uma unidade;
- ✓ Método da integração: se usam equações diferenciais para descrever as relações complexas na dinâmica do sistema, aquelas que são resolvidas por intermédio do método de Euler, que é usado mais frequentemente; e este caracterizou pela adaptação de um fluxo constante durante o passar do tempo ou etapa (STELLA, 2001).

Utilizando-se de uma interface amigável, como a que se apresenta na Figura 11, torna-se fácil a experimentação do sistema. Apresenta-se o modelo representativo dos estoques e fluxos das bacias hidrográficas em estudo. Foi realizada a seleção dos componentes ou “entradas” mais importantes, onde se puderam configurá-los por intermédio dos ícones interativos, razão pela qual se tem um laboratório do sistema que permite simular políticas e cenários, a fim de descobrir novas ideias e a possibilidade da geração de novos questionamentos.

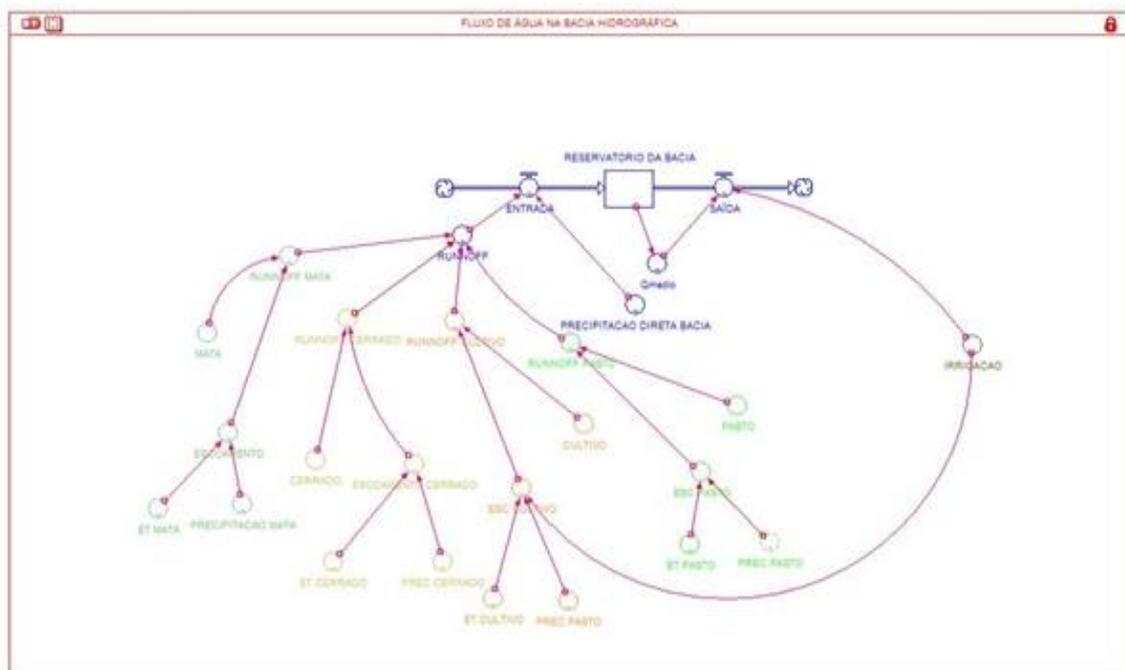


Figura 11. Diagrama de estoque e fluxo das bacias hidrográficas do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto. Fonte: Souza *et al.* (2013).

O modelo desenvolvido neste estudo foi usado para avaliar opções diferentes da exploração dos recursos hídricos para as bacias hidrográficas do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto. Estabeleceram-se diferentes cenários para analisar e avaliar o comportamento das demandas dos setores/atividades econômicos, sociais e ecológicos selecionados: “Cultivo”, “Cerrado”, “Reservatórios”, “Pasto”, “Mata”, “Urbanização”, “Irrigação” e “Precipitação”. Também, foram analisados os efeitos causados por redução ou incremento da oferta de “Água”.

A partir da identificação do sistema em estudo e a definição do problema de forma concisa, precisa e clara, foi escolhido como horizonte de planejamento um período de sessenta e cinco (65) anos (1995-2060). De acordo com Orellana González (2006), o tempo mínimo que é normalmente empregado para a implantação da maioria dos planos de desenvolvimento socioeconômico é de 25-30 anos. Portanto, os resultados desse estudo atendem a esse critério, inclusive analisando um período que ultrapassa os limites exigidos para o planejamento, o que permite uma melhor visão do futuro e facilita o estudo de modelos de gestão estratégica de longo prazo.

A partir dos dados da realidade levantados sobre as referidas bacias, foram elaborados e examinados oito (8) CENÁRIOS (Tabela 1) que compreenderão futuros aumentos de demanda de água, bem como restrições ou aumento da oferta deste recurso, a fim de se avaliar a sustentabilidade do uso do recurso “Água” nessa região:

CENÁRIO 1 - representa o modelo atual em que se desenvolve o agronegócio. Nele são mantidas todas as tendências atuais de crescimento, de consumo e de oferta de água.

CENÁRIO 2 - contempla as previsões de mudanças climáticas proposta por Azevedo; Maciel; Pereira (2005), onde se vislumbra um aumento de 1°C na temperatura média do ar e de 6,9% no aumento de precipitação, portanto, aumento da oferta de água, assumindo-se que os demais componentes do modelo não apresentam variações, ou seja, *ceteribus paribus*.

CENÁRIO 3 - contempla as previsões de mudanças climáticas propostas pelo “Hadley Centre”, o qual sugere uma redução na oferta de água em 20%, devido aos diversos fatores alterados que poderão influenciar no clima.

Tabela 1. Cenários propostos e avaliados no presente trabalho.

Cenários	Categoria	Descrição
1	Agronegócio	Agronegócio atual.
2	Mudanças climáticas	6,9% de aumento na precipitação e 1°C na temperatura média do ar (AZEVEDO <i>et al.</i> , 2005), <i>ceteribus paribus</i> .
3	Mudanças climáticas	Oferta de água reduzida em 20% (HADLEY CENTRE, 2008).
4	Mudanças climáticas	Oferta de água aumentada em 25% (Laboratório de Dinâmica dos Fluidos dos Estados Unidos, MASON, 2002); ou aumento da área de “Reservatórios”.
5	Mudanças climáticas	Aumento da temperatura em 1°C e acréscimo da precipitação em 5% (EMBRAPA, 2001).
6	Mudanças climáticas	Aumento da temperatura em 3°C e acréscimo da precipitação em 10% (EMBRAPA, 2001).
7	Mudanças climáticas	Aumento da temperatura em 5,8°C e acréscimo da precipitação em 15% (EMBRAPA, 2001).
8	Incremento da área irrigada	10% de incremento ao ano*.

* estimativa aproximada baseada na média dos aumentos verificados nas áreas irrigadas levantadas nos Censos Agropecuários de 1970, 1975, 1980, 1985 e 1996, do IBGE, que ocorreram nos municípios que compõem as respectivas bacias em estudo.

Fonte: Souza *et al.* (2013).

CENÁRIO 4 - contempla as previsões de mudanças climáticas onde a oferta de água seria aumentada em 25%, sugerida pelo Laboratório de Dinâmica dos

Fluidos dos Estados Unidos, *apud* Mason (2002); ou uma elevação da oferta de água em função do aumento das áreas inundadas por “Reservatórios”.

Esse cenário tem um importante significado quando se consideram as alterações de precipitação ocorridas nas bacias, observadas por Latuf (2007). Nesse estudo, verificou-se que a redução das precipitações média diária anual (Pa) e do mês mais chuvoso (Pmc), influenciou na redução das vazões média e máxima. Dessa forma, o aumento das áreas inundadas poderá contribuir para aumentar o tempo de concentração da água na bacia, o que favorecerá a recarga dos aquíferos, aumentando as vazões mínimas e médias, além de reduzir as vazões máximas, contribuindo no controle de enchentes.

Nota-se, ainda, que a precipitação do mês mais seco (Pms) tendo obtido uma tendência de comportamento de elevação, este aumento poderá no futuro representar maiores reduções das vazões mínimas Q_7 , Q_{90} e Q_{95} . Isso comprova que o uso consuntivo de água pelo aumento das áreas de “Cultivo” associadas às alterações das classes de uso do solo na área de estudo, têm produzido efeitos sobre o clima e no comportamento do ciclo hidrológico e, conseqüentemente, influenciado nas reduções destas vazões. Daí a importância de se trabalhar esse cenário que poderá ser uma contribuição futura para a regularização das vazões, desde que aliadas a outras práticas conservacionistas e de uso do solo, o que permitiria o crescimento das áreas irrigadas. Cabe considerar, entretanto, que a “Precipitação Direta” na bacia é influenciada, também, por condições externas à bacia em estudo.

CENÁRIO 5 - contempla as previsões de mudanças climáticas onde ocorreria um aumento da temperatura em 1°C e acréscimo da precipitação em 5%, de acordo com as sugestões da EMBRAPA (2001).

CENÁRIO 6 - contempla as previsões de mudanças climáticas onde ocorreria um aumento da temperatura em 3°C e acréscimo da precipitação em 10%, de acordo com as sugestões da EMBRAPA (2001).

CENÁRIO 7 - contempla as previsões de mudanças climáticas onde ocorreria um aumento da temperatura em 5,8°C e acréscimo da precipitação em 15%, de acordo com as sugestões da EMBRAPA (2001).

CENÁRIO 8 - contempla um incremento das áreas irrigadas em 10% ao ano. Tal taxa de crescimento foi estimada baseada em uma média aproximada dos aumentos verificados nas áreas irrigadas pelos Censos Agropecuários de 1970, 1975, 1980, 1985 e 1996, do IBGE, que ocorreram nos municípios que compõem as respectivas bacias em estudo, como pode ser observado no Quadro 2.

Quadro 2. Áreas irrigadas por município das bacias em estudo.

Municípios	Área irrigada (ha)				
	1970	1975	1980	1985	1996
Formosa	39	787	4.169	4.110	1.874
Cabeceiras	0	229	47	15	805
Cabeceira Grande	-	-	-	-	-
Distrito Federal	1.151	2.086	3.812	5.538	12.591
Unai	111	116	624	6.073	16.851
Natalândia	-	-	-	-	-
Dom Bosco	-	-	-	-	-
Bonfinópolis de Minas	0	2	0	217	1.937
Paracatu	45	412	744	2.802	14.496
TOTAL	1.346	3.632	9.396	18.755	48.554
Crescimento (%)		269%	258%	99,60%	258,90%

Fonte: Censos agropecuários 1970, 1975, 1980, 1985 e 1996.

Como se discutiu anteriormente, o modelo deste trabalho foi elaborado para simular diferentes cenários de disponibilidade de recursos hídricos. Teve o

propósito de identificar, no longo prazo, a sustentabilidade do sistema sob cenários distintos: tanto concernentes ao abastecimento, como também com respeito às necessidades hídricas dos distintos setores socioeconômicos e ambientais incorporados ao modelo.

O modelo também servirá como uma ferramenta de análise dos impactos socioeconômicos e ambientais que poderiam ocasionar diferentes alterações na oferta e demanda no desempenho do sistema. Para isto, foram estabelecidas diferentes suposições sobre a oferta e demanda de água regional, no período que se inicia no ano de 1995 e se estende até o ano de 2060.

O efeito do aumento da irrigação foi incorporado em todos os cenários propostos. Tal preocupação se deve ao fato de que esta atividade tem sido a que mais interfere no aumento da demanda de recursos hídricos das bacias em estudo.

O crescimento das atividades agrícolas regionais tem incorporado, em condição crescente, como foi verificada no período de 1985-2000, a prática da irrigação. Esse cálculo passa a ter significativa importância dada à influência dessa atividade no acréscimo da produção, via aumento de produtividade: podem ser visivelmente notado nos dados das produtividades regionais do referido setor.

Há de se considerar, se bem manejada, futuramente, a prática da irrigação poderia reduzir a pressão sobre as áreas da classe de uso do solo “Cerrado” – fator que mais influenciou na redução das vazões médias e mínimas. Contudo, a prática da irrigação tem servido para o cálculo das demandas hídricas desse setor, para que se possa estimar sua respectiva tendência.

Neste estudo, os setores industriais e agroindustriais não foram avaliados. Isso porque atualmente são pouco significativos na região em estudo, além de não se terem dados precisos sobre os seus volumes de produção. Contudo, de acordo com dados de toxicidade dos recursos hídricos regionais, já se observam problemas relacionados à poluição hídrica. Há de se considerar, que em face ao crescimento agropecuário e populacional que vêm ocorrendo nessa região, espera-se que em um futuro próximo estes setores aumentem a sua participação como resposta aos programas de estímulo à

industrialização via incentivos fiscais, que visam à geração de renda e empregos para atender ao aumento crescente da população. Dessa forma, apesar dessa nova condição que se delineia, em função do baixo consumo de água apresentado por esses setores, optou-se pelas suas não inclusões no processo de modelagem.

Todavia, caso esse crescimento se manifeste, conhecendo a dinâmica que ocorre no modelo e as interferências que estes setores podem provocar, bastaria incorporar os seus dados ao modelo. Agindo dessa forma, espera-se que em um futuro próximo e com os dados da produção industrial e agroindustrial disponível e confiável, se possa calcular de forma confiável as exigências hídricas anuais, por tipo de produto e pela quantidade de produção.

4.3. Cenários elaborados para a bacia hidrográfica do ribeirão Entre Ribeiros

Baseado no trabalho de Latuf (2007) foi selecionado para a realização do estudo dessa bacia a EFFBE - Estação Fluviométrica Fazenda Barra da Égua (42435000). O principal motivo dessa escolha se deve ao fato de que essa estação representa as características da bacia onde se insere. Além do fato de subsidiar posteriores associações entre modificações das classes de uso do solo, mudanças climáticas e comportamento hidrológico, devido ao seu maior percentual de cobertura de área de drenagem (41,15%) e por estar localizada no ponto mais inferior dessa bacia; ou seja, traduz todas as modificações sofridas à montante de onde está instalada. No Quadro 3 podem-se observar os dados de área e porcentagem da EFFBE em relação à área total do estudo.

Quadro 3. Porcentagem da área da estação fluviométrica Fazenda Barra da Égua.

Código	Estação Fluviométrica	Bacia	Área total (km ²)	Área de estudo (%)
42435000	Fazenda Barra da Égua	ribeirão Entre Ribeiros	1.591	41,15

Fonte: Modificado de Latuf (2007).

Observa-se no Quadro 3 que a EFFBE apesar de cobrir apenas 41,15% da área total da bacia em estudo, das duas (2) estações fluviométricas existentes nessa bacia, é a mais representativa. Ou seja, a análise de seus dados será bastante importante para se avaliar o funcionamento dos ecossistemas locais e suas inter-relações; ou seja, nos permitirá conhecer a dinâmica desses sistemas.

É bom observar que o Programa STELLA considera as inter-relações existentes entre os diversos parâmetros analisados de uma determinada área. Sobre essas relações e as possíveis alterações surgidas nessa bacia em estudo, cabe considerar os conceitos de cumulatividade e sinergia. Tais conceitos partem do princípio de que as mudanças ao meio ambiente causadas por ações antrópicas em combinação com outras ações do passado, presente ou futuras, podem de alguma forma, potencializar os efeitos ambientais em uma dada região. Parece que essa condição está se dando nas atuais condições.

De acordo com Costa *et al.* (2003) e Bruijnzeel (1990), *apud* Latuf (2007), com a substituição de “Cerrado” e, ou, “Mata” por “Pasto” e, ou, “Cultivo”, diminui a interceptação da água da chuva, o que leva a aumentar o escoamento superficial e a diminuição da infiltração nestas áreas, causando uma diminuição das vazões médias e mínimas e aumento das vazões máximas.

Neste sentido, com o solo mais exposto, ficará mais susceptível às ações da energia cinética associada às precipitações e, conseqüentemente, a capacidade de infiltração tenderá a se reduzir. Tal fato acarretará em aumento do escoamento superficial, com redução da alimentação do aquífero, aumentando, desta forma, as vazões máximas e reduzindo as vazões médias e mínimas. Segundo Tucci (1998), caso o solo permaneça protegido das ações de precipitações diretas sobre a sua superfície, o excedente de precipitação que não é evapotranspirado possui melhores condições de se infiltrar e o aquífero terá uma maior recarga, aumentando, neste sentido, as vazões médias e mínimas e reduzindo as vazões máximas.

É bom lembrar que se faz necessário os conhecimentos de quais classes de usos do solo se agregaram às áreas de outras classes para a

análise das contribuições de evapotranspiração/precipitação. Para a EFFBE, Latuf (2007) constatou que o crescimento das áreas das classes de usos do solo “Mata” e “Cultivo” ocorreram, principalmente, em áreas de “Pasto” e “Cerrado”, respectivamente.

Merece destaque a redução das áreas de “Cerrado” nesta área de drenagem. Deve-se ao avanço da fronteira agrícola, posto que a sua redução em 302,68 Km² no período 1985-2000, 91,93% desse total se transformaram em áreas de “Cultivo”. A substituição das áreas de “Pasto” (-78,99 Km²), 73,88% desse total se converteu em áreas de “Mata”, que nesse período do estudo, cresceu 73,58 Km².

Com relação à classe de uso do solo “Reservatórios”, segundo Rodriguez (2004), não houve a identificação de nenhuma grande barragem para este fim. Há uma barragem de extenso espelho d’água, utilizada para fins de disposição de rejeitos de mineração, localizada dentro dos limites no município de Paracatu/MG. Neste sentido, o aumento identificado para este uso do solo é caracterizado por pequenas barragens provavelmente utilizadas como reservatórios para alimentação de sistemas de irrigação, principalmente, pivô-central.

Ainda, segundo essa mesma autora, evidenciou-se que na bacia do ribeirão Entre Ribeiros há conflitos de disponibilidade de água para atendimento da demanda de seus agentes consumidores. Nesta área de drenagem, 92% da vazão consumida para a estação fluviométrica Fazenda Barra da Égua são para o atendimento da demanda de irrigação. Em outro estudo, Moreira (2005) evidenciou que para a bacia do rio Paracatu, em seu afluente ribeirão Entre Ribeiros, não há disponibilidade de água para atendimento de novas outorgas de concessão de direito de uso da água até 2010.

4.4. Cenário 1: agronegócio atual

A Dinâmica de Sistemas é usada como uma ferramenta que auxilia o conhecimento da situação existente e seu possível futuro. Isso possibilita visualizar o comportamento do sistema em estudo, no curto, no médio e no longo prazo, identificando-se assim, aqueles elementos-chave que podem servir como pontos de apoio para a aplicação de políticas que permitam

melhorar o sistema, o que auxilia o processo de planejamento do uso dos recursos hídricos.

Esta metodologia permite integrar em um único modelo diferentes perspectivas do uso da água, proporcionar dados sobre o que acontece quando se simulam a implementação de uma determinada política, e também possibilita o manejo de variáveis físicas e sociais dentro do mesmo modelo. A simulação, com variáveis deste tipo, ajuda a determinar impactos físicos e sociais resultantes da execução de políticas de longo prazo.

Dessa forma, a Dinâmica de Sistemas é um enfoque adequado para modelar e simular o comportamento de problemas de recursos hídricos no tempo, permitindo decompô-lo em seus subproblemas. O modelo tem a vantagem de proporcionar informações quantitativas, o que permite analisar vários cenários a fim de escolher a solução mais adequada, sendo que isto se alcança em etapas.

Na primeira etapa se efetuou a simulação do CENÁRIO 1, que compreende o agronegócio atual. Este não considera nenhuma variação nos demais parâmetros no modelo, mantendo-se, portanto, suas tendências atuais. Tal análise é importante posto que serviu de base para estudos posteriores. Na Figura 12 observam-se as relações existentes atualmente no Cenário Agronegócio atual, tendo como parâmetros os dados levantados na EFFBE.

Apesar dos dados acima serem apenas relativos à EFFBE, os parâmetros do CENÁRIO 1 refletem as tendências de crescimento econômico de longo prazo nas bacias hidrográficas do ribeirão Entre Ribeiros. Isto pode ser percebido porque esta estação reflete o mesmo comportamento do uso das classes de solo dos principais parâmetros avaliados, no período entre 1985-2000, que as demais estações fluviométricas monitoradas na referida bacia hidrográfica (LATUF, 2007), como se pode observar no Quadro 4.

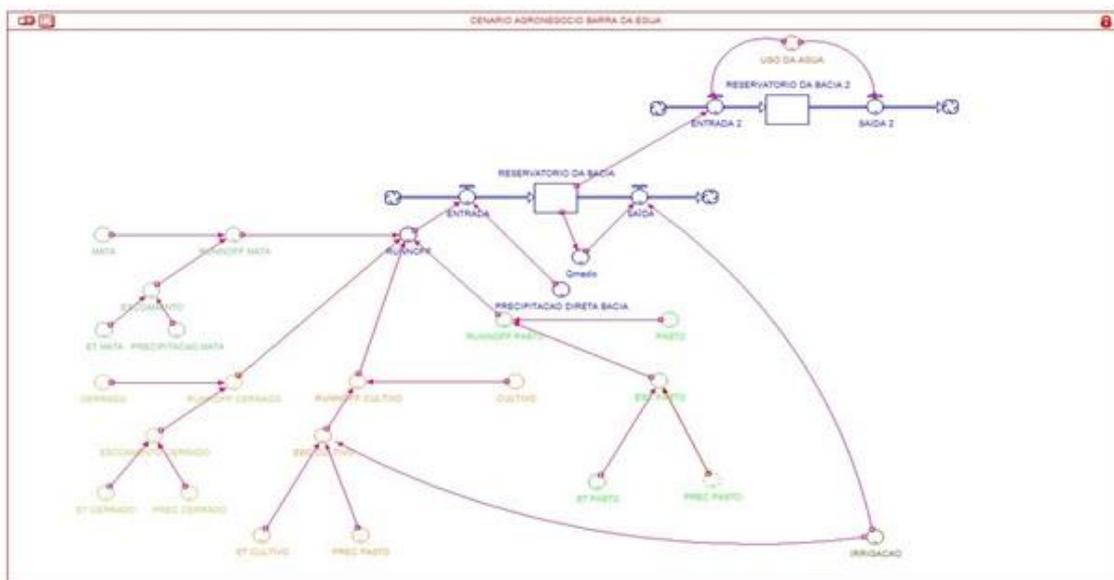


Figura 12. Modelo de estoque e fluxo da água para o CENÁRIO 1. Fonte: Souza *et al.* (2013).

Quadro 4. Significâncias e tendências observadas para o comportamento do uso do solo dos principais parâmetros avaliados, no período 1985-2000, para as estações fluviométricas monitoradas.

Estações fluviométricas	Significâncias (%) e Tendências (↑↓) ao longo do tempo para as classes de uso do solo					
	Mata	Cerrado	Pasto	Cultivo	Urbano	Reser.*
Fazenda Barra da égua	95,0 ↑	99,8 ↓	75,4 ↓	99,9 ↑	-	78,4 ↑
Fazenda Poções	96,2 ↑	99,4 ↓	68,8 ↓	98,9 ↑	-	58,1 ↑
Fazenda Limeira	58,5 ↓	99,3 ↓	58,4 ↓	99,9 ↑	99,9 ↑	61,4 ↑
Unaí	84,1 ↑	99,0 ↓	66,1 ↓	99,9 ↑	99,9 ↑	60,3 ↑
Santo Antônio do Boqueirão	93,5 ↑	98,9 ↓	74,1 ↓	99,9 ↑	99,9 ↑	54,0 ↑
Fazenda Resfriado	99,8 ↑	90,3 ↓	94,7 ↓	97,9 ↑	-	64,3 ↑
Fazenda Santa Cruz	98,7 ↑	90,3 ↓	71,5 ↓	83,9 ↓	-	30,7 ↑
Porto dos Poções	99,9 ↑	99,9 ↓	69,5 ↑	99,9 ↑	99,9 ↑	64,6 ↑
Média	90,7	97,1	72,3	97,5	99,9	59,0

*Classe de uso do solo reservatório; - Sem ocorrência; ↑: Crescimento; ↓: Diminuição.

Linhas hachuradas representam estações na bacia do Entre Ribeiros, as demais para a bacia do rio Preto.

Fonte: Latuf (2007).

Uma das vantagens do programa STELLA, a plataforma usada para a simulação do modelo, é que lança os resultados obtidos na forma de tabelas, gráficos ou figuras, como a Figura 13, que indica o comportamento das demandas de água pela irrigação no período analisado nesse estudo (1995-2060) na bacia do ribeirão Entre Ribeiros.

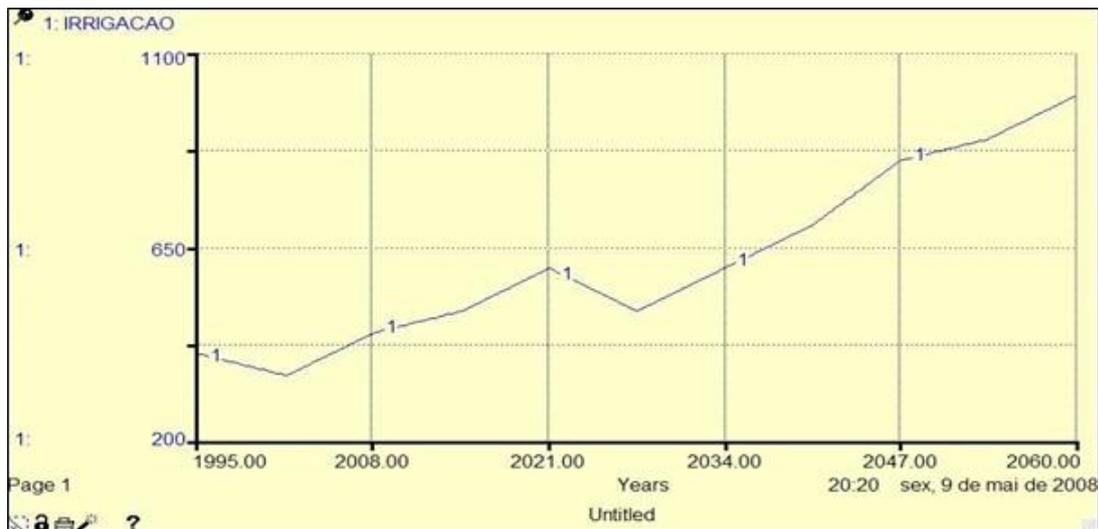


Figura 13. Demanda de água para a atividade irrigação (mm ano^{-1}) para a bacia hidrográfica do ribeirão Entre Ribeiros. Fonte: Souza *et al.* (2013).

Considerando-se a demanda de água apenas para o setor “irrigação”, apresentado na Figura 13, no ano de 1995, de toda a oferta de água da bacia, essa atividade demandaria 400 mm ano^{-1} . Em função da redução da área cultivada, sofre pequena queda até o ano de 2001, quando volta a apontar tendência de crescimento até o ano de 2021, quando novamente sofre redução; a partir do ano de 2027 a tendência de crescimento acontece até o final do período analisado (2060). Nesse CENÁRIO 1, no ano de 2021 a demanda seria de 600 mm ano^{-1} ; em 2047, de 850 mm ano^{-1} ; e em 2060, 1000 mm ano^{-1} .

Considerando como exemplo o parâmetro “Precipitação do Cerrado”, que é o Bioma da região de estudo, e que a precipitação é a principal entrada de água em uma bacia hidrográfica, ter-se-iam os seguintes valores precipitados nos referidos períodos acima citados, respectivamente: 990 mm ano^{-1} , 780 mm ano^{-1} , 1000 mm ano^{-1} e 600 mm ano^{-1} . Determinando-se o

índice de sustentabilidade (IS), e se considerando apenas o setor “Irrigação”, têm-se os seguintes resultados (Quadro 5).

Quadro 5. Índice de sustentabilidade (IS) considerando apenas os parâmetros “Irrigação” e “Precipitação no “Cerrado”

ANO	DEMANDA (mm ano⁻¹)	OFERTA (mm ano⁻¹)	IS
1995	400	990	0,59
2021	600	780	0,23
2047	850	1.000	0,15
2060	1.000	600	0

Fonte: Souza *et al.* (2013).

Verifica-se nesse CENÁRIO 1, onde se modela o “Agronegócio atual”, que o sistema seria insustentável. Observa-se no ano de 2021, apesar do IS ser de 0,23, significando que o sistema estaria utilizando 77% da oferta potencial de água, já apontaria para uma condição de vulnerabilidade - ocorre quando a demanda de água é superior a 80% da oferta potencial de água: nesse cenário ocorre no ano de 2038. No ano de 2047 o IS de 0,15 indica que o sistema já apresenta um forte estresse hídrico, posto estar consumindo 85% da oferta potencial de água. No ano de 2060 o IS é igual a zero; ou seja, a demanda excede toda a disponibilidade dos recursos hídricos locais, o que significa estar ocorrendo a sua depleção por sobre-exploração.

Considerando como exemplo o parâmetro “Precipitação Direta” na bacia, ter-se-iam os seguintes valores precipitados nos referidos períodos acima citados, respectivamente: 1.230 mm ano⁻¹, 1.110 mm ano⁻¹, 800 mm ano⁻¹ e 1.000 mm ano⁻¹. Determinando-se o índice de sustentabilidade (IS), e se considerando como demandante apenas o setor “Irrigação”, têm-se os seguintes resultados (Quadro 6).

Quadro 6. Índice de sustentabilidade (IS) considerando os parâmetros “Irrigação” e “Precipitação Direta”.

ANO	DEMANDA (mm ano ⁻¹)	OFERTA (mm ano ⁻¹)	IS
1995	400	1.230	0,67
2021	600	1.110	0,46
2047	850	800	0
2060	1.000	1.000	0

Fonte: Souza *et al.* (2013).

Verifica-se assim, no CENÁRIO 1 onde se modela o “Agronegócio atual”, o sistema seria insustentável. Observa-se no ano de 2021, com o IS igual a 0,46, significa que o sistema estaria utilizando 54% da oferta potencial de água, bem acima dos 33% usados no ano de 1995. No ano de 2047 o IS é igual a 0 (zero); ou seja, a demanda excede a toda a disponibilidade de recursos hídricos locais, o que significa estar ocorrendo a sua depleção por sobre-exploração.

Dessa forma, a insustentabilidade do sistema já estaria confirmada, mesmo se toda a água disponível fosse destinada apenas à atividade de irrigação. Na verdade, a situação seria ainda mais grave posto existir as demais demandas, tais como ambiental, consumo humano e dessedentação animal. Considere-se como agravante à situação atual, o fato de que neste estudo se considerou a vazão média (Q_{med}) e não a vazão mínima ($Q_{7,10}$) que é o critério atualmente utilizado na concessão de outorgas no Estado de Minas Gerais; ou seja, no critério atual trabalha-se com valores mais limitados de disponibilidade hídrica. Esse fato pode ser confirmado quando se analisam o uso total de água na bacia, tendo por base os dados da EFFBE (Figura 14).

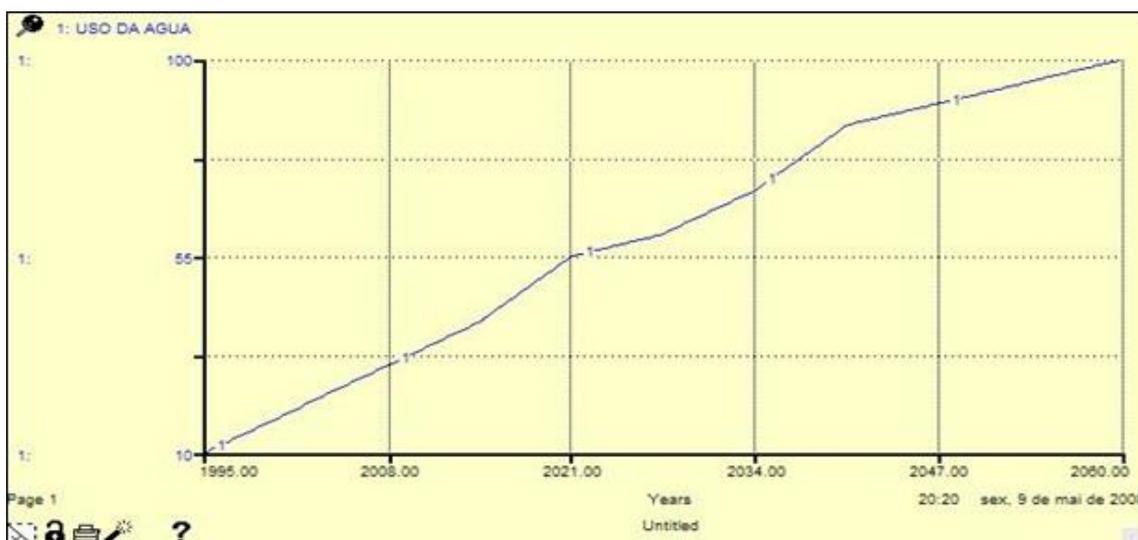


Figura 14. Simulação para o uso da água no período 1995-2060 na bacia do ribeirão Entre Ribeiros. Fonte: Souza *et al.* (2013).

Analisando a Figura 14, observa-se que em 1995 eram consumidos 10% do total de toda a água disponível da bacia. Em 2005 a demanda pelo recurso água já havia se elevado para 25,38%; em 2010, a simulação aponta para um consumo de 33,08%; em 2015, para 41,15%; em 2025, para 58,46%; e em 2039, para uma demanda de 81,54% de toda a água disponível da bacia. Considerando que a condição de vulnerabilidade ocorre quando a demanda de água é superior a 80% da oferta potencial de água, o ano de 2039 aponta para a condição de que o sistema já apresentaria um forte estresse hídrico. Para justificar essa tendência, podem-se observar os dados relativos à evapotranspiração (Figura 15).

De acordo com o estudo de Latuf (2007), no período de 1985-2000, as áreas de “Mata” sofreram um aumento de 11,86%; “Cerrado” uma redução de 47,65%; “Pasto” uma redução de 44,83%; “Cultivo” um aumento de 198,09%; e “Reservatórios” um aumento em sua área de 38,80%. Nesse CENÁRIO 1 verifica-se na Figura 15 que a maior contribuição para a evapotranspiração era a classe de uso do solo “Mata”, no período 1995-2017. Com o aumento das áreas destinadas à “Cultivo”, esse passa a ser o principal contribuinte para a evapotranspiração na área da bacia em estudo.

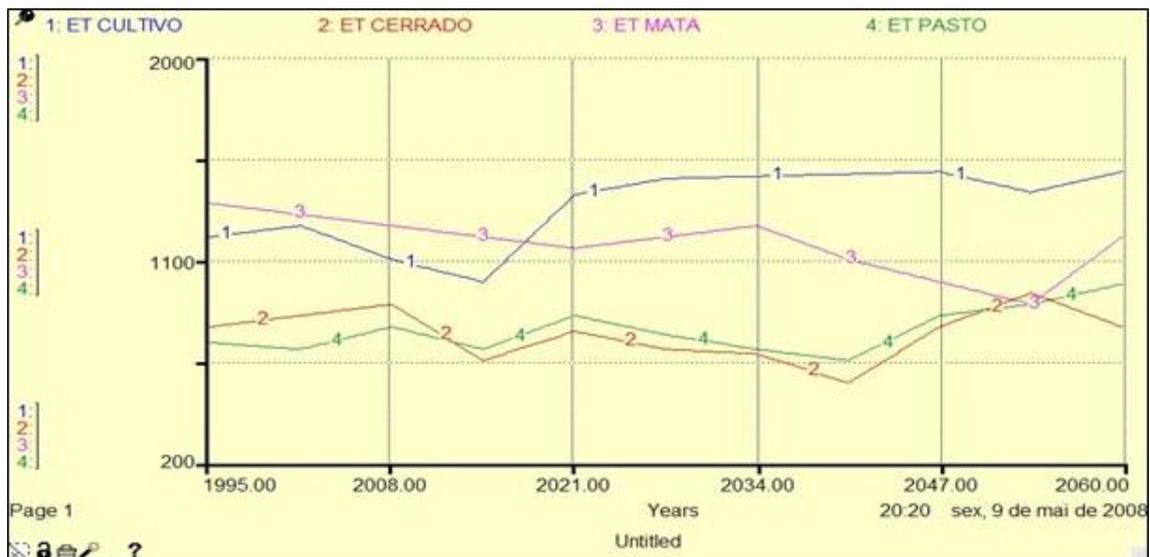


Figura 15. Comportamento da evapotranspiração no período 1995-2060 na bacia do ribeirão Entre Ribeiros. Fonte: Souza *et al.* (2013).

As áreas de “Cerrado” também apontam uma tendência de redução até o ano de 2040, quando volta a apontar crescimento até o ano de 2053, voltando novamente a decrescer. É bom observar que o Programa STELLA considera as inter-relações existentes entre os diversos parâmetros analisados de uma determinada área. Dessa forma, quando o modelo aponta para o aumento da contribuição da evapotranspiração do “Cerrado”, está significando que esta classe de uso do solo está sendo substituída por “Cultivo” e, ou, “Mata”, que apresentam maiores taxas de evapotranspiração.

Considerando que a partir do ano de 2053 a contribuição da evapotranspiração do “Cerrado” volta a decrescer, significa que a sua substituição se deu por “Cultivo”, que não conseguiu manter a elevada taxa evapotranspirométrica por condição inerente a essa classe de uso do solo. Caso tivesse sido substituído por “Mata”, a situação seria inversa ao ocorrido. Avaliando a Figura 15 para a evapotranspiração, observaram-se as seguintes variações das categorias de classe de uso do solo em estudo (Quadro 7).

Quadro 7. Variação da evapotranspiração no período 1995-2060 para categorias selecionadas de classes de uso do solo no CENÁRIO 1.

Categoria	Pasto	Cultivo	Cerrado	Mata
Variação (%)				
CENÁRIO 1	+ 35,62	+ 24,17	0,0	- 11,11

Fonte: Souza *et al.* (2013).

Analisando o Quadro 7, verifica-se um aumento significativo na taxa de contribuição da evapotranspiração das áreas de “Pasto” e “Cultivo” - o crescimento dessas áreas implicou em redução das áreas de “Cerrado” e “Mata”. Relacionando-o à Figura 15, pode-se afirmar que, sendo as áreas de “Cultivo” as principais responsáveis pela Evapotranspiração nesse cenário, a tendência aponta para a redução da “Precipitação Direta” na bacia, posto que “Cultivo” não consegue manter uma taxa de evapotranspiração aos mesmos níveis que “Mata”.

Tal situação já havia sido observada no trabalho de Latuf (2007), onde os comportamentos das variáveis hidrológicas vazões máxima, média e mínimas, assim como a precipitação anual e a do mês mais chuvoso tiveram tendências gerais de redução ao longo do período analisado (1985-2000), aumentando os períodos de seca. A Figura 16 representa a precipitação na área de drenagem da EFFBE, onde se observa a tendência de redução da “Precipitação Direta” na bacia persistirá até ao final do período analisado (2060).



Figura 16. Comportamento da precipitação (mm ano^{-1}) no período 1995-2060. Fonte: Souza *et al.* (2013).

Analisando de forma detalhada a Figura 16, observa-se que no ano de 2008, “Mata” contribuía com um volume de $1.500 \text{ mm ano}^{-1}$ do volume precipitado na bacia; “Pasto”, com 998 mm ano^{-1} ; “Cerrado”, com 900 mm ano^{-1} , enquanto que a “Precipitação Direta” na bacia era de $1.300 \text{ mm ano}^{-1}$. Ou seja, a “Precipitação Direta” na área da bacia representa uma média da Evapotranspiração de cada uma das coberturas vegetacionais existente, desde que sejam mantidas as demais condições, ou seja, *ceteribus paribus*; cabendo considerar, entretanto, saber existir influências externas que influenciam na precipitação local e regional.

Dessa forma, caso toda a bacia fosse coberta por “Mata”, em função de sua maior capacidade de retenção de água no solo, sua taxa de evapotranspiração seria mais elevada, e provavelmente ter-se-ia um maior volume de chuva na região em estudo, *ceteribus paribus*. Contudo, caso a categoria “Cultivo” continuasse a sofrer aumento de suas áreas irrigadas, como se observou na Figura 16, as taxas de evapotranspiração poderiam ser tão elevadas quanto “Mata”. Para tanto, ter-se-ia de haver disponibilidade de água para irrigação - como foi verificada no Quadro 7, essa disponibilidade não há.

Observa-se, no Quadro 8, que o volume da “Precipitação Direta” na bacia no ano de 1995 correspondia a $1.230 \text{ mm ano}^{-1}$; e no ano de 2060, $1.000 \text{ mm ano}^{-1}$; ou seja, uma redução de 18,70% na “Precipitação Direta” na bacia.

Quadro 8. Comportamento da “Precipitação Direta” na bacia para o período 1995-2060 no CENÁRIO 1.

Ano CENÁRIO	1995 (mm ano ⁻¹)	2060 (mm ano ⁻¹)	Variação (%)
1	1.230	1.000	- 18,70

Fonte: Souza *et al.* (2013).

Dessa forma, sugere-se que o sistema em estudo tende a exaustão ou depleção de seus recursos hídricos, caso sejam mantidos os mesmos padrões de desenvolvimento e manejo das áreas produtivas. Considerando a ocorrência e o agravamento das condições climáticas, fica imprevisível qual seria o comportamento desse sistema. Por esta questão, serão avaliados cenários considerando os possíveis efeitos de alterações das classes de uso do solo e seus efeitos sobre os recursos hídricos, em cenários com a ocorrência de mudanças climáticas.

Os mesmos procedimentos foram adotados para os demais sete (7) cenários, totalizando os oito (8) cenários estudados. O trabalho completo pode ser encontrado em Souza (2008).

5. Considerações finais

- A caracterização das bacias do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto para a elaboração do círculo de causalidade e posteriormente do modelo matemático, foi construída especialmente a partir da seleção de componentes que melhor representassem as condições naturais da bacia, suas potencialidades, seus recursos naturais e as condições socioeconômicas de aproveitamento de tais recursos;
- O modelo apresentou confiabilidade em sua simulação para o período 1995-2060, ao apresentar tendências semelhantes aos dados consolidados do período 1970-2000;

- O modelo matemático de estoque e fluxo da água com o uso do programa STELLA, versão 9.0, permitiu simular modificações de uso do solo nas bacias hidrográficas estudadas;
- A simulação apontou para uma tendência de redução da variável “Precipitação Direta” nas áreas de drenagens das estações fluviométricas avaliadas, Fazenda Barra da Égua e Porto dos Poções, respectivamente, referentes às bacias hidrográficas do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto, em todos os oito cenários avaliados;
- O comportamento entre as bacias avaliadas foi diferenciado: em cenários de mudanças climáticas a bacia do ribeirão Entre Ribeiros apresenta maiores reduções na “Precipitação Direta” na bacia, provavelmente pelo maior crescimento percentual das áreas de “Cultivo”;
- As variações percentuais da variável “Evapotranspiração” consideraram as inter-relações existentes entre os diversos parâmetros analisados, podendo ser considerada estratégica como indicadora de mudanças de classe de uso do solo e de seus reflexos sobre a precipitação e o comportamento hidrológico;
- A tendência apontada pelo modelo, quando calculado o “Índice de Sustentabilidade” nos cenários estudados, para ambas as bacias hidrográficas, sugere que os sistemas avaliados tendem à exaustão ou à depleção de seus recursos hídricos;
- A substituição de “Cerrado” por outras classes de uso do solo tem sido a principal responsável pela redução das vazões média e mínimas, principalmente quando substituído por “Cultivo” e, ou, “Pasto”;
- A vazão média anual retirada pela irrigação nas bacias do ribeirão Entre ribeiros e do rio Preto apresentaram acentuada tendência de crescimento quando avaliadas na simulação do modelo, sendo o comportamento dessa variável determinado, principalmente, pelo crescimento da área irrigada no período de análise do presente estudo (1995-2060);
- Considerando a importância da irrigação para o aumento de produtividade e geração de emprego e renda estáveis, a ampliação das áreas de reservatórios deve ser estimulada; cabe considerar que não devem ser construídos em rios ou ribeirões. Parece ser a solução definitiva para o

problema relacionado à disponibilidade de água, considerando o fator “quantidade”;

- A concessão de outorgas de direito do uso da água deve, obrigatoriamente, estar associada a um plano de manejo da irrigação e ao uso de sistemas de irrigação poupadores de água;
- O critério generalizado de concessão de outorgas baseado na $Q_{7,10}$ deve ser reavaliado, considerando as diferenças de comportamentos entre as diversas bacias hidrográficas. Em face do estágio de degradação dos ecossistemas aquáticos, a $Q_{7,10}$ seria o suficiente, nos dias atuais, na maioria das bacias hidrográficas, para atender simplesmente à demanda ambiental – daí a impossibilidade de usá-la para outros fins. Sugere-se o uso da Q_{med} ;
- A introdução das atividades silviculturais deverão se dar exclusivamente em áreas de “Pasto”. Contribuirá para o aumento da evapotranspiração e regularização do ciclo hidrológico;
- Relacionado ao tipo de cobertura vegetal, não se deve permitir a substituição de “Cerrado” por qualquer outra classe de uso do solo. O Bioma é atualmente o mais ameaçado de extinção de suas espécies, colocando em risco toda a cadeia trófica. Além disso, as características climáticas da região são fortemente alteradas, como se pôde verificar na simulação do modelo, mesmo quando substituídas por “Mata”;
- O modelo desenvolvido neste trabalho é um valioso instrumento computacional de AIA, configurando-se em uma excelente ferramenta de auxílio aos formuladores de políticas públicas para o planejamento, gestão e monitoramento dos recursos hídricos: para as bacias agora estudadas, como também para outras bacias hidrográficas;
- As diretrizes que deverão ser tomadas no “Gerenciamento dos Recursos Hídricos” nas bacias agora estudadas, também aplicáveis para qualquer outra bacia hidrográfica, correspondem às linhas de ações programáticas que estabelecem formas de atuação e de intervenção sobre processos de agravamento das condições de deterioração da qualidade ambiental. Devem indicar políticas públicas e atividades direcionadas a controlar, monitorar, mitigar ou compensar impactos provocados pelos

aproveitamentos dos recursos hídricos das bacias, dentro de propostas que reflitam os princípios e anseios do “Desenvolvimento Sustentável”.

6. Referências Bibliográficas

AZEVEDO, S. V.; MACIEL, L. F. F.; PEREIRA, M. E. **A Bacia do Rio Paracatu, Minas Gerais**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas. 2005. 9p. Disponível em: www.futurasgeracoes.com.br. Acesso em: 23 nov. 2007.

BARLAS, Y. Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. **System Dynamics Review**, n.12, p.183-210, 1996.

COSTA, M. H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J. A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. **Journal of Hydrology**, n.34, p.4-11, 2003.

DUVOISIN, I. A. **Uma proposta metodológica para o ensino de equações diferenciais utilizando STELLA**. Porto Alegre: Fundação Universidade Federal do Rio Grande/Revista eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental. 2000. 13p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. In: CARVALHO, M. M.; ALVIM, M. J.; CARNEIRO, J. C. (Eds.) **Sistemas agroflorestais pecuários: opções de sustentabilidade para áreas tropicais e subtropicais**. Juiz de Fora: EMBRAPA Gado de Leite; Brasília: FAO, 2001. 414p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Uma visão geral do número especial da RBA sobre zoneamento agrícola no Brasil. In: ASSAD, E. D.; CUNHA, G. R. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Universidade Federal de Fitotecnia, v. 9, n. 3, p. 377-385, 2001. (Número especial).

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Avaliação Ambiental Integrada. Disponível em: www.epe.gov.br. Acesso em: 13 set. 2008.

FORD, A. **Modeling the environment**: an introduction to system dynamics modeling of environmental systems. Washington: Island Press, 1999. 401p.

FORRESTER, J. W. **Principles of Systems**. Portland, OR: Productivity Press. 1990.

FORRESTER, J. W.; SENGE, P. M. Tests for building confidence in system dynamics models. In: **System dynamics**. Amsterdam, North-Holland: Legast, Forrester & Lyneis, 1980. 179p.

GRCIC, B.; MUNITIC, A. **System dynamics approach to validation**. Disponível em: <<http://www.efst.hr/gric/b2.html>>. Acesso em: 13 nov. 2006.

HADLEY CENTRE. Climate prediction and research. Disponível em: www.metoffice.gov.uk/research/hadleycentre. Acesso em: 23 abr. 2008.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – Estatísticas do século XX [CD-ROM] (2005). (Rio de Janeiro, RJ: IBGE).

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censos Agropecuários**. Brasília: IBGE, 1970, 1975, 1980, 1985 e 1996.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativa populacional para 01/07/2005**: considerações. Brasília: IBGE, 2005. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 16 jan. 2006.

LATUF, M. O. **Mudanças no uso do solo e comportamento hidrológico nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros**. Viçosa, MG: UFV, 2007. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2007.

MASON, C. **Biology of Freshwater Pollution**. New York: Prentice Hall, 2002. 344p.

ORELLANA GONZÁLEZ, A. M. G. **Sostenibilidad de los recursos hídricos en São Miguel do Anta, Minas Gerais**: un enfoque de dinámica de sistemas. Viçosa, MG: UFV, 2006. 104p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa, 2006.

RODRIGUEZ, R. D. G. **Metodologia para a Estimativa das Demandas e Disponibilidades Hídricas**: Estudo de Caso da Bacia do Paracatu. Viçosa, MG: UFV/DEA, 2004, 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2004.

RUTH, M.; HANNON, B. **Modeling dynamic economic systems**. New York: Springer-Verlag, 1994. 339p.

SOUZA, M. N. **Degradação Antrópica e Procedimentos de Recuperação Ambiental**. Balti, Moldova, Europe: Novas Edições Acadêmicas, 2018, v.1000. 376p.

SOUZA, M. N. **Degradação e Recuperação Ambiental e Desenvolvimento Sustentável**. Viçosa, MG: UFV, 2004. 371p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 2004.

SOUZA, M. N. **Dinâmica do uso dos recursos hídricos nas bacias do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto, afluentes do rio Paracatu**. Viçosa, MG: UFV, 2008. 345p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2008.

SOUZA, M. N. **Mudanças no uso do solo e da água e a gestão dos recursos naturais**. Frankfurt, Alemanha: Novas Edições Acadêmicas, 2015, v.5000. 376 p.

SOUZA, M. N. Recuperação ambiental ou recuperação de áreas degradadas: conceitos e procedimentos. p. 11-57. In: SOUZA, M. N. **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**. VOL. I. CANOAS: Mérida Publishers, 2021.133p.

SOUZA, M. N.; MANTOVANI, E. C.; ORELLANA GONZÁLEZ, A. M. G.; SANCHEZ ROMAN, R. M.; SILVA, M. A. A. Dinâmica de sistemas e a modelagem com o uso do programa STELLA dos recursos hídricos da bacia do rio Preto, afluente do rio Paracatu. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.1, n. 1, p.16-42, 2010.

SOUZA, M. N.; MANTOVANI, E. C.; ORELLANA GONZÁLEZ, A. M. G.;

SANCHEZ ROMAN, R. M.; SOUZA, M. A. A. S. Dynamic o systems and the modelling with the use STELLA. **Academic Journals Database**, v. 4, p. 23-37, 2014. Disponível em: <http://www.journaldatabase.org>.

SOUZA, M. N.; MANTOVANI, E. C.; SILVA JUNIOR, A. G.; GRIFFITH, J. J.; DELGADO, R. C. Avaliação do comportamento hidrológico na bacia do ribeirão Entre Ribeiros, afluente do rio Paracatu, em cenário de mudança climática com o uso do software STELLA. **Engenharia na agricultura**, v.1, p.32-47, 2013.

SOUZA, M. N.; MANTOVANI, E. C.; SILVA JUNIOR, A. G.; GRIFFITH, J. J.; DELGADO, R. C. Avaliação do comportamento hidrológico na bacia do ribeirão entre ribeiros, afluente do rio Paracatu, em cenário de mudança climática com o uso do software STELLA. **Sistema Aberto e Integrado de Informação em Agricultura**, v.107, p.1-3, 2012.

SOUZA, M. N.; MANTOVANI, E. C.; SILVA JUNIOR, A. G.; GRIFFITH, J. J.; DELGADO, R. C. Water resources use dynamics in watersheds of ribeirão Entre Ribeiros and rio Preto, tributaries of the Paracatu river. **Boletim de Ciências Geodésicas** (Impresso), v.17, p.35-46, 2012b.

SOUZA, M. N.; MANTOVANI, E. C.; SILVA JUNIOR, A. G.; GRIFFITH, J. J.; DELGADO, R. C. Dinâmica de sistemas e modelagem dos recursos hídricos da bacia do rio Preto com o uso do programa STELLA. **Engenharia na Agricultura**, v.17, n. 43, p.346-353, 2010b.

STELLA. **Introduction to systems thinking**. NH: High Performance Systems, 2001. 165 p.

STERMAN, J. D. **Business dynamics** – systems thinking and modeling for a complex world. Boston: Irwin MacDraw-Hill, 2000. 982 p.

TEIXEIRA SOUZA, S. M. (Coord.). **Deflúvios superficiais no estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Hidrossistemas, 1993. 325p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. UFRGS e ABRH, 1998.

XU, Z. X.; JINNO, K.; KAWAMURA, A.; TAKESAKI, S.; ITO, K. Sustainability analysis for yellow river water resources using the system dynamics approach. **Water Resources Management**, Netherlands, n.16, p.239-261, 2002.

Autores

Maurício Novaes Souza*

Professor do Instituto Federal do Espírito Santo e do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia do Campus de Alegre - Caixa Postal 47, CEP: 29500-000, Alegre-ES.

* Autor para correspondência: mauricios.novaes@ifes.edu.br