

USO DA MODELAGEM COMO FERRAMENTA DE GESTÃO DE ECOSISTEMAS AQUÁTICOS: O CASO DO RIO PRETO, AFLUENTE DO RIO PARACATU

Maurício Novaes Souza¹

Engenheiro Agrônomo (UFV/1981), Mestre em Recuperação de Áreas Degradadas (UFV) e Doutor em Engenharia de Água e Solo (UFV). É professor convidado do Instituto de Educação Tecnológica de Belo Horizonte (cursos de pós-graduação) e professor efetivo do Instituto Federal (IF) do Sudeste de Minas. É Conselheiro do COPAM; Consultor do IBAMA; Perito Judicial Ambiental; Assessor da FAPEMIG na Câmara de Recursos Naturais e Diretor-Geral do IF Sudeste MG *Campus* São João Del Rei.

Rodrigo Fernandes de Oliveira

Graduando em Agroecologia pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais *Campus* Rio Pomba.

Maria Angélica Alves da Silva

Diretora de Desenvolvimento Educacional do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais – *Campus* São João Del Rei.

Alba M. G. Orellana González

Doutoranda do LEB-ESALQ/USP, São Paulo.

Rodrigo Maximo Sanchez Roman

Pós-doutorando do LEB-ESALQ/USP, São Paulo.

Endereço⁽¹⁾: Rua Jovita Giarola, 81. Bairro Colônia do Marçal, São João del-Rei, CEP 36.302-672. Fone: (32) 3373 - 3886. e-mail: mauricios.novaes@ifsudestemg.edu.br.

RESUMO

Neste estudo, buscou-se representar as inter-relações existentes das mudanças das classes de uso do solo e suas influências sobre os fatores climáticos e os ecossistemas aquáticos, na bacia hidrográfica do rio Preto, afluente do rio Paracatu. Neste local, onde a vazão média anual retirada pela “irrigação” na bacia teve crescimento de 62 vezes no período 1970-1996, tem ocorrido a substituição da vegetação nativa “Cerrado” por “Cultivo”. A situação é preocupante quando se verifica pela análise da oferta de água no período 1985-2000, que a “Precipitação” na bacia e as vazões média e mínimas sofreram significativas reduções. A proposta deste trabalho foi desenvolver um modelo de oferta e demanda do uso da água, baseado em princípios de “Dinâmica de Sistemas” com o auxílio do *software* STELLA. Por intermédio da modelagem foi possível expressar graficamente a complexidade dinâmica das relações deste sistema. A calibração do modelo foi realizada por meio de dados da estação fluviométrica Porto dos Poções, coletados no período 1985-2000. Com a simulação do modelo, para o período 1995-2060, verificou-se a tendência de redução de 23,08% na “Precipitação” no Cenário “Agronegócio Atual”. O programa STELLA se mostrou uma excelente ferramenta de auxílio à gestão e ao saneamento ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem, Uso do Solo, Saneamento e Gestão ambiental.

INTRODUÇÃO

A implementação de um projeto ou programa implica em uma cadeia de eventos que modificam o meio ambiente e a sua qualidade. Isto porque todos os fatores existentes em um ecossistema estão interligados, sendo difícil prever seus resultados e externalidades com exatidão. A substituição da cobertura vegetal decorrente da mudança de uso do solo, por exemplo, pode alterar o balanço hídrico e, conseqüentemente, o regime hidrológico de uma determinada bacia hidrográfica (SOUZA, 2004).

Dessa forma, ações humanas podem comprometer o balanço hídrico, merecendo destaque o desmatamento, a mudança do uso do solo, os projetos de irrigação e a construção de barragens. Vale ressaltar que formas desordenadas de uso do solo acabam por agravar os efeitos das secas ou enchentes que atingem a sociedade e suas atividades econômicas. Nas últimas décadas, na bacia do rio Paracatu, a irrigação teve sua participação elevada de 78% para 93% do total da vazão consumida no período 1970-2000, gerando um complexo quadro de conflitos pelo uso da água nessa região. Ao mesmo tempo, o crescimento das atividades econômicas vem acelerando o crescimento populacional, que estimula a implantação de outras atividades, como o reflorestamento utilizando espécies exóticas (LATUF, 2007).

De acordo com esse mesmo autor, para o gerenciamento adequado dos recursos hídricos, é fundamental conhecer o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas bem como seus regimes de variação de vazões e, principalmente, suas relações com os agentes econômicos e sócio-ambientais presentes ao longo de toda a área de contribuição da bacia. No entanto, uma das grandes dificuldades existentes é identificar os vários componentes das mudanças ambientais, provenientes da interação homem-natureza. Atualmente, surgem ferramentas baseadas no “Pensamento Sistêmico” que facilitam o entendimento dessas inter-relações. Nesse estudo, será utilizado um modelo baseado em “Dinâmica de Sistemas” para analisar a sustentabilidade dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Preto.

A “ciência” Dinâmica de Sistemas é uma nova linguagem que permite expressar mais adequadamente as cadeias de eventos circulares existentes na natureza. Por intermédio da modelagem, utilizando-se de diversos tipos de diagramas (causais, estoque e fluxo), é possível expressar graficamente um sistema, possibilitando perceber mais claramente a complexidade dinâmica das suas relações (VILLELA, 2007). A base dessa nova ciência se assenta nos conceitos do pensamento sistêmico, onde o princípio da interdependência demanda que mudanças em qualquer um dos componentes de um determinado sistema, direta ou indiretamente, estão associadas ou afetarão os demais componentes.

Entre os diversos “softwares” existentes no mercado para transformar diagramas causais em modelos computacionais, tem-se o STELLA, acrônimo de “Structural Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation” (“Laboratório de Aprendizagem Experimental com Animação Baseado no Pensamento Sistêmico”). Esse software constitui uma ferramenta computacional que possibilita a construção e a transformação de modelos mentais em diagramas computadorizados, simulando situações reais de sistemas ecológicos dinâmicos, ao mesmo tempo em que possibilita a compreensão de diversas funções matemáticas e a leitura das saídas gráficas correspondentes (DUVOISIN, 2000).

A proposta desse trabalho foi desenvolver um modelo de oferta e demanda hídrica, baseado na Dinâmica de Sistemas, com o auxílio do *software* STELLA. Seu objetivo foi analisar o cenário “Agronegócio”, identificando as mudanças das classes de uso do solo para se verificar sua influência sobre o comportamento da evapotranspiração e da precipitação, e suas influências sobre a redução/aumento na oferta do recurso “Água”. Buscou visualizar políticas públicas e a adoção de medidas de manejo e gestão que garantam a sustentabilidade dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Preto, afluente do rio Paracatu.

METODOLOGIA APLICADA

O estudo foi realizado na bacia do rio Paracatu, situada no Médio São Francisco. A bacia do rio Preto (400 km de extensão) está localizada a noroeste desta bacia e engloba nove (9) municípios. A vazão média observada no rio Preto que aflui ao rio Paracatu é da ordem de $114,26 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, no posto fluviométrico de Porto dos Poções (42600000), situado a montante da seção de deságüe do rio Preto no rio Paracatu. Tal bacia vem apresentando redução nas suas vazões média e mínima (LATUF, 2007).

O “software” STELLA, utilizado nesse estudo, foi a versão 9.0, para “Windows”. A sua escolha se deu pelo fato deste ser frequentemente usado por pesquisadores que trabalham com o enfoque de Dinâmica de Sistemas na modelagem de problemas complexos que integram variáveis diversas. Também, foi o primeiro *software* desenhado para trabalhar com variáveis físicas, bem como econômicas e sociais. Sabe-se que um modelo de recursos hídricos deve considerar todos estes tipos de variáveis (STELLA, 2001).

A construção do modelo neste estudo foi estruturada por meio das seguintes etapas (ORELLANA GONZÁLEZ, 2006): a) conceitualização; b) formalização; e c) simulação - esta etapa inclui a avaliação e exploração. As etapas de conceitualização e de formalização serão agora apresentadas; e a etapa de simulação, apesar de ser uma metodologia, será apresentada nos resultados e discussão.

Para a etapa de conceitualização, foi escolhido como horizonte de planejamento um período de sessenta e cinco (65) anos. Foi examinado o cenário “Mudança Climática”, em comparação com o cenário “Agronegócio atual”, que compreende futuros aumentos de demanda de água e na precipitação, além do aumento da temperatura, e restrições da oferta deste recurso, a fim de se avaliar a sustentabilidade do sistema.

Para o desenho do diagrama causal, que representa as relações principais e relevantes para o estudo da estrutura de oferta e demanda hídrica da bacia do presente estudo, se tomou como base o fluxograma (Figura 1) que contém os componentes principais da estrutura do modelo de recursos hídricos que analisa o balanço entre oferta e demanda de água.

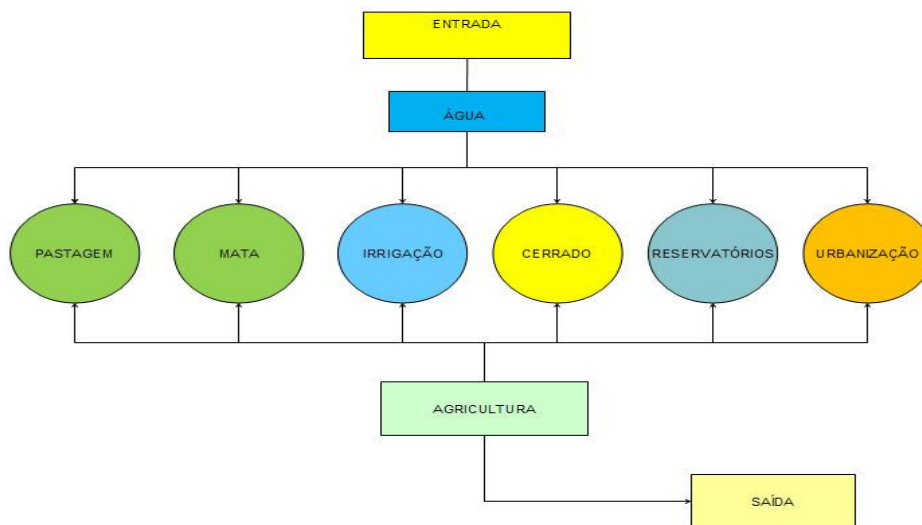


FIGURA 1 – Fluxograma representativo da estrutura do modelo da bacia do rio Preto.

O modelo compreende também a oferta de recursos hídricos disponíveis regionalmente, a qual foi estimada com base na vazão média (Q_{med}) do rio Preto. A elaboração e o entendimento desse fluxograma (Figura 1) permitiram estabelecer os principais componentes do modelo da bacia hidrográfica do rio Preto, e identificar as relações de causalidade mais importantes que existem entre eles. Como resultado destas análises, se elaborou o diagrama causal específico (Figura 2).

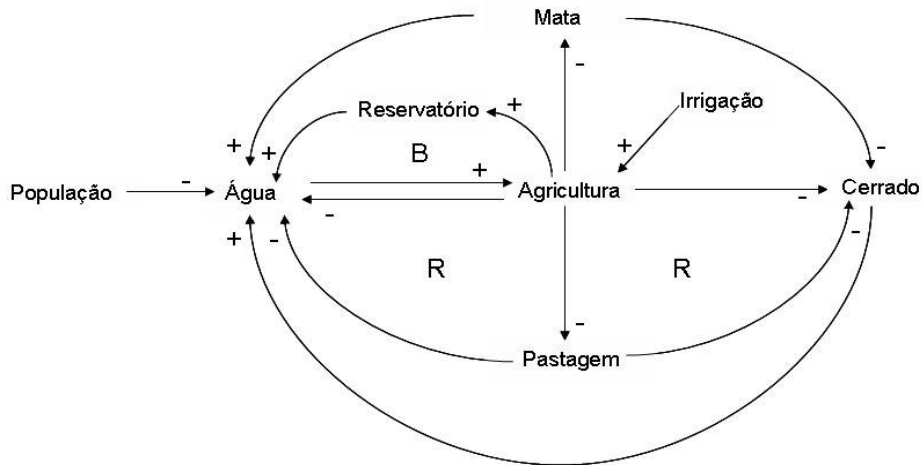


FIGURA 2 – Diagrama causal do modelo da bacia hidrográfica do rio Preto.

Na Figura 2 estão identificados os componentes básicos do sistema, bem como a interação que se dá entre eles: “Água”, oferta de água disponível; “População”, que indica a demanda de água para consumo doméstico; “Cerrado”, que é o Bioma regional, representa produção e estoque de água; “Mata”, incluem-se as florestas de galerias ou as ripárias, representam produção e estoque de água; “Agricultura” ou “Cultivo”, engloba seus requerimentos hídricos e dos plantios florestais; e “Pastagem”, evidenciando a demanda de água requerida por este setor. A variável “Reservatórios” significa estoque de água (Balanceamento); e “Irrigação”, a maior responsável pela demanda de água da bacia.

Na etapa de formalização, elaborou-se o diagrama causal do modelo (Figura 2) empregando para isto uma linguagem matemática. O ponto de partida foi a elaboração do diagrama de estoque e fluxo, que de forma mais detalhada descreve o funcionamento do sistema (Figura 3), a partir do qual se escreveu as equações do modelo, tendo por base os dados da estação fluviométrica Porto dos Poções.

A próxima etapa foi a realização da 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.

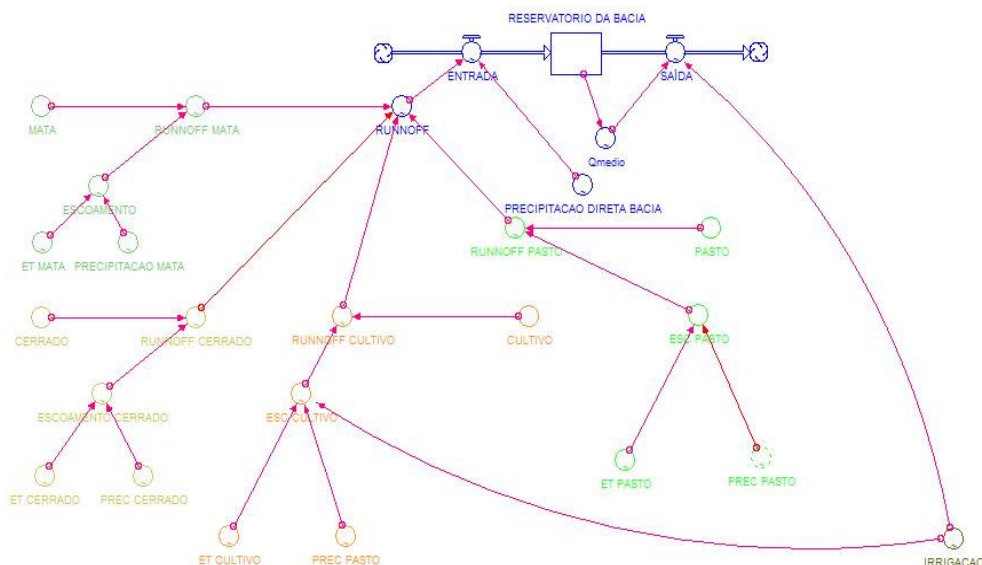


FIGURA 3 – Diagrama de estoque e fluxo da bacia hidrográfica do rio Preto.

RESULTADOS

Nesse estudo, a calibração do modelo matemático foi realizada por intermédio do parâmetro “Irrigação”, para o qual existiam dados registrados no período 1970-1996. Nesta simulação, o crescimento da área irrigada na bacia do rio Paracatu e o uso da água na bacia do rio Preto, refletem a comparação com respeito aos dados históricos da bacia e a simulação do modelo do presente estudo, respectivamente. Esta demanda compreende as necessidades de água na citada bacia e repercute de forma direta a sustentabilidade do sistema. 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. Na validação do modelo, considerou-se que a dinâmica do sistema é determinada pela demanda dos recursos hídricos, para satisfazer às necessidades da população e do setor agropecuário. O processo de simulação do modelo compreende diferentes cenários de oferta e demanda de água.

A partir do levantamento e validação, partiu-se para a etapa de simulação e aplicação do modelo. Foram elaborados e examinados oito (8) CENÁRIOS que compreendem aumentos de demanda de água, a fim de se avaliar a sustentabilidade do uso do recurso “Água” nessa bacia. Nesse artigo, será apresentado o CENÁRIO “Agronegócio Atual”. Nele foram mantidas todas as tendências atuais de crescimento, de consumo e de oferta de água da região em estudo.

Nesse cenário se considerou um incremento médio 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 do IBGE, que ocorreram nos municípios que compõem a bacia do rio Paracatu. O efeito do aumento da irrigação tem sido a maior preocupação regional. Na Figura 4 observam-se as relações existentes atualmente no CENÁRIO “Agronegócio Atual”.

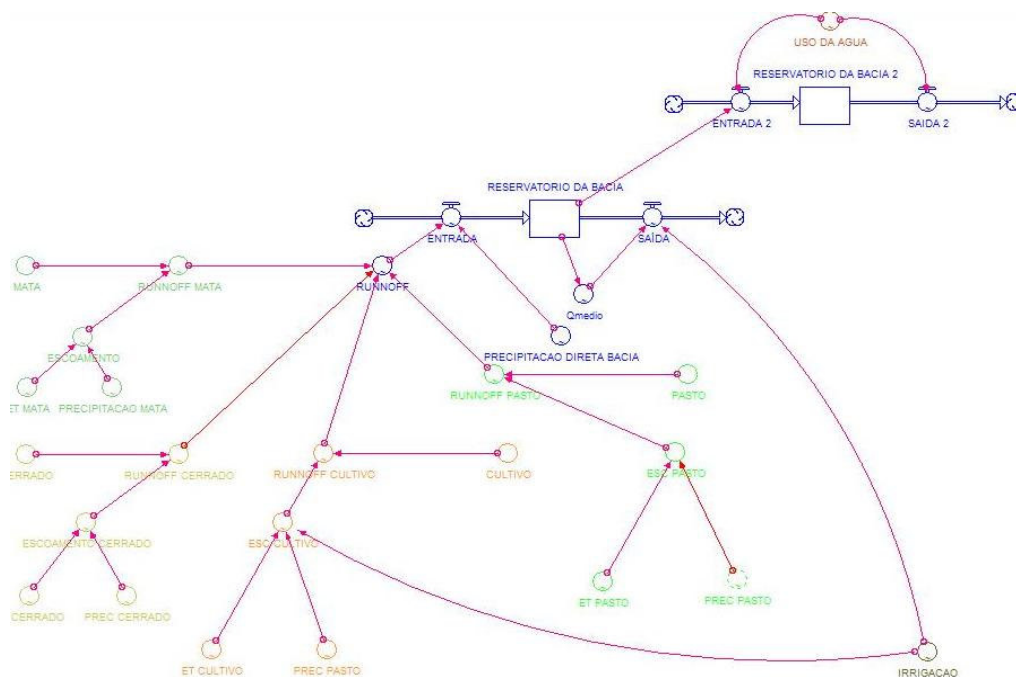


FIGURA 4 – Modelo de estoque e fluxo da água na área de abrangência da estação fluviométrica Porto dos Poções.

Apesar dos dados acima serem relativos à estação fluviométrica Porto dos Poções, os parâmetros avaliados no CENÁRIO “Agronegócio” refletem as tendências de crescimento econômico de longo prazo de toda a bacia hidrográfica do rio Preto. Isto porque esta estação reflete o mesmo comportamento do uso do solo dos principais parâmetros avaliados, no período 1985-2000, que as demais estações fluviométricas monitoradas nessa bacia “LATUF, 2007”.

Uma das vantagens do programa STELLA, é que lança os resultados obtidos na forma de tabelas, gráficos ou como a Figura 5, que indica o comportamento das demandas de água pela irrigação no período 1995-2060.

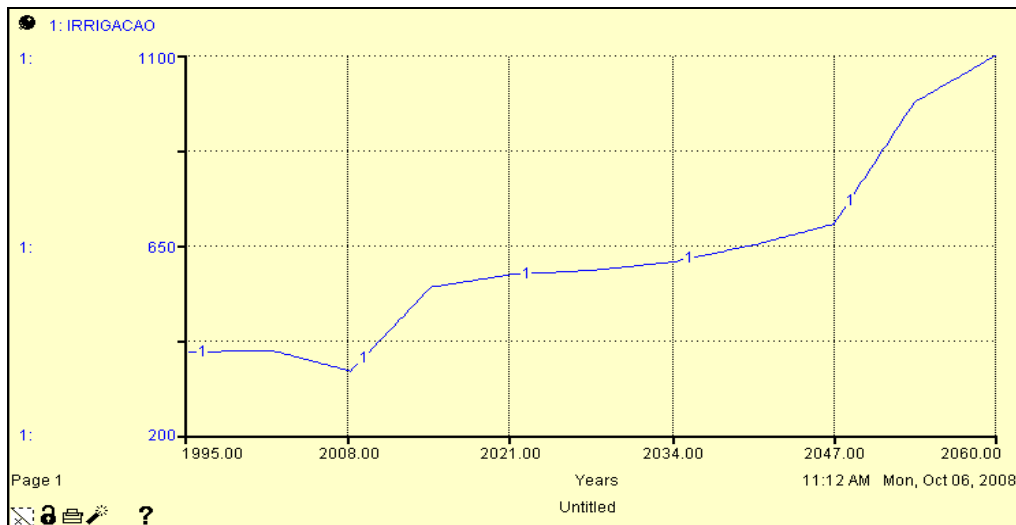


FIGURA 5 – Simulação da demanda de água na bacia hidrográfica do rio Preto para a atividade irrigação (mm ano⁻¹) no período 1995-2060.

Ao se determinar o índice de sustentabilidade (IS), onde será considerado apenas o setor “Irrigação”, têm-se os seguintes resultados, conforme apresentados no Quadro 1.

QUADRO 1 – Índice de sustentabilidade (IS) considerando apenas os parâmetros “Irrigação” e “Precipitação direta” na bacia do CENÁRIO “Agronegócio Atual” do rio Preto

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	981	1.000	0,02

Verifica-se assim, que nesta condição, o sistema seria insustentável.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- O modelo matemático de oferta e demanda hídrica apresentou confiabilidade em sua simulação, ao apresentar tendências semelhantes aos dados consolidados;
- A simulação apontou para uma tendência de redução de -23,08% na precipitação direta na bacia;
- A tendência apontada pelo modelo, quando calculado o “Índice de Sustentabilidade”, sugere que o sistema em estudo tende a exaustão ou depleção de seus recursos hídricos;
- Relacionado ao uso do solo, percebe-se que 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”;
- O Programa STELLA é uma ferramenta possível de ser utilizada para incorporar variáveis sociais, econômicas e ecológicas, tendo se mostrado eficiente em sua proposta de apoio para a tomada de decisões nas fases de planejamento e monitoramento;
- O modelo desenvolvido neste trabalho é um valioso instrumento computacional de auxílio aos formuladores de políticas públicas para o planejamento, gestão e monitoramento dos recursos hídricos: para a bacia do rio Preto, como também para outras bacias hidrográficas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. 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.
2. LATUF, M. O. **Impacto das mudanças do uso do solo nas vazões observadas nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros, MG**. Viçosa, MG: UFV, 2007. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2007.
3. ORELLANA GONZÁLEZ, A. M. G. **Sustentabilidade 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.
4. VILLELA, P. R. C. **Introdução à dinâmica de sistemas**. II SEMANA ACADÊMICA DA GESTÃO DO AGRONEGÓCIO. Viçosa: DER/UFV, 2007. 66p.