

# Valoração Ecológica de Serviços Ecossistêmicos Hídricos: Uma perspectiva de Dinâmica de sistemas

Alba Ma. Orellana G., D.Sc., Marcos Vinícius Folegatti, D.Sc., Rodrigo M. Sánchez-Román, D.Sc.  
UNESP, USP, UNESP

[amorellana@hotmail.com](mailto:amorellana@hotmail.com); [mvfolega@usp.br](mailto:mvfolega@usp.br); [rmsroman@fca.unesp.br](mailto:rmsroman@fca.unesp.br)

--Recibido para revisión Agosto 2012, aceptado 30 de Setembro de 2012, versión final 2012--

*Resumo*— O objetivo principal desta pesquisa foi desenvolver um modelo de simulação dinâmica para a valoração ecológica de serviços ecossistêmicos hídricos, baseado em princípios de “Dinâmica de Sistemas” com o auxílio do software STELLA. A hipótese básica adotada foi que: a valoração ecológica dos serviços ecossistêmicos deve contar com uma ferramenta integradora dos elementos envolvidos na modelagem ecológica como requisito básico para compreensão da dinâmica ecossistêmica que gera fluxos de serviços ecossistêmicos hídricos (SEH). Os SEH são os benefícios gerados a partir das complexas interações, entre os componentes do ciclo hidrológico e que tem a ver com a preservação tanto em quantidade como em qualidade da oferta de água. O modelo foi desenvolvido, através de uma análise sistêmica dos processos ecossistêmicos compreendidos dentro do ciclo hidrológico. Foram determinadas as principais variáveis e suas respectivas inter-relações, de acordo com a estrutura desse ciclo. Essa estrutura foi representada no diagrama causal, que serviu de base à elaboração do diagrama de estoque e fluxo, por meio do qual se estabeleceu o modelo matemático que permitiu efetuar a simulação numérica. A escala temporal de aplicação do modelo é diária e foram efetuadas 365 simulações, o que permitiu estimar fluxos anuais de SEH. O modelo foi parametrizado na sub-bacia das Posses, Município de Extrema, Minas Gerais; onde esta sendo implementado o primeiro projeto piloto, baseado na relação floresta-água, de pagamentos por SEH do Brasil. O modelo desenvolvido permitiu aumentar a compreensão dos fluxos de SEH, o que representa uma ferramenta de elevado potencial de aplicação nas fases de definição de âmbito, de avaliação de alternativas e monitoramento de esquemas de pagamentos por SEH no Brasil.

*Palabras Chave* — **Balanco hídrico, Ciclo hidrológico, Dinâmica de sistemas, Modelagem ecológica**

*Abstract*— The main objective of this research was to develop a dynamic simulation model to value ecological hydrological ecosystem services. The principles of “System Dynamics” were applied using the software STELLA. A basic hypothesis was adopted: ecological valuation of

ecosystem services must use a tool to integrate all the elements involved in ecological modeling, as a basic requirement to understand the ecosystem dynamic that generates water fluxes as hydrological ecosystem services (HES). HES are the benefits generated from complex interactions that occur within the hydrologic cycle; those interactions deal with the preservation of available water, in quantity and quality. The model was developed after a systemic analysis of the ecosystem processes involved in the hydrologic cycle; pointing out the main variables and the inter-relations that constitute it. Then, the structure of those relations was represented in a causal diagram; becoming the base to build up the stocks and flows diagram. This later diagram established the mathematical model that allowed the numerical simulation. The time step of the model is one day; it was run for 365 days, thus estimating annual water HES. The model was parameterized at Poses sub-watershed, Extrema County, Minas Gerais. In Extrema county was established the first payment for HES project in Brazil, based on the relationship between forest-land and water availability. The model developed enables to increase the understanding of HES fluxes, becoming a tool with a broad spectrum of applications during the stages of assessing and scoping alternatives for payment of environmental services and to monitor HES programs in Brazil.

*Keywords* — **Water balance, Hydrologic cycle, Dynamic systems, Ecological modeling**

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil vem estudando estratégias para conservar e recuperar ecossistemas, focadas nos serviços ecossistêmicos hídricos – SEH e na compensação financeira aos produtores rurais pela adoção e/ou fortalecimento de ações protetoras do meio ambiente.

A pesquisa desenvolvida no presente trabalho está focada na modelagem e simulação dos processos ecológicos que geram SEH, que podem ser definidos como aqueles benefícios resultantes do ciclo hidrológico e que estão relacionados à manutenção da oferta de água disponível

tanto em quantidade como em qualidade. No caso particular deste trabalho, a atenção principal foca-se nos serviços vinculados à quantidade de água superficial, infiltrada e armazenada nos locais onde estão sendo implementados Programas de Pagamentos por Serviços Ecosistêmicos Hídricos (PSH) no Brasil.

O objetivo principal da pesquisa consistiu-se na formulação de um modelo de simulação para valoração ecológica de serviços ecossistêmicos hídricos nas Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (BH-PCJ) localizadas no Estado de São Paulo, utilizando a metodologia da dinâmica de sistemas – DS.

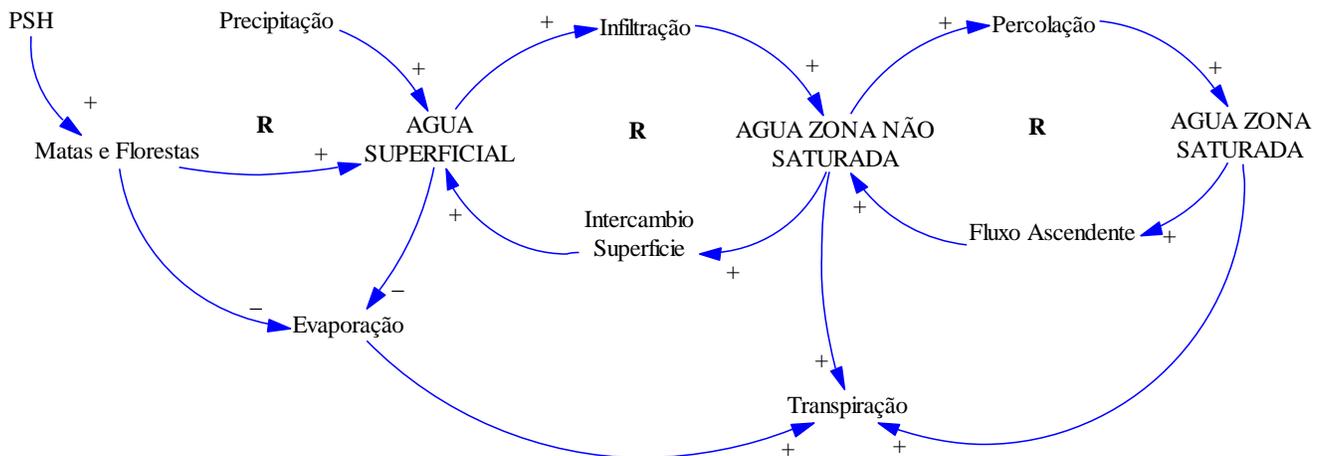
Os objetivos específicos foram: i) desenvolvimento de um processo de modelagem de sistemas dinâmicos para simular as funções do ecossistema que geram SEH, mediante a obtenção de modelos mentais de especialistas e a construção de diagramas de influência, de estoque e de fluxos; ii) elaboração e validação do modelo matemático que representa os processos de infiltração, retenção e armazenagem de água na área de estudo, e identificação das variáveis biofísicas que tem maior efeito nestes processos; iii) simulação do comportamento do modelo sob diferentes cenários, tais como: diferentes alturas de vegetação; diferentes texturas do solo e diferente profundidade do lençol freático.

## 2. DESENVOLVIMENTO

### 2.1. Etapa de Conceitualização: Diagrama de influência ou círculo de causalidade

Por intermédio de uma análise sistêmica, foram determinadas as principais variáveis físicas e biológicas e suas respectivas inter-relações, conformando-se assim, a estrutura do modelo de simulação para valoração ecológica de SEH (MOVA). Esta estrutura é representada no diagrama causal, que tem sido utilizado como base para a elaboração do diagrama de estoques e fluxos, por meio do qual se determinou o modelo matemático que permitiu efetivar a simulação numérica.

O círculo de causalidade é uma das ferramentas do pensamento sistêmico por meio do qual é possível expressar graficamente o comportamento, ao longo do tempo, das diversas variáveis envolvidas em uma dada questão. É composto por variáveis conectadas por meio de setas que indicam o sentido da alimentação do ciclo ou da influência das variáveis. Os sinais “+” e “-” indicam respectivamente se o movimento de alimentação está no mesmo sentido da influência original ou se está em sentido oposto. A letra “R” indica se está ocorrendo reforço (NARDELLI; GRIFFITH, 2000) (FIGURA 1).



**Figura 1.** Diagrama de Influência do MOVA.

O círculo de causalidade ou diagrama de influência, elaborado para o sistema hidrológico permite a visualização do conjunto de inter-relações existentes entre todos os aspectos ambientais e antrópicos a ele relacionados.

Na **Figura 1** 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 objeto de estudo.

Apresenta-se “Água Superficial”, “Água Zona não Saturada” e “Água Zona Saturada” como os estoques ou reservatórios que recebem a água que é movimentada dentro do ciclo hidrológico. Os processos como “Precipitação”, “Infiltração”, “Percolação”, “Transpiração” e “Evaporação” são os que geram os intercâmbios de fluxos

físicos de água entre a Biosfera, a Atmosfera, a Litosfera e a Hidrosfera. Foram vinculados esses processos à política de reflorestamento implementada no local de estudo através de um Projeto Piloto de Pagamentos por Serviços Ecosistêmicos Hídricos (PSH), que por meio de incentivos econômicos está conservando e aumentando as áreas florestadas, protegendo as nascentes, prevenindo e reduzindo a erosão e construindo bacias de captação no local de estudo.

Com respeito aos laços de retroalimentação existentes entre os componentes do sistema, podem-se destacar os seguintes pontos: o aumento no reflorestamento gera um impacto positivo sobre o processo de infiltração incrementando esse processo; manifestando-se os efeitos de uma variável sobre

outra com um sinal (+) ao final da seta, que indica que a influência de uma variável sobre outra faz que os efeitos gerados caminhem na mesma direção (**Figura 1**).

Por exemplo, se a atividade de reflorestamento aumenta, ela repercute em um aumento do processo de infiltração e vice-versa. Ao contrário, um aumento do reflorestamento gera um impacto negativo sobre a evaporação, pode-se então afirmar que os efeitos caminham em direções contrárias, representadas com um sinal (-) ao final da seta. Da mesma forma pode-se também observar que, um aumento na Precipitação gera um aumento no estoque de Água Superficial (+) e vice-versa. O aumento no estoque de Água Superficial incrementa por sua vez o processo de Infiltração (+) o que também aumenta o estoque de Água da Zona não Saturada (+).

O aumento da quantidade de Água na Zona não Saturada incrementa a quantidade de água Percolada (+), que também impacta de forma positiva no estoque de Água na Zona Saturada (+) ocasionando um aumento do processo de Transpiração (+).

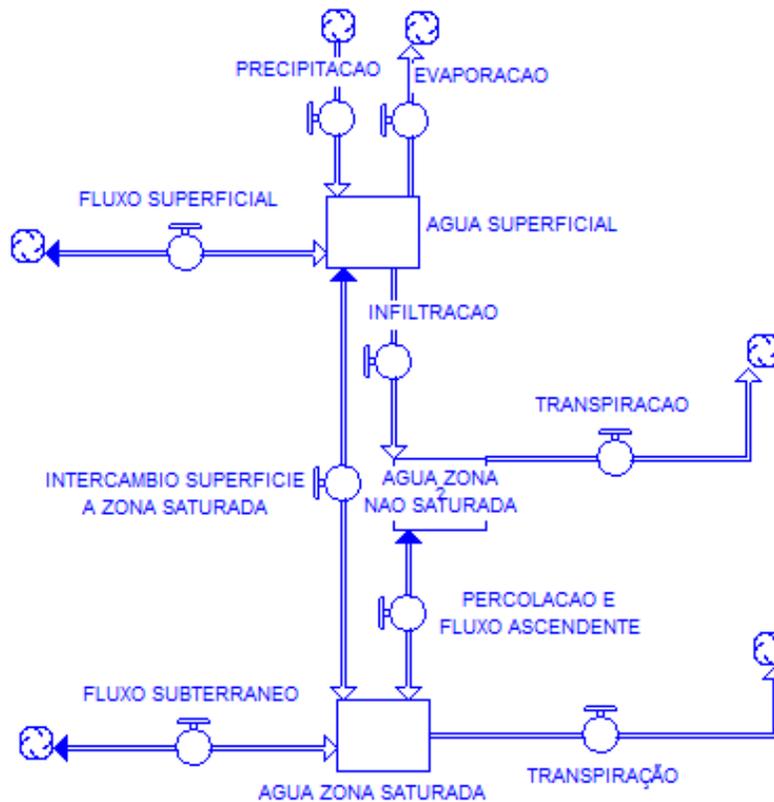
O processo de Transpiração guarda uma relação no mesmo sentido com respeito ao estoque de Água na Zona não

Saturada e com respeito ao processo de Evaporação, já que existe um efeito positivo derivado da relação entre essas variáveis – se uma cresce a outra também, e vice-versa. No referente ao processo de Evaporação observamos que geram-se efeitos em sentido contrário da variação no que se refere ao estoque de Água na Zona não Saturada e ao Reflorestamento (Matas e Florestas), por isso o sinal (-) na relação entre essas variáveis.

Produto dos efeitos das relações entre as variáveis, o modelo está caracterizado, em síntese, por um laço de realimentação positivo ou de reforço (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.

## 2.2. Etapa de formalização: Diagrama de estoque e fluxo

O diagrama de influência do modelo (**Figura 1**) permite desenhar o diagrama de estoque e fluxo, que de forma mais detalhada descreve o funcionamento do sistema representado (**Figura 2**).



**Figura 2.** Diagrama de estoque e fluxos.

Fonte: Adaptado de Voinov et al. (2004).

A conversão se deu da seguinte forma: uma vez representados no diagrama de influência, os componentes principais do MOVA (Matas e Florestas-reflorestamento-,

Água Superficial, Água Zona não Saturada, Água Zona Saturada, Precipitação, Infiltração, Percolação, Transpiração e Evaporação), assim como as relações principais existentes entre eles, procedeu-se a sua

formalização em linguagem de Dinâmica de Sistemas (DS), auxiliados pelo *Software STELLA* empregados na construção de modelos que se elaboram a base deste enfoque. Os modelos de DS são construídos usando um conjunto de equações diferenciais, as quais são matematicamente resolvidas, para um determinado período, por um algoritmo que gera comportamentos dependentes do tempo, para as variáveis contidas no modelo. As principais equações existentes no modelo foram tomadas dos trabalhos desenvolvidos por Fitz et al. (1996) e Voinov et al. (2004).

**2.3 Etapa de simulação: aplicação do MOVA**

A escala temporal do modelo foi definida de acordo com a natureza do problema e ao objetivo baseado no qual ele foi formulado. Neste estudo, o MOVA foi desenvolvido para a valoração ecológica de serviços ecossistêmicos hídricos, ou seja, para a estimação anual dos fluxos destes serviços, (na área de parametrização do modelo: sub-bacia das Posses, Extrema, MG), por meio de uma análise dos processos ecossistêmicos. Processos estes que geram fluxos de serviços de água superficial, água infiltrada e água armazenada.

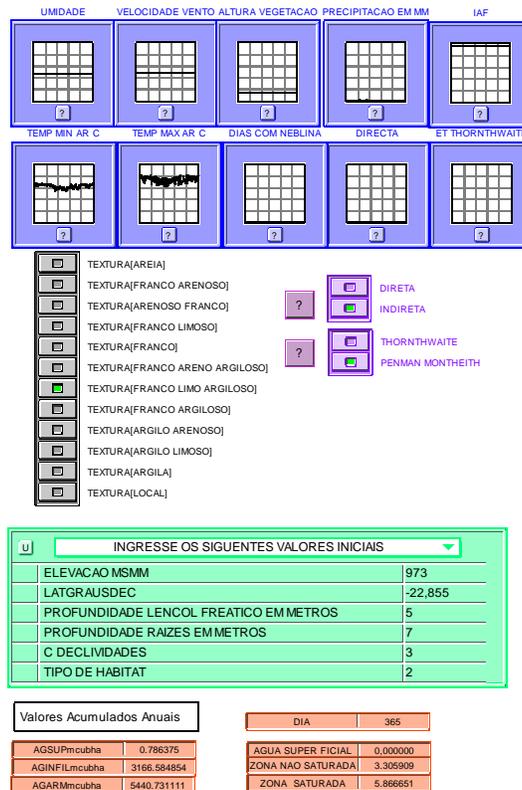
O MOVA, através de uma perspectiva sistêmica destes fluxos de serviços, pode auxiliar no monitoramento e avaliação do projeto piloto de pagamentos por serviços ecossistêmicos implementado na área de estudo.

O processo de simulação do modelo compreende diferentes cenários para a determinação dos fluxos de SEH, de acordo com as seguintes especificações:

- i) Horizonte temporal: se propõe a um horizonte de 365 simulações. Cada simulação é caracterizada por unidade/dia que determina um horizonte de tempo de um ano;
- ii) Passagem do tempo ou time-step: refere-se à passagem do tempo que é de uma unidade; e
- iii) Método de integração: utilizam-se equações diferenciais para descrever as relações complexas na dinâmica do sistema, resolvidas por intermédio do método de Euler, que é o método mais frequentemente utilizado; e este caracterizou-se pela adaptação de um fluxo constante durante o passar do tempo ou time-step (STELLA, 2001).

Utilizando-se uma interface amigável, torna-se fácil a experimentação com o sistema (**Figura 3**).

Na **Figura 3**, apresentam-se os dados e procedimentos necessários de serem incorporados ao modelo, de modo que possa ser possível de ser aplicado num determinado espaço geográfico. Foi realizada a seleção dos componentes ou “entradas” mais importantes, configurados por meio de ícones interativos, permitindo estabelecer 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 3.** Interface do MOVA.

A interface do MOVA (**Figura 3**) compreende uma série de ícones interativos. Os ícones que contem os parâmetros de

UMIDADE (umidade relativa do ar), VELOCIDADE VENTO, ALTURA VEGETAÇÃO, PRÉCIPITAÇÃO EM MM, Índice de Área Foliar (IAF), TEMPERATURA MIN

AR C, TEMPERATURA MAX AR C, DIAS COM NEBLINA, Radiação Solar DIRETA, INDIRETA, THORNTHWAITE, e PENMAN MONTEITH contem em cada um deles o botão: ? ao clicar nesse botão encontram-se as indicações ao respeito de cada um deles e como devem ser inseridos os dados.

Com respeito ao parâmetro textura do solo, a interface possui doze (12) classes diferentes. A classe chamada de “Local” refere-se à textura de solo específica da área de interesse. Se essa classe é a escolhida será preciso incorporar no modelo os parâmetros específicos de: porosidade, condutividade hidráulica, taxa de infiltração, capacidade de campo e condutividade vertical, associados a tal textura de solo. Neste caso, o modelo trabalha com uma textura por vez.

A evaporação na superfície ( $m\ d^{-1}$ ) pode ser incorporada ao modelo de duas maneiras: i) a partir de dados de estações meteorológicas (na interface clicar no ícone DIRETA), ou ii) calculada a partir do método de Christiansen (1968) (na interface clicar no ícone INDIRETA). Esse modelo usa os valores de temperatura em graus Celsius ( $^{\circ}C$ ), radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar como variáveis independentes. Excetuando a radiação solar que é calculada internamente pelo MOVA, os dados dos outros parâmetros devem ser inseridos em séries de tempo.

O MOVA pode calcular a evapotranspiração de duas formas: i) usando o método de Penman-Monteith ou ii) usando o método de Thornthwaite. Este último requer somente os dados de temperatura média mensal e as horas-sol por dia (insolação), mas é menos confiável que o primeiro. Quando possível é melhor usar o método de Penman-Monteith. Se o método escolhido é o de Thornthwaite é preciso fazer os cálculos num outro aplicativo como, por exemplo, o Excel e inserir os dados no ícone da série de tempo respectiva.

Para aplicar o MOVA, devem ser inseridos valores iniciais de altitude do local, latitude, declividade, profundidade do lençol freático, profundidade das raízes da cobertura vegetal analisada e o tipo de habitat. O modelo diferencia três tipos de habitats: corpos de água, florestas ou matas e culturas.

Na interface podem ser observados os resultados das quantidades anuais dos fluxos de SEH estimados pelo MOVA: água em superfície, água infiltrada e água armazenada ( $m^3\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ ). Podem também ser observados, os níveis diários dos estoques de água superficial, água na zona não saturada e água na zona saturada, em  $m\ d^{-1}$  na

superfície mínima de aplicação do modelo que é de 200m x 200m.

### 2.3.1 Cenários avaliados na sub-bacia das Posses

O modelo desenvolvido neste estudo foi usado para estimar fluxos de SEH (valoração ecológica) que repercutem na quantidade de água disponível. Esses serviços resultantes do ciclo hidrológico dependem de diversos fatores tais como: vegetação, características geográficas e topográficas, clima, etc.

Estabeleceram-se diferentes cenários para avaliar o comportamento dos parâmetros envolvidos nos processos que geram os SEH. A partir dos dados levantados sobre a área de estudo (a sub-bacia das Posses, Extrema, MG), foram elaborados e examinados trinta e seis (36) cenários (**Quadro 1**) que compreendem as duas texturas de solo principais, três diferentes alturas da vegetação, três níveis de profundidade do lençol freático (águas subterrâneas) e dois métodos de cálculo da evapotranspiração. Os cenários foram utilizados para aplicar e experimentar o modelo na área de estudo e ver o efeito que tem mudanças nesses parâmetros sobre os fluxos anuais dos SEH considerados neste estudo.

### 2.3.2. Cenários considerando a altura de vegetação das áreas de nascente, de foz e mediana da sub-bacia das Posses.

Os cenários 1a até 6b se referem à altura da vegetação da **área de nascente** da sub-bacia das Posses. Essa área é caracterizada pela vegetação bastante perturbada de porte entorno de 10m de altura. O estrato arbóreo é pouco denso sendo que a espécie que apresentou a maior densidade foi a Aroeira Vermelha (*Schinus terebinthifolius*), seguida da Capororoca (*Myrsine ferruginea* e *M. umbellata*). Os cenários 7a até 12b referem-se à altura da vegetação de 15m que é característica na **zona de foz** da sub-bacia das Posses, com estrato arbóreo pouco denso, sendo as espécies que apresentaram maior densidade a Embira de Sapo (*Lonchocarpus campestris*) seguida do Angico (*Anadenanthera colubrina*) e da *Eugenia verrugosa*. No caso dos cenários 13a até 18b estudaram-se as condições predominantes na **zona mediana** da sub-bacia das Posses, caracterizada por árvores de porte em volta dos 20 m, sendo o estrato arbóreo bastante denso, e as espécies que apresentaram a maior densidade foi o Açoita-Cavalo (*Luehea grandiflora*), seguida da Ainhuva (*Nactandra lanceolata*) e do Bico de Pato (*Machaerium aculeatum*). O Quadro 1 resume as características e os resultados dos fluxos de SEH obtidos em cada cenário.

| Cenários | Método de cálculo da Evapotranspiração |       | Descrição do cenário |        |                      |                                  | Serviço de água |            |            |
|----------|--|-------|----------------------|--------|----------------------|----------------------------------|-----------------|------------|------------|
|          |  |       | Textura Solo         |        | Altura vegetação (m) | Profundidade lençol freático (m) | Superficial     | Infiltrada | Armazenada |
|          | T*                                     | P-M** | Franco               | Argila |                      |                                  |                 |            |            |
| 1 a      |  |       |                      |        | 10                   | 5                                | 0,8             | 5864,0     | 6103,0     |
| 1 b      |  |       |                      |        | 10                   | 5                                | 0,8             | 6202,0     | 6103,0     |
| 2 a      |  |       |                      |        | 10                   | 5                                | 0,8             | 5905,0     | 6485,0     |
| 2 b      |  |       |                      |        | 10                   | 5                                | 0,8             | 6243,0     | 6485,0     |
| 3 a      |  |       |                      |        | 10                   | 150                              | 137,0           | 1045,0     | 14965,0    |
| 3 b      |  |       |                      |        | 10                   | 150                              | 138,0           | 851,0      | 15311,0    |
| 4 a      |  |       |                      |        | 10                   | 150                              | 146,0           | 1430,0     | 15921,0    |
| 4 b      |  |       |                      |        | 10                   | 150                              | 147,0           | 1055,0     | 16447,0    |
| 5 a      |  |       |                      |        | 10                   | 25                               | 0,8             | 1537,0     | 13906,0    |
| 5 b      |  |       |                      |        | 10                   | 25                               | 0,8             | 1413,0     | 14324,0    |
| 6 a      |  |       |                      |        | 10                   | 25                               | 0,8             | 1738,0     | 14692,0    |
| 6 b      |  |       |                      |        | 10                   | 25                               | 0,8             | 1721,0     | 15046,0    |
| 7 a      |  |       |                      |        | 15                   | 5                                | 0,4             | 5883,0     | 6103,0     |
| 7 b      |  |       |                      |        | 15                   | 5                                | 0,4             | 6167,0     | 6103,0     |
| 8 a      |  |       |                      |        | 15                   | 5                                | 0,4             | 5920,0     | 6485,0     |
| 8 b      |  |       |                      |        | 15                   | 5                                | 0,4             | 6208,0     | 6485,0     |
| 9 a      |  |       |                      |        | 15                   | 150                              | 137,0           | 1036,0     | 14963,0    |
| 9 b      |  |       |                      |        | 15                   | 150                              | 138,0           | 911,0      | 15222,0    |
| 10 a     |  |       |                      |        | 15                   | 150                              | 146,0           | 1395,0     | 15967,0    |
| 10 b     |  |       |                      |        | 15                   | 150                              | 146,0           | 1116,0     | 16374,0    |
| 11 a     |  |       |                      |        | 15                   | 25                               | 0,4             | 1556,0     | 13906,0    |
| 11 b     |  |       |                      |        | 15                   | 25                               | 0,4             | 1456,0     | 14247,0    |
| 12 a     |  |       |                      |        | 15                   | 25                               | 0,4             | 1757,0     | 14692,0    |
| 12 b     |  |       |                      |        | 15                   | 25                               | 0,4             | 1768,0     | 14966,0    |
| 13 a     |  |       |                      |        | 20                   | 5                                | 0,4             | 5883,0     | 6103,0     |
| 13 b     |  |       |                      |        | 20                   | 5                                | 0,4             | 6092,0     | 6103,0     |
| 14 a     |  |       |                      |        | 20                   | 5                                | 0,4             | 5924,0     | 6485,0     |
| 14 b     |  |       |                      |        | 20                   | 5                                | 0,4             | 6133,0     | 6485,0     |
| 15 a     |  |       |                      |        | 20                   | 150                              | 137,0           | 1036,0     | 14963,0    |
| 15 b     |  |       |                      |        | 20                   | 150                              | 137,0           | 956,0      | 15147,0    |
| 16 a     |  |       |                      |        | 20                   | 150                              | 146,0           | 1395,0     | 15967,0    |
| 16 b     |  |       |                      |        | 20                   | 150                              | 146,0           | 1201,0     | 16263,0    |
| 17 a     |  |       |                      |        | 20                   | 25                               | 0,4             | 1556,0     | 13906,0    |
| 17 b     |  |       |                      |        | 20                   | 25                               | 0,4             | 1469,0     | 14191,0    |
| 18 a     |  |       |                      |        | 20                   | 25                               | 0,4             | 1757,0     | 14692,0    |
| 18 b     |  |       |                      |        | 20                   | 25                               | 0,4             | 1793,0     | 14865,0    |

**Quadro 1.** Quantidades de água superficial, infiltrada e armazenada obtida em cada cenário estudado (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>).

\*Método de cálculo da evapotranspiração Thornthwaite

\*\*Método de cálculo da evapotranspiração Penman-Monteith

Pode-se notar que quando a altura da vegetação e a profundidade das águas subterrâneas aumentam, também aumenta a quantidade de água infiltrada. Isto provavelmente deve-se à capacidade de exploração do perfil do solo pela vegetação de maior altura, facilitando assim a infiltração nas camadas mais profundas do solo.

Em relação à água armazenada, tal parâmetro não é influenciado pelas águas subterrâneas quando se encontram a 5m de profundidade, muito provavelmente pelo fato que existirá um aporte destas águas, por ascensão capilar. O balanço hídrico no solo é garantido pela ascensão capilar e pela extração de água pelas raízes nas zonas mais profundas do perfil. Para profundidades maiores, não é significativo o aporte do recurso hídrico na demanda das culturas, tendo assim maior volume de água armazenado na zona saturada, muito provavelmente devido ao fato das raízes não conseguir explorar o perfil até essas profundidades. Isto é evidente para ambos os métodos utilizados para avaliar a

evapotranspiração, ainda que o método de Penman-Monteith mostre-se ser mais sensível na determinação da evapotranspiração.

Quando as águas subterrâneas encontram-se entre os 5m e 25m de profundidade, a zona não saturada transforma-se num volume interessante para o armazenamento das águas, e assim a ser considerada como uma zona importante na preservação do recurso hídrico. O conhecimento das profundidades das águas subterrâneas em cada propriedade, na zona de estudo, poderá permitir definir quais são os locais mais eficientes para a conservação (armazenamento da água no meio poroso) do recurso hídrico.

Em relação às texturas de solo avaliadas, as argilas pelas características de maior porosidade, mostram-se com maior capacidade de armazenar água que os solos francos. Os solos francos porem, pelo maior tamanho dos poros, mostram-se com maior capacidade de permitir a infiltração profunda das águas provenientes da precipitação.

Os resultados obtidos com respeito à capacidade de infiltração e armazenamento de água dessas texturas de solo, coincidem com os resultados observados por Lima et al. (2008) que realizaram um trabalho para interpretar atributos pedológicos e avaliar a potencialidade de recarga de água, na sub-bacia das Posses. No referido trabalho

foram usados três critérios básicos: classe de solo, tipo de horizonte A textural, e fase de relevo.

As classes de solos encontradas no trabalho, com seus respectivos tipos de horizonte A e fases de relevo, bem como o potencial de cada classe em relação ao potencial de recarga de água estão descritas no **Quadro 2**.

| Classes de solo   | Horizonte A | Relevo         | Potencial de recarga |
|-------------------|-------------|----------------|----------------------|
| Neossolo Litólico | Moderado    | Montanhoso     | (1x2x1) Baixo        |
| Neossolo Litólico | Húmico      | Suave ondulado | (1x4x3) Médio        |
| Neossolo Flúvico  | Moderado    | Plano          | (4x2x3) Alto         |
| Cambissolo Hápl   | Moderado    | Forte ondulado | (1x2x2) Baixo        |
| Cambissolo Hápl   | Moderado    | Ondulado       | (1x2x2) Baixo        |
| Cambissolo Húmico | Húmico      | Ondulado       | (2x4x2) Alto         |
| Argissolo         | Moderado    | Ondulado       | (4x2x2) Alto         |
| Argissolo         | Moderado    | Forte ondulado | (4x2x2) Alto         |

**Quadro 2.** Classes de solos, tipos de horizonte A, fases de relevo e potencial de recarga da sub-bacia das Posses em Extrema, MG.

Fonte: Lima et al. (2008)

O estudo de Lima et al (2008) conclui que os *Neossolos Litólicos* em relevo montanhoso apresentaram baixo potencial de recarga de água mesmo em situações diferentes de paisagem. Entretanto, os *Neossolos Flúvicos* mostraram elevado potencial de recarga de água por estarem presentes em posição privilegiada na paisagem, próximos a rede de drenagem e possuem relevo plano a suave a ondulado. Por último os solos do tipo *Cambissolos Háplicos* apresentaram baixo potencial de recarga de água devido à maior declividade, pequena profundidade e baixa permeabilidade, sendo considerados para a sub-bacia das Posses como os principais responsáveis pelo baixo potencial de recarga.

Os resultados obtidos por Lima et al. (2008), para as classes de solo existentes na sub-bacia das Posses e seu comportamento em relação à recarga de água são condizentes com os estudos de Ranzini et al. (2004), sobre *Cambissolos*, em relevo acidentado e sub-bacias da mata atlântica que apresentam baixo potencial de recarga, pois o potencial gravitacional da água nos solos mais declivosos é bem maior em relação às áreas mais baixas, aumentando o escoamento sub-superficial reduzindo assim, a infiltração da água em maiores profundidades.

Uma das alternativas para minimizar os efeitos do baixo potencial de recarga de água é a manutenção de uma eficiente cobertura vegetal. Uma vez que essa cobertura vegetal esteja mantida, ocorre o retardamento da movimentação de água em direção aos cursos, reduzindo o escoamento superficial, produzindo, até mesmo, um efeito tampão na capacidade de retenção de água pelos solos em períodos de maior concentração de chuvas (ZOLÍN, 2010; CARDOSO et al., 2006).

No que se refere ao parâmetro de precipitação, deve-se ressaltar, que para esta sub-bacia, o regime pluviométrico não é um fator limitante devido à elevada precipitação

média anual (1.477 mm) com chuvas bem distribuídas ao longo do ano.

Assim a formulação de diversos cenários permite baseado nos parâmetros considerados no MOVA selecionar os locais com maior potencial para a conservação do recurso hídrico.

Gomes et al. (2003) destacam que os mananciais brasileiros, basicamente, são dependentes de águas superficiais que decorrem, essencialmente, de manejo das bacias hidrográficas, que são as captadoras e distribuidoras da água de chuva que chega até elas.

Segundo Gomes et al. (2003), a gestão dos recursos hídricos pode ser separada em duas vertentes: i) a do Manejo de Bacias, que trata das inter-relações da água de chuva com os vários componentes da superfície, em especial o escoamento e infiltração e a erosão; e ii) aquela que considera e analisa a bacia hidrográfica como um imenso reservatório de água, que vai sendo liberada aos cursos d'água de maneira regular ao longo do ano.

Esses mesmos autores destacam que a primeira abordagem, em termos dos pagamentos por SEH, é muito reduzida, pois trata apenas daquilo que chega instantaneamente ao leito do rio, e que a segunda vertente é muito mais interessante para a sociedade. Ao se falar de remunerar o proprietário rural que implementa medidas conservacionistas utiliza-se apenas pela primeira abordagem, quando a segunda é muito mais essencial para a sociedade (GOMES et al., 2003).

Sendo assim, é cada vez mais urgente, portanto, mensurar, avaliar e monitorar o que acontece com a água de precipitação que efetivamente contribui com as águas subterrâneas, desenvolvendo metodologia eficiente de mensuração da "produção de água", que possibilite a proposta de modelos e formas de remuneração ao proprietário rural mais apropriada.

Da mesma maneira Poggiani (1982), alerta para a necessidade de pesquisas prioritárias sobre infiltração da

água e sua percolação, sobre o armazenamento da água e sobre os reflexos das áreas cultivadas sobre a quantidade e qualidade da “água produzida”. O autor ressalta também a necessidade de se acompanhar esses estudos na evolução de algumas bacias hidrográficas experimentais, analisando as conseqüências do seu manejo sobre o regime hídrico. As considerações anteriores evidenciam a importância do desenvolvimento de modelos como o formulado neste trabalho.

### CONCLUSÕES

Usar um modelo baseado em processos, para simular as funções ecossistêmicas que geram SEH apresenta várias vantagens; uma delas é que o modelo permite efetuar projeções para situações onde não existe monitoramento permanente de dados. Outra vantagem é que a construção do modelo através das etapas de conceptualização, formalização e simulação, favoreceu o entendimento dos processos hidrológicos que geram serviços ecossistêmicos hídricos. Esse entendimento possibilitou analisar de que forma a oferta desses serviços depende da combinação de um conjunto de variáveis biofísicas, que podem ser medidas e avaliadas para diferentes locais.

Os modelos baseados em processos utilizam equações que descrevem as relações entre as variáveis de entrada e saída. No desenvolvimento teórico do MOVA tem-se utilizado métodos analíticos que permitem calcular algumas dessas variáveis. Devido à escassez de dados com relação ao local de estudo, em certos casos, alguns desses parâmetros, a opção de se poder calcular analiticamente alguns dos processos mostrou-se muito conveniente. O MOVA embasa-se no modelo hidrológico de balanço de água.

### 3. REFERÊNCIAS

CARDOSO, C.A.; DIAS, H.C.T.; MARTINS, S. V.; SOARES, C. P. B. Caracterização hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 249-256, 2006.

CHRISTIANSEN, J.E. Pan evaporation and evapotranspiration from climatic data. **Journal Irrigation and Drainage Division**, New York, n. 94, p. 243-265, 1968.

FITZ, H.C.; DE BELLEVEU, E.; COSTANZA, R.; BOUMANS, R.; MAXWELL, T.; WAINGNER, L.; SKLAR, F. Development of a general ecosystem model for range of scales and ecosystems. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 88, n. 1/3, p. 263-295, 1996.

GOMES, M.A.; BORGES, S.J.; FRANCO, I.C.; CORRÊA, J.L.P. Tecnologias apropriadas à revitalização da capacidade de produção de água de mananciais. In: ASSEMAE, 33., 2003, Santo André, **Anais...** Santo André, 2003. 1 CD-ROM.

LIMA, G.C.; DE FREITAS, D.A.F.; SILVA, M.L.N.; OLIVEIRA, A.H.; DA SILVA, M.A.; PEREIRA, P.H.; DOS SANTOS, D.G.; VEIGA, F. Potencialidades de uso

do solo e recarga de água na sub-bacia das Posses, Extrema, MG. In: CONGRESSO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UFLA, 2008, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA, 2008. 1 CD-ROM.

NARDELLI, A.M.B.; GRIFFITH, J.J. **Introdução ao sistema de gestão ambiental**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Núcleo de Gestão Integrada, 2000. 60 p. (Apostila de curso).

POGGIANI, F. O reflorestamento no Nordeste Brasileiro: conseqüências ecológicas. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 3, n. 10, p. 85-98, 1982.

RANZINI, M. **Balanço hídrico, ciclagem geoquímica de nutrientes e perdas de solo em duas microbacias reflorestadas com *Eucalyptus saligna* Smith, no vale do Paraíba, SP**. 1990. 99 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

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

VOINOV, A.; FITZ, C.; BOUMANS, M.; ROELOF, J.; COSTANZA, R. Modular ecosystem modeling. In: COSTANZA, R.; VOINOV, A. (Ed.). **Landscape simulation modeling: a spatially explicit, dynamic approach**. New York: Springer, 2004. p. 43-76.

ZOLÍN, C. A. **Análise e otimização de Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA) utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG): o caso do município de Extrema, MG**. 2010. 128 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

### 4. AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”-Universidade de São Paulo “ESALQ/USP e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP.



[www.dinamica-de-sistemas.com](http://www.dinamica-de-sistemas.com)

## Libros

## Cursos Online



[Ejercicios](#)



[Curso Básico Intensivo en Dinámica de Sistemas](#)



[Avanzado](#)



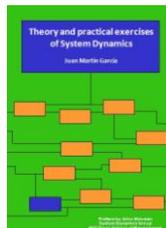
[Curso Superior en creación de modelos de simulación](#)



[Conceptos](#)



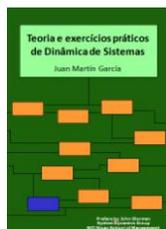
[Modelos de simulación en ecología y medioambiente](#)



[English](#)



[Planificación de empresas con modelos de simulación](#)



[Português](#)



[System Thinking aplicado al Project Management](#)