

# SITUAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ UTILIZANDO MODELO DESENVOLVIDO EM DINÂMICA DE SISTEMAS

RODRIGO M. SÁNCHEZ-ROMÁN<sup>1</sup>, MARCOS V. FOLEGATTI<sup>2</sup>,  
ALBA M. G. ORELLANA-GONZÁLEZ<sup>3</sup>

**RESUMO:** Utilizou-se modelo desenvolvido em dinâmica de sistemas, especificamente para as Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (BH-PCJ), com cinco simulações para 50 anos de horizonte, como ferramenta para auxiliar na gestão dos recursos hídricos. O modelo estimou as ofertas e demandas de água, e a geração de águas residuárias dos diversos consumidores existentes nas BH-PCJ. Realizou-se simulação utilizando-se das taxas de consumo e de oferta existentes em 2004, e as precipitações com os valores médios constantes. Sob essas premissas, foi encontrado que as demandas de água aumentarão cerca de 76%, que aproximadamente 39% do volume de água disponível terá origem no reúso das águas residuárias, a carga contaminante aumentará em 91%. O Índice de Falkenmark mudará de 1.403 m<sup>3</sup> habitante<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, em 2004, para 734 m<sup>3</sup> hab<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> em 2054; e o Índice de Sustentabilidade de 0,44 para 0,20. Foram explorados outros quatro cenários: com fator de mudanças nas precipitações anuais de 90 e 110%; considerando vazão ecológica equivalente a 30% da vazão média diária, e sem nenhuma mudança nas taxas dos outros fatores, somente na vazão ecológica e no consumo domiciliar de água. Todos eles mostraram tendência à futura crise nos recursos hídricos nas BH-PCJ.

**PALAVRAS-CHAVE:** recursos hídricos, modelagem, simulação.

## WATER RESOURCES SITUATION AT PIRACICABA, CAPIVARI AND JUNDIAÍ WATERSHEDS USING A DYNAMIC SYSTEMS MODEL

**ABSTRACT:** Using a dynamic systems model specifically developed for Piracicaba, Capivari and Jundiaí River Water Basins (BH-PCJ) as a tool to help to analyze water resources management alternatives for policy makers and decision takers, five simulations for 50 years timeframe were performed. The model estimates water supply and demand, as well as wastewater generation from the consumers at BH-PCJ. A run was performed using mean precipitation value constant, and keeping the actual water supply and demand rates, the “business as usual” scenario. Under these considerations, it is expected an increment of about ~76% on water demand, that ~39% of available water volume will come from wastewater reuse, and that waste load increases to ~91%. Falkenmark Index will change from 1,403 m<sup>3</sup> person<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> in 2004, to 734 m<sup>3</sup> P<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> by 2054, and the Sustainability Index from 0.44 to 0.20. Another four simulations were performed by affecting the annual precipitation by 90 and 110%; considering an ecological flow equal to 30% of the mean daily flow; and keeping the same rates for all other factors except for ecological flow and household water consumption. All of them showed a tendency to a water crisis in the near future at BH-PCJ.

**KEYWORDS:** water resources, modeling, simulation.

<sup>1</sup> Eng<sup>o</sup> em Irrigação e Drenagem, Pós-Doutorando no Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Av. Pádua Dias 11, Piracicaba - SP, Fone: (0XX19) 3447-8569, Fax: (0XX19) 3435-8571, Bolsista CT-HIDRO PDJ/CNPq, rmsroman@esalq.usp.br

<sup>2</sup> Eng<sup>o</sup> Agrônomo, Professor Titular, Departamento de Engenharia Rural, ESALQ/USP, Piracicaba - SP, mvfolega@esalq.usp.br

<sup>3</sup> Economista, Bolsista da FAPESP, Doutoranda no Departamento de Engenharia Rural, ESALQ/USP, Piracicaba - SP, gonzalez@esalq.usp.br

Recebido pelo Conselho Editorial em: 12-2-2008

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 23-9-2009

## INTRODU O

A problemática da água tem diferentes dimensões: a) a popula o rural tem dificuldade de obten o de água em volume e em qualidade, enquanto a popula o urbana recebe água tratada pelas empresas de saneamento; b) o nível de renda das pessoas influencia na oportunidade de uso desse recurso; c) a escassez da água sofre interferência quanto   escala de consumo; d) a disponibilidade do recurso hídrico manifesta-se de forma qualitativa e quantitativa, tanto no espaço quanto no tempo em uma mesma região; e) a água   um recurso essencial para a vida. São muitas as perspectivas, interesses, percep es e alternativas de uso dos recursos hídricos, dada as diversidades de usuários, situa es, rendas, prioridades e localiza es.

A importância na gestão da água está diretamente ligada com a questão da sustentabilidade ambiental, sendo uma fun o do desenvolvimento dos diversos componentes políticos, econ micos e sociais atuantes dentro da bacia hidrográfica, e da sensibilidade desses componentes com o tema da gestão integrada dos recursos hídricos. O aumento na renda das popula es urbana e rural possibilitará melhoria no padrão de vida e, conseqüentemente, a demanda de água crescer . Adicionalmente, o crescimento natural da popula o implica aumento substancial na demanda de água e de alimentos, e na contamina o dos corpos de  gua. O foco da análise das simula es realizadas   o setor agropecuário, por ser o responsável pela produ o de alimentos.

Tudo isso leva ao seguinte questionamento: até onde   possível manter o crescimento das atividades produtivas nos diversos setores da economia e ainda satisfazer as demandas crescentes da popula o sem prejudicar a sustentabilidade dos recursos hídricos. Esse questionamento deverá ser respondido através do Modelo de Gestão de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (MRH-PCJ). Essas bacias têm sido emblemáticas e precursoras das políticas do Plano Nacional de Gestão de Recursos Hídricos no atual Sistema Nacional de Recursos Hídricos do Brasil, que, com o apoio da Agência Nacional de águas e em articula o com os Comit s de Bacia Hidrográfica (CBH) do PCJ, instituíram o Plano de Bacias e a cobrança pelo uso dos recursos hídricos de domínio da União.

### Recursos hídricos e enfoque sist mico

Existe uma rela o direta entre a gestão de recursos hídricos e o enfoque sist mico, uma vez que os fatores que afetam os recursos hídricos são sist micos e não lineares (OLHSSON & TURTON, 1999). A teoria dos sistemas   a base desses estudos. O princípio elementar do estudo sist mico   o da conectividade. Entende-se sistema como um conjunto de elementos com liga es entre si e o ambiente. Cada sistema compõe-se de subsistemas, que fazem parte de um conjunto maior, sendo cada subsistema independente e ao mesmo tempo aberto e inter-relacionado com outros subsistemas (SANTOS, 1982).

Utiliza-se na gestão dos recursos hídricos o enfoque sist mico na análise e no seu aperfei amento. As unidades que compõem o sistema de recursos hídricos de uma bacia são analisadas como um sistema dinâmico e complexo dentro dos limites físicos de uma determinada bacia. Na bacia, podem coexistir atividades múltiplas e explora es que interagem com insumos, tais como: adubos, defensivos e gera o de produtos agrícolas, energia, resíduos e contaminantes de origem agrícolas, industriais, urbanos, etc. (COSTA, 1993). Mas, a sustentabilidade dos recursos hídricos deve estar vinculada   capacidade dos usuários desses recursos de conservarem ou aumentarem sua qualidade de vida, mantendo e garantindo esses recursos para as próximas gera es.

### Dinâmica de sistemas: simula o e análise

A metodologia da Dinâmica de Sistemas (DS)   fundamentada e derivada da Teoria de Controle de Servomecanismos, que foi desenvolvida por FORRESTER (1961). O princípio fundamental dessa metodologia   que todo comportamento dinâmico   consequência da estrutura do sistema (POWERSIM, 1996). Esse caracteriza-se por apresentar mudanças ao longo do tempo.

Podem ser incluídos sistemas econômicos, biológicos, sociais, psicológicos, gerenciais, ecológicos e todos aqueles que manifestam processos de retroalimentação.

Segundo RICHARDSON (1991), as principais características da metodologia de DS são: a) definição dos problemas dinamicamente; b) enfoque nas características intrínsecas do sistema; c) conceituação do sistema real por meio da interconexão contínua de círculos de retroalimentação e de causalidade; d) identificação de estoques e fluxos de entrada e saída; e) formulação de um modelo comportamental, capaz de reproduzir a dinâmica do problema; f) entendimento e esclarecimento derivado de mudanças políticas efetuadas no modelo e seus consequentes resultados; e g) implementação de mudanças e novas políticas com base nesses entendimentos.

Os modelos de simulação dinâmica são descrições abstratas do mundo real que permitem representar problemas complexos caracterizados por sua dinâmica não linear, relações de retroalimentação e defasagens no tempo e no espaço (WIAZOWSKI et al., 1999). Um modelo de simulação dinâmica deve capturar somente os fatores essenciais de um sistema real e deve abstrair-se dos demais fatores. O uso principal dos modelos é o de comunicar um ponto de vista do mundo que procura aproximar-se da realidade, tentando compreender um problema específico e visando a prever o seu comportamento (PÉREZ MAQUEO et al., 2006). O usuário deve estar sempre consciente das limitações do modelo que está utilizando.

Assim, baseados nas experiências em outros países e outras bacias hidrográficas, pretende-se avaliar o estágio de desenvolvimento da BH-PCJ e analisar os prognósticos estimados pelo MRH-PCJ.

## MATERIAL E MÉTODOS

O pensamento sistêmico envolve mudanças de paradigmas sobre como as coisas funcionam. Esta metodologia facilita a visualização das inter-relações entre os elementos dos sistemas, identifica soluções para os problemas em longo prazo, procura pontos onde pequenas mudanças ocasionarão efeitos positivos ao sistema e evitam soluções que tratam apenas dos sintomas dos problemas (POWERSIM, 1996). A utilidade dos modelos decorre da impossibilidade de realizar experimentos com o sistema real.

O MRH-PCJ foi desenvolvido na plataforma STELLA 9.0. Com esse *software*, interconectaram-se os elementos ambientais, físicos, sociais e econômicos que explicam a dinâmica de comportamento, tanto da oferta como da demanda de recursos hídricos, bem como a geração de águas residuárias dos diversos usuários existentes nas BH-PCJ. O modelo é uma ferramenta para auxiliar os gestores (pessoas responsáveis pelas formulações de políticas e tomadas de decisões) quanto às diversas alternativas para a gestão dos recursos hídricos dentro do CBH-PCJ.

Realizaram-se cinco simulações com horizonte de tempo de 50 anos (Tabela 1). Considerou-se o volume das precipitações anuais iguais ao valor médio de  $1.460 \text{ mm ano}^{-1}$  (IRRIGART, 2004), no cenário “*Business as Usual*” (BaU) ou afetadas por mudanças climáticas em 90 e 110% desse valor, nos cenários que têm a ver com mudanças climáticas, considerando vazão ecológica equivalente a 1/40 da vazão básica. Finalmente, nos últimos dois cenários, com vazão ecológica igual a  $19,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (30% da vazão básica) e sem nenhuma mudança nas taxas das outras variáveis, somente no volume consumido nas residências urbanas e rurais (Figura 1).

TABELA 1. Cenários avaliados utilizando o Modelo de Gestão de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (MRH-PCJ) num horizonte de 50 anos. **Evaluated scenarios using the Water Resources Model for the Piracicaba, Capivari, and Jundiá River Basins for a 50-year time frame.**

Cenário	Classe	Descrio
1	BaU	Business-as-usual - sem nenhuma mudança
2	Câmbio climático	Diminuio em 10% das precipitaes
3	Câmbio climático	Aumento em 10% das precipitaes
4	BaU+ $Q_{ecol}=19,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	BaU + vazão ecológica equivalente a 30% da vazão básica do rio
5	Combinao de condies	Cenário 4 + mudanças no consumo doméstico

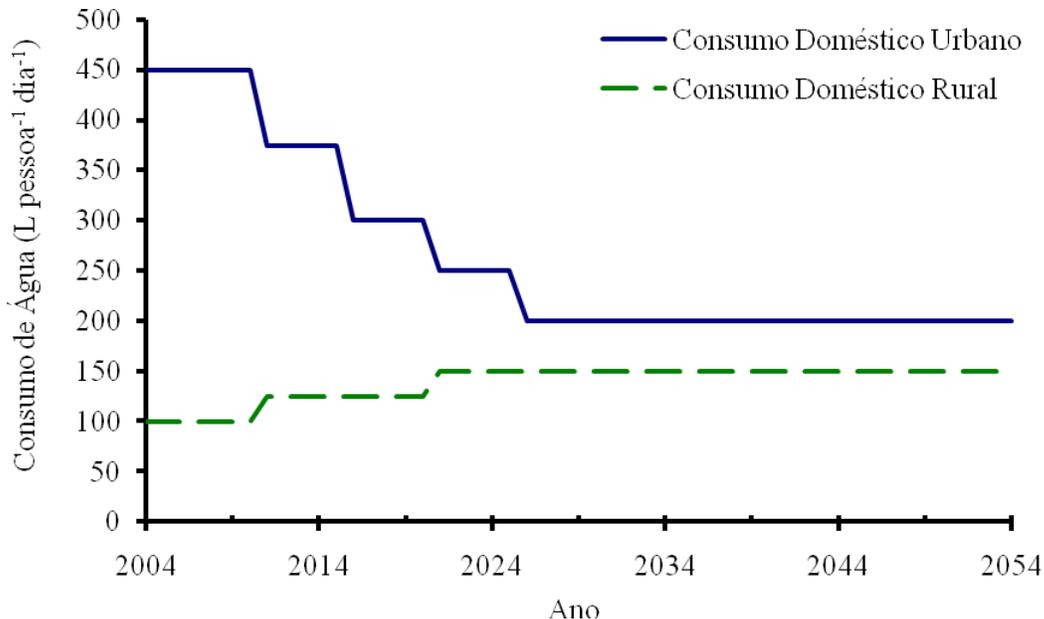


FIGURA 1. Consumo de água nos domicílios urbanos e rurais utilizados no cenário 5. **Urban and rural water consumption demand considered for scenario 5.**

### Demanda de água dos diversos setores

A definio dos parâmetros das demandas de água tem como base o estudo *in situ* dos consumos de água pelos principais usuários da região, de estudos realizados e apresentados nos diversos Planos Estaduais, de fontes de informao secundária das agências vinculadas aos setores produtivos, e das instituies que administram o recurso hídrico (PERH, 2004; PERH, 2005; SIRGH, 2007; SABESP, 2007; DAEE, 2007; IEA, 2007; UNICA, 2007).

Para ser efetiva e apurada, a modelagem da agricultura irrigada e da criao de animais precisa ter o conhecimento detalhado das condies de uso dos recursos hídricos, que, por sua vez, depende do cadastro dos usuários para todas as atividades e do uso que os mesmos fazem da gua. Assim, devem ser levantados dados nas sub-bacias no tocante ao cadastro de irrigantes,  qualidade das águas superficiais e  vazão correspondente ao  $Q_7^{10}$ . A existência de lacunas na informao cria algumas incertezas nos consumos e nos índices usados durante a simulao.

No caso da vazão ecológica, foram revisadas diversas metodologias para definir o valor a ser usado na simulao. Optou-se por usar, no cenário BaU, a que proporcionava a menor vazão ecológica, já que o processo para encontrar um valor que permita melhorar o habitat do rio compete ao CBH-PCJ. Aplicando o método utilizado na França para esquemas existentes (SOUCHON &



### Estrutura do sistema de recursos hídricos

Na Figura 3, representa-se a estrutura do sistema dos recursos hídricos a modelar, para analisar a sustentabilidade do recurso água na região de estudo, em que as variáveis que representam a oferta de água são as águas superficiais e subterrâneas, que garantem o estoque de água no MRH-PCJ. A demanda de água está constituída pelos seguintes requerimentos: popula o, ambiente, agroindústria, pecuária, indústria e agricultura.

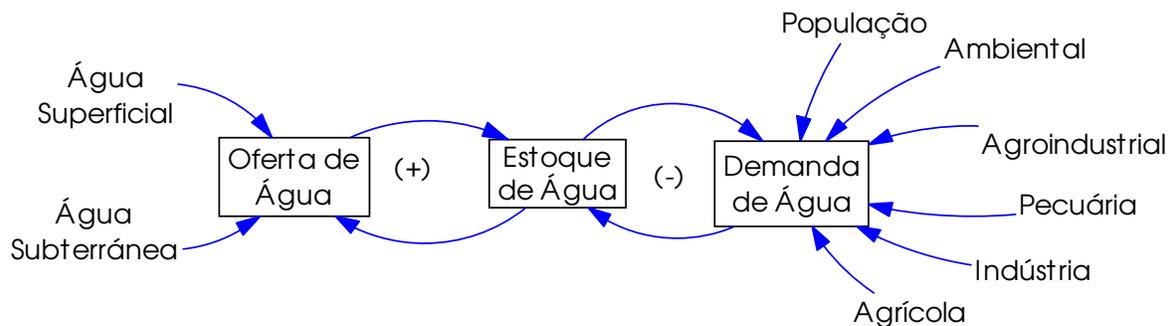


FIGURA 3. Diagrama causal do sistema de recursos hídricos na bacia hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá. **Causal diagram for the Piracicaba, Capivari and Jundiá water resources system.**

### Fontes de informa es e dados

Muitos dos dados utilizados para desenvolver este trabalho são de ordem primária, originados de entrevistas e de coleta de informa es de pessoas especializadas no tema e organiza es vinculadas   agricultura nos municípios. Outra parte dos dados   de natureza secundária, proveniente de arquivos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, do Instituto de Pesquisa Econ mica Aplicada, das Prefeituras dos 64 municípios envolvidos, do CBH-PCJ, da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (estadual e municipal), do Sistema de Informa es para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo, do Departamento de águas e Energia Elétrica e da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo. Também utilizaram-se estima es m dias de requerimentos de água para diferentes culturas agrícolas e espécies animais e informa es meteorológicas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e do Departamento Nacional de Meteorologia.

### Modelo de Gestão dos Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (MRH-PCJ)

O MRH-PCJ   um modelo de simula o explícito do sistema de Recursos Hídricos das BH-PCJ (SÁNCHEZ-ROMÁN & FOLEGATTI, 2008). A equa o do balanço hídrico (1) e a equa o da demanda total na BH-PCJ (2), expressas como equa o diferencial no MRH-PCJ, são:

$$\text{BalanHidric}(t) = \text{BalanHidric}(t - dt) + (\text{OFERTA} - \text{Sa da\_ gua\_BHPCJ} - \text{Demanda\_Total\_PCJ}) dt \quad (1)$$

$$\text{Demanda\_Total\_PCJ} = \text{VTRAG} + \text{VTRAI} + \text{VTRamb} + \text{VTRInd} + \text{VTRpop} + \text{VTRPEC} + (\text{Demanda\_RMSP } 86400 \text{ } 365) \quad (2)$$

em que,

BalanHidric( $t$ ) - balanço hídrico no ano  $t$ ,  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$ ;

OFERTA - oferta de água no ano  $t$ ,  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$ ;

Sa da\_ gua\_BHPCJ - volume de água descarregado   jusante da Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá,  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$ ;

Demanda\_Total\_PCJ - volume de água total demandado pelas diversas atividades econômicas na Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí,  $m^3 \text{ ano}^{-1}$ ;

VTRAG - volume total de água requerido pela agricultura,  $m^3 \text{ ano}^{-1}$ ;

VTRAI - volume total de água requerido pela agroindústria,  $m^3 \text{ ano}^{-1}$ ;

VTRamb - volume total de água para garantir a vazão ecológica,  $m^3 \text{ ano}^{-1}$ ;

VTRInd - volume total de água requerido pela indústria,  $m^3 \text{ ano}^{-1}$ ;

VTRpop - volume total de água requerido pelas populações rural e urbana,  $m^3 \text{ ano}^{-1}$ ;

VTRPEC - volume total de água requerido pela pecuária,  $m^3 \text{ ano}^{-1}$ , e

Demanda\_RMSP - volume total de água requerido pela Região Metropolitana de São Paulo,  $m^3 \text{ ano}^{-1}$ .

Dentro do MRH-PCJ, existem 11 setores para modelar o comportamento dos diversos componentes dentro da BH-PCJ. Esses setores estão divididos em três grupos principais: demanda, oferta, cálculos específicos. Dentro do setor das demandas, temos: agricultura, pecuária, agroindústria, ambiental, população e indústria. No setor da oferta, tem-se a oferta de água, e, no setor de cálculos, têm-se: volume de águas residuais retornadas, volume total requerido na BH-PCJ, receitas geradas pela outorga e equivalente populacional.

Na Figura 4, representa-se a estrutura do sistema de recursos hídricos vinculados à demanda de água do setor agrícola na região de estudo e proposta no MRH-PCJ.

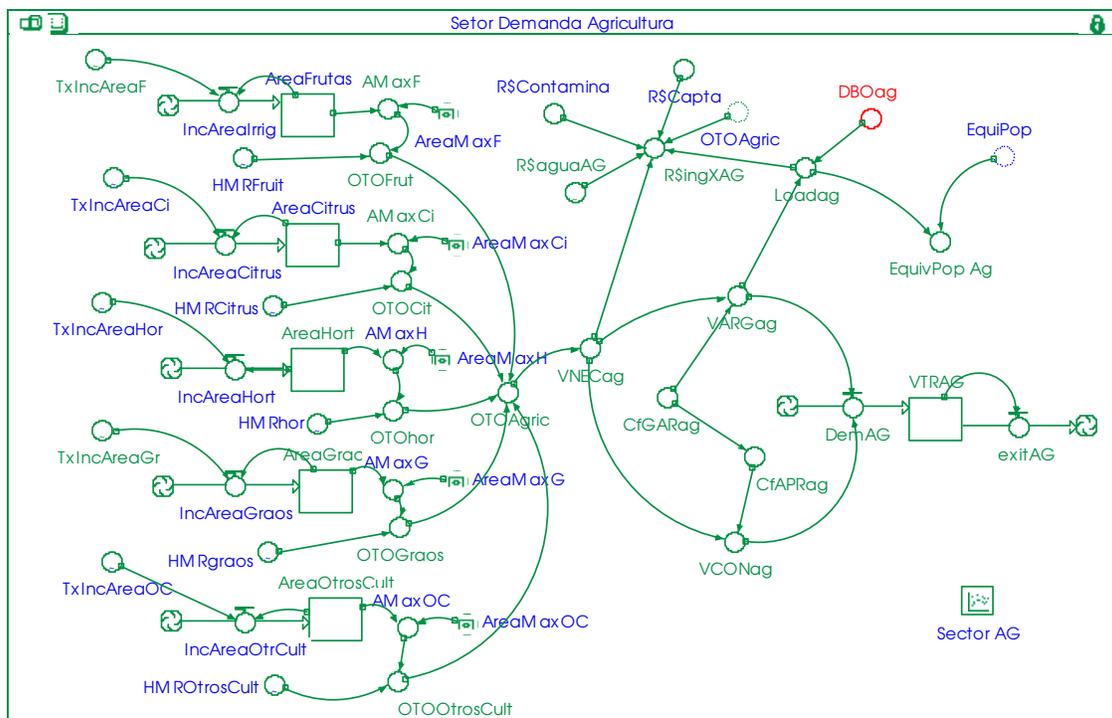


FIGURA 4. Setor demanda de água da Agricultura irrigada no Modelo de Gestão dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí (MRH-PCJ). **Agricultural Sector represented by the Water Resources Model for the Piracicaba, Capivari and Jundiáí River Basins.**

A variável que representa a dotação de irrigação é  $HMR_{xi}$  ( $L s^{-1} ha^{-1}$ ), as áreas por cultivo são  $Area_{xi}$  (ha), e o volume total requerido pela agricultura é  $VTRAG_i$  ( $m^3 \text{ ano}^{-1}$ ); em que,  $i$  representa cada ano analisado, e  $x$  o valor particular da variável (cultivo) para cada ano. O volume de água

necessário leva em considerao a demanda líquida do cultivo mais as ineficiências dos sistemas de irrigao. Está sendo considerado, em cinco grupos, o total de 60 cultivos produzidos na BH-PCJ.

Na Figura 5, representa-se a estrutura do sistema de recursos hídricos vinculados  oferta de água na região de estudo e proposta no MRH-PCJ.

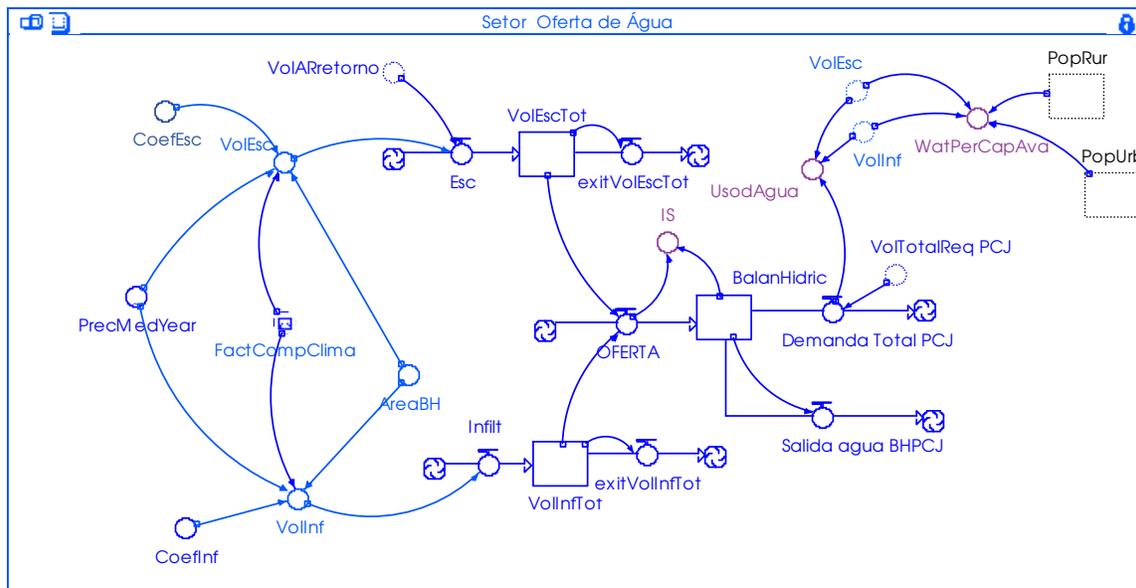


FIGURA 5. Setor oferta de água no Modelo de Gestão dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (MRH-PCJ). **Water Supply Sector represented by the Water Resources Model for the Piracicaba, Capivari and Jundiá River Basins.**

A variável que representa a oferta de água na BH-PCJ  OFERTA ( $10^6 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1} = \text{Mm}^3 \text{ ano}^{-1}$ ). Os volumes aportados pela chuva são o volume escoado (VolEsc) e o infiltrado (VolInf). Adicionalmente, as águas de retorno (VolARretorno) formam parte da OFERTA, todos em  $\text{Mm}^3 \text{ ano}^{-1}$ . O balanço hídrico (BalanHidric)  realizado, restando a Demanda Total PCJ e as guas que saem  jusante da BH-PCJ (Saida\_gua\_BHPCJ). Com essas informaçoes, são determinados o ndice de sustentabilidade (IS), o volume de água disponível *per capita* anual (WatPerCapAva) e a relao entre o consumo anual pelos diversos demandantes e o volume de água disponível anual (Usodgua).

O MRH-PCJ considera que a precipitao acontece uniformemente em toda a bacia hidrográfica, com condioes de umidade residual no solo similares e com percentagem de cobertura constante ao longo do horizonte do tempo da simulao. A análise  realizada para a bacia hidrográfica como uma unidade e não discrimina as sub-bacias componentes do sistema BH-PCJ.

O balanço hídrico  realizado considerando valores anuais tanto de oferta quanto de demanda. Os valores de demanda do recurso hídrico e da gerao de efluentes são analisados de forma diária, e após esses volumes são anualizados. A oferta  realizada considerando valores anuais de precipitao na região, determinando-se o volume de água disponível.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2, pode-se observar que, num período de simulao de 50 anos, mantendo as tendências de consumo e de oferta de água na BH-PCJ no chamado cenário “*Business as Usual*” (BaU), com *time step* de um ano, deve-se esperar incremento de aproximadamente 76% na demanda total de água na área de estudo, ao longo do tempo de simulao.

Em 2004, a demanda total representava aproximadamente 74% de todo o volume disponível de água sem considerar as águas de reúso; já em 2007, a relação mudou para aproximadamente 82%, e espera-se que em 2024 a BH-PCJ seja uma bacia fechada por dois anos, ou seja, todo o volume disponível deverá ser consumido dentro da bacia. Existem previsões de mudanças de consumo (PERH, 2004) que permitirão uma folga nas condições de demanda de água na bacia por uns 6 anos, mas, a partir de 2032, a bacia volta a se fechar, porém, dessa vez, de forma permanente.

A partir desse ponto, o fornecimento de água a novos consumidores somente poderá ser garantido com as águas de reúso, que, para 2054, representarão aproximadamente 39% das águas disponíveis. O reúso das águas residuárias vai incrementar a oferta de água, mas o volume de água necessário para garantir a diluição das águas residuárias e a sustentabilidade dos ecossistemas dos corpos de água será comprometido pelo aumento do uso das águas residuárias como fonte de abastecimento. Sem dúvida, isso incrementará o preço do tratamento de água, e é preciso prever alternativas para solucionar esse difícil problema.

TABELA 2. Volume escoado, volume infiltrado, volume retornado como água residuária, demanda total e balanço na Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá simulados para 50 anos, usando o Modelo de Gestão dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (MRH-PCJ), no cenário “*Business as Usual*”. **Surface runoff, infiltrated volume, effluents returned to river, total demand and balance simulated using the Water Resources Model for the Piracicaba, Capivari and Jundiá River Basins in a 50-year time frame under the ‘Business as Usual’ scenario.**

Ano	Volume Escoado	Volume Infiltrado	Volume Retornado como Água Residuária	Demanda Total	Balanço
			$10^6 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$		
2004	4.726	1.812	2.197	4.865	2.914
2007	4.726	1.812	2.363	5.350	2.914
2010	4.726	1.812	2.644	5.488	2.914
2020	4.726	1.812	3.116	6.279	2.914
2030	4.726	1.812	3.026	6.394	2.914
2040	4.726	1.812	3.479	7.216	2.914
2050	4.726	1.812	4.002	8.164	2.914
2054	4.726	1.812	4.232	8.583	2.914

Novas estações de tratamento de esgoto e de águas residuárias deverão ser construídas, o que diminuirá a carga contaminante que será despejada nos corpos de água, pois a estimativa é que essa aumentará em 93% ao longo do período de simulação de 50 anos, se as tendências atuais se mantiverem.

No cenário *BaU*, observou-se que as demandas de água aumentarão em 2030 aproximadamente 24% em relação às demandas de 2004, e que cerca de 31% do volume da água disponível terá origem no reúso das águas residuárias, com o uso total dos recursos hídricos disponíveis de aproximadamente 98%; a carga contaminante das diversas atividades econômicas terá aumentado cerca de 39%. Para 2054, as condições serão ainda mais difíceis já que as demandas de água estimadas aumentarão aproximadamente 76%, sendo que em torno de 39% do volume de água disponível poderá ter origem no reúso das águas residuárias; o uso total dos recursos hídricos disponíveis chegará a aproximadamente 131% do volume disponível, e a carga contaminante das diversas atividades econômicas terá aumentado a valores superiores a 91%, comparado com 2004.

Na Figura 6, para o cenário *BaU*, o valor do Índice de Falkenmark que, em 2004, era de  $1.403 \text{ m}^3 \text{ habitante}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  ( $713 \text{ hab Mm}^{-3} \text{ ano}^{-1}$ ) na BH-PCJ, chegará a  $1.008 \text{ m}^3 \text{ hab}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  ( $992 \text{ hab Mm}^{-3} \text{ ano}^{-1}$ ) em 2030, e  $734 \text{ m}^3 \text{ hab}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  ( $1.363 \text{ hab Mm}^{-3} \text{ ano}^{-1}$ ) em 2054. Considera-se

que existe estresse hídrico quando a bacia hidrográfica apresenta índices de 1.000 a 1.600 m<sup>3</sup> hab<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, e de escassez crnica de água quando o intervalo do volume de água disponível está entre 500 e 1.000 m<sup>3</sup> hab<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (FALKENMARK, 1989).

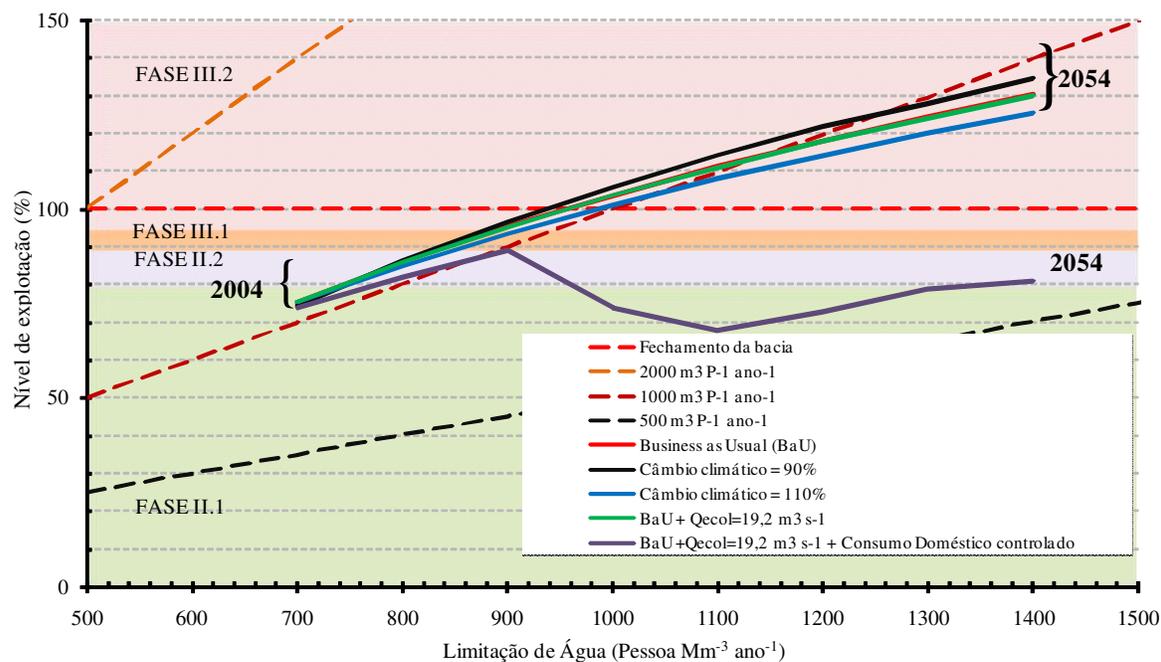


FIGURA 6. Relato entre demanda total de água e disponibilidade de água, em porcentagem (no eixo vertical), e densidade populacional por unidade de fluxo, em pessoas por cada Mm<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> (na escala horizontal) para a Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá calculados com o Modelo de Gestão dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (MRH-PCJ) para os cinco cenários simulados (Adaptado pelos autores de: FALKENMARK et al., 2007; e KELLER et al., 1998). **Relationship between Total Water Demand and Water Availability, in percentage (vertical axis), and Population Density per Unit of Flow, Mm<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup>, (horizontal scale) estimated using the Water Resources Model for the Piracicaba, Capivari and Jundiá River Basins in a 50-year time frame simulation under five scenarios (Adapted from: FALKENMARK et al., 2007; and KELLER et al., 1998).**

Na mesma Figura 6, quando se analisa o desenvolvimento da bacia, segundo KELLER et al. (1998), percebemos que a BH-PCH se encontra em 2007 na Fase II, Fase de Conservao - estágio I; em outras palavras, precisa diminuir a demanda e incrementar a eficiência no uso da água, mas para 2008, entrará no estágio final da Fase II. Para 2016, entrará na Fase III (Fase de Acrecentamento), que  a fase final de desenvolvimento das bacias hidrográficas, ou seja, fase em que parte da água utilizada deverá ser obtida de trasvases ou da dessalinizao dos recursos hídricos de reúso existentes na bacia.

Na Figura 7, apresenta-se o ndice de sustentabilidade (IS) proposto por XU et al. (2002) e calculado usando o MRH-PCJ. Para 2004, o IS era de 0,44; chegará a 0,33 em 2030, e será igual a 0,20 em 2054. No processo de cálculo do ndice, foram consideradas as águas de retorno como parte da oferta das águas disponíveis na BH-PCJ, para assim poder contrastar com os valores encontrados na variável Uso da gua. Quando o valor de IS  maior do que 0,2 indica que existe baixo ou nenhum estresse na oferta de água, mas quando os valores de IS são menores que 0,2, isso reflete condioes de vulnerabilidade dos recursos hídricos.

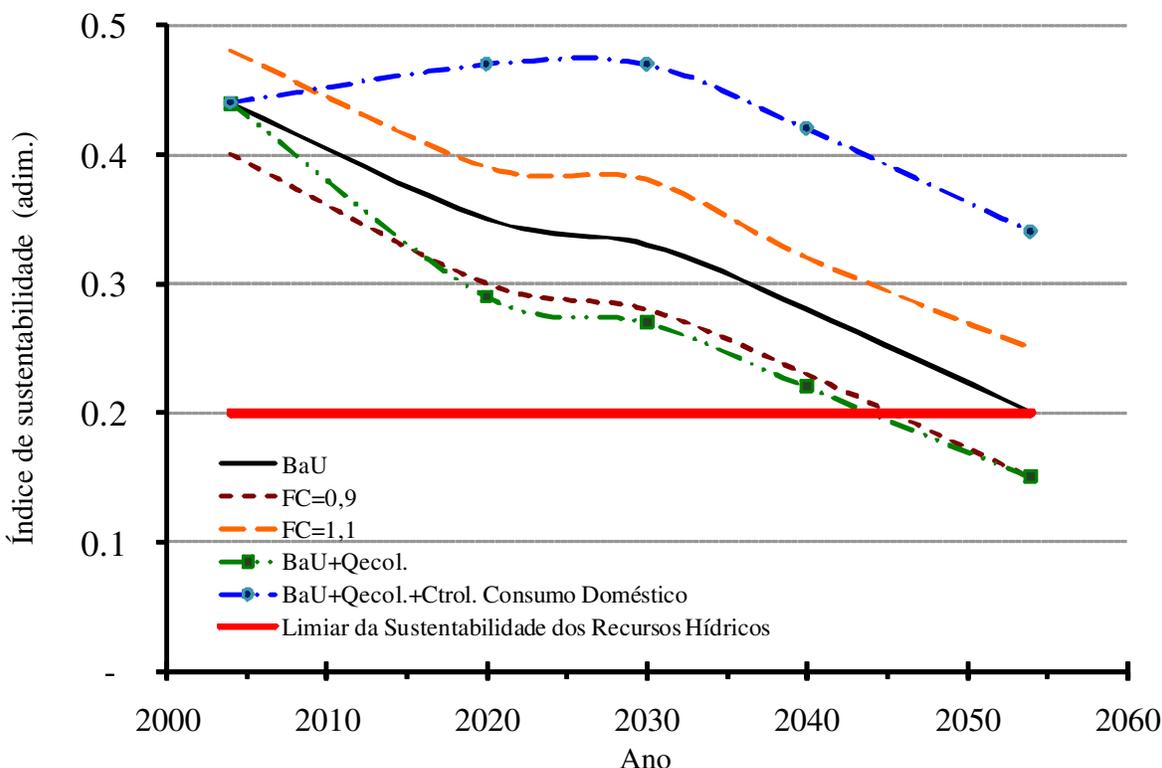


FIGURA 7. Índice de Sustentabilidade (IS - adimensional) proposto por XU et al. (2002), e calculado com o Modelo de Gestão dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (MRH-PCJ) para a Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá. **Sustainability Index, dimensionless, proposed by XU et al. (2002), estimated using the Water Resources Model for the Piracicaba, Capivari and Jundiá River Basins (MRH-PCJ).**

Quando analisados os outros cenários simulados, foi encontrado que a tendência à crise é evidente (Figuras 6 e 7) nos três cenários em que não foram realizadas mudanças no manejo dos recursos hídricos; isso significa que nenhum dos usuários foi lesado nas suas demandas de água, ou naqueles cenários onde medidas de proteção do ecossistema e/ou de redução do consumo de água foram consideradas. Considerando que a população é o principal consumidor na BH-PCJ (SÁNCHEZ-ROMÁN et al., 2009), quando foi regulado o uso do recurso hídrico para esses consumidores, as condições de sustentabilidade melhoraram. Isso faz salientar a necessidade imperiosa de reforçar e discutir mais a fundo os processos necessários para garantir uma efetiva e profunda gestão dos recursos hídricos na BH-PCJ.

## CONCLUSÕES

A informação apurada dos diversos consumidores, áreas plantadas, volumes de água residuárias que retorna aos corpos de água ainda é deficiente na bacia e precisa ser elaborada e complementada no menor tempo possível. Isso permitirá melhorar os resultados obtidos pelo modelo de simulação, ajustando cada vez mais o processo da modelagem com a realidade, garantindo que a ferramenta seja um apoio mais útil na tomada de decisões e na busca pela sustentabilidade do sistema de recursos hídricos existente na BH-PCJ.

Todos os resultados encontrados, pelos diversos métodos e índices utilizados, mostram que deverão ser providenciadas medidas adequadas e urgentes que impeçam, ainda mais, a deterioração dos recursos hídricos disponíveis para garantir a sustentabilidade do sistema BH-PCJ. Nos

próximos 15 anos, a BH-PCJ será uma bacia hidrográfica fechada; para 2030, a situa o na bacia será extremamente complicada tal e como indicam os coeficientes calculados; para 2050, a situa o será muito próxima de não ser sustentável. Tais cenários mostram a importância de tomadas de decisão em tempo hábil para evitar o caos ecológico e hidrológico na BH-PCJ. Novamente, a crise hídrica   iminente, mas não existe uma percep o geral dessa situa o.

## AGRADECIMENTOS

Ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - Processo 151864/2007-1) e   Funda o de Amparo   Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), por meio do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irriga o (INCTEI) e do Processo 2006/60954-4, pelo apoio financeiro a esta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- COSTA, M.P.B. Agroecologia: uma alternativa viável às áreas reformadas e   produ o familiar. *Revista Reforma Agrária*, Campinas, v.23, n.1, p.53-69, 1993.
- DAEE. DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Disponível em: <<http://www.dae.sp.gov.br>>. Acesso em: 6 maio 2007.
- FALKENMARK, M. The massive water scarcity now threatening Africa - Why isn't it being addressed? *Ambio*, Estocolmo, v.18, n.2, p.112-118, 1989.
- FALKENMARK, M.; BERNTSELL, A.; J GERSKOG, A.; LUNDQVIST, J.; MATZ, M.; TROPP, H. *On the verge of a new scarcity: a call for good governance and human ingenuity*. SIWI Policy Brief, Stockholm International Water Institute, 2007. 20 p.
- FORRESTER, J.W. *Industrial dynamics*. Cambridge: M.I.T. Press, 1961. 464 p.
- IEA. INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br>>. Acesso em: 14 maio 2007.
- IRRIGART. *Relatório da Situa o dos Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá - 2002/2003*. Comit  das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá. 2004. v.2, p.126-334. *Relatório Final*.
- KELLER, J.; KELLER, A.; DAVIDS, G. River basin development phases and implications of closure. *Journal of Applied Irrigation Science*, New York, v.33, n.2, p.145-163, 1998.
- OHLSSON, L.; TURTON, A.R. *The Turning of a Screw*. Social resource scarcity as a bottle-neck in adaptation to water scarcity. Londres: University of London, School of Oriental and African Studies, 1999. 8 p. (SOAS Occasional Paper N.19).
- PÉREZ MAQUEO, O.; DELF N, C.; FREGOSO, A.; COTLER, H. Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hídricos. *Gaceta Ecológica*, Ciudad de Mexico, n.78, p. 65-84, 2006.
- PERH. PLANO ESTADUAL DOS RECURSOS HIDRICOS 2004-2007 DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Relatório síntese do plano*. Piracicaba: Consórcio JMR Engecorps, 2005. 189 p.
- PERH. PLANO ESTADUAL DOS RECURSOS HIDRICOS 2004-2007 DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Sumario executivo*. Piracicaba: Consórcio JMR Engecorps, 2004. 25 p.
- PLANO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIÁ PARA O QUADRI NIO 2008-2011 (PBH). Piracicaba: STS-Engenharia Ltda., 2007. 655 p.
- POWERSIM Co. *Introduction to system dynamics*. Reston: Powersim Press, 1996. 44 p.

RICHARDSON, G.P. System dynamics: simulation for policy analysis from a feedback perspective. In: \_\_\_\_\_. *Modeling for management I: qualitative simulation modeling and analysis*. New York: Springer Verlag, 1991. p.144-169.

SABESP. Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo. Disponível em: <<http://www.agricultura.sp.gov.br>>. Acesso em: 3 maio 2007.

SÁNCHEZ-ROMÁN, R.M.; FOLEGATTI, M.V. *Sustentabilidade da agricultura irrigada nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá: Uma perspectiva em dinâmica de sistemas. Modelo em dinâmica de sistemas para a gestão dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá*. 2008. 175 f. Tese (Pós-Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

SÁNCHEZ-ROMÁN, R.M.; FOLEGATTI, M.V.; ORELLANA-GONZÁLEZ, A.M.G. Water Resources Assessment at Piracicaba, Capivari and Jundiá River Basins: A Dynamic Systems Approach. *Water Resources Management*, The Netherlands, 2009. Disponível em: <<http://dsc.doi.org>>. DOI 10.1007/s11269-009-9470-x.

SANTOS, M. O espaço e os seus elementos: questões de método. *Revista Geografia e Ensino*, Belo Horizonte, v.1, n.1, p.19-30, 1982.

SIRGH. SISTEMA DE INFORMAÇÕES PARA O GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/bdhm.exe/plu>>. Acesso em: 25 abr. 2007.

SOUCHON, Y.; KEITH, P. Freshwater fish habitat: science, management and conservation in France. *Aquatic Ecosystem Health and Management Society*, Philadelphia, v.4, n.4, p.401-412, 2001.

UNICA. UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Disponível em: <<http://www.portalunica.com.br>>. Acesso em: 12 maio 2007.

WIAZOWSKI, B.A.; SILVA, C.A.B.; LOURENZANI, W.L. O uso de sistemas dinâmicos como ferramenta de aprendizagem. *Economia Rural*, Viçosa - MG, v.3, n.10, p. 29-33, 1999.

XU, Z.X.; TAKEUCHI, K.; ISHIDARA, H.; ZHANG, X.W. Sustainability analysis for yellow river water resources using the system dynamics approach. *Water Resources Management*, The Netherlands, v.16, n.3, p.239-261, 2002.