

## **Modelagem da dinâmica de usos da terra na bacia hidrográfica do rio Mogi Guaçu (SP).**

Angela Terumi Fushita<sup>1</sup>  
José Eduardo dos Santos<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de São Carlos – UFSCar *campus* São Carlos  
Laboratório de Análise e Planejamento Ambiental - LAPA  
Rodovia Washington Luís, km 235 – Caixa Postal 676  
CEP 13565-905 - São Carlos – SP, Brasil  
angela\_fushita@yahoo.com.br; djes@ufscar.br

**Abstract.** It was carried the spatial pattern analyze and ecological sustainability commitment of the Mogi Guaçu watershed river based on the land use dynamics modeling in the range of analysis of the historical evolution (1989-1999) and the evolution simulated for a period of 50 years (1999-2049). The land use mapping for 1989, 1999 and 2009 was done by LANDSAT 5 TM sensor. The land use dynamics modeling was conducted in two stages using the EGO DYNAMICS software: 1) the transition matrix of land use for 1989 and 1999, considering the classes: natural areas, anthropic agricultural areas, anthropic non-agricultural areas and aquatic environments; 2) scenarios projecting for a period of 50 years (1999-2049), based on Bayesian method. The land use dynamics in the range of analysis of the historical evolution (1989-1999) and the simulation modeling for a period of 50 years (1999-2049) showed a predominance of human occupation, where agricultural activities and urbanization are the main driver force of changes this watershed. The loss of natural areas leads to impairment of ecological sustainability, still observed in 1989, which increases over time. The simulated scenario for 2049 has more than 75% of the watershed occupied by anthropic activities. The modelling revealed some deficiencies due to not include climate variables and aspects related to environmental legislation. Despite the deficiencies mentioned, modeling is a tool that allowed to identify future scenarios of landscape spatial patterns and therefore the condition of watershed river ecological sustainability, depending on local and regional development actions.

**Key-words:** remote sensing; image processing; driver force; ecological sustainability.

## 1. Introdução

O uso da terra é considerado um fator direto de pressão nos componentes e recursos naturais (Millennium Ecosystem Assessment, 2005), refletindo o padrão cultural da sociedade, os fatores econômicos e as características ambientais de uma unidade de gerenciamento da paisagem (Baldwin, Trombulak e Baldwin, 2009). Investigações relacionadas à dinâmica de uso da terra envolvem a identificação dos tipos de cobertura da terra, os mecanismos ecológicos de sucessão e regeneração, os componentes ambientais físicos, as atividades socioeconômicas e os fenômenos meteorológicos e/ou outros desastres naturais (Flamenco-Sandoval, et al 2007).

As preocupações relacionadas às alterações de uso da terra surgem na agenda das pesquisas sobre mudanças ambientais globais, com a percepção de que esses processos influenciam as mudanças climáticas (Lambin et al 2003). E mais recentemente, em como o uso da terra e a exploração dos recursos afetam a capacidade de provisão dos serviços ecossistêmicos, de forma que a perda ou comprometimento dos fluxos relacionam-se à crise ambiental e econômica (Beier et al., 2008).

A modelagem da dinâmica do uso da terra através de técnicas de geoprocessamento constituem ferramentas fundamentais para a análise do padrão espacial e, conseqüentemente, a condição de sustentabilidade ecológica de uma unidade de gerenciamento da paisagem. Possibilitam, ainda, identificar e avaliar as conseqüências das atividades antrópicas na biodiversidade, nos ciclos biogeoquímicos e na qualidade do recurso hídrico nas áreas mais suscetíveis às mudanças (Flamenco-Sandoval et al 2007), bem como, subsidiar a compreensão das alterações da performance dos processos ecológicos, com base em simulações projetadas para diferentes cenários (Mas, Sandoval 2011).

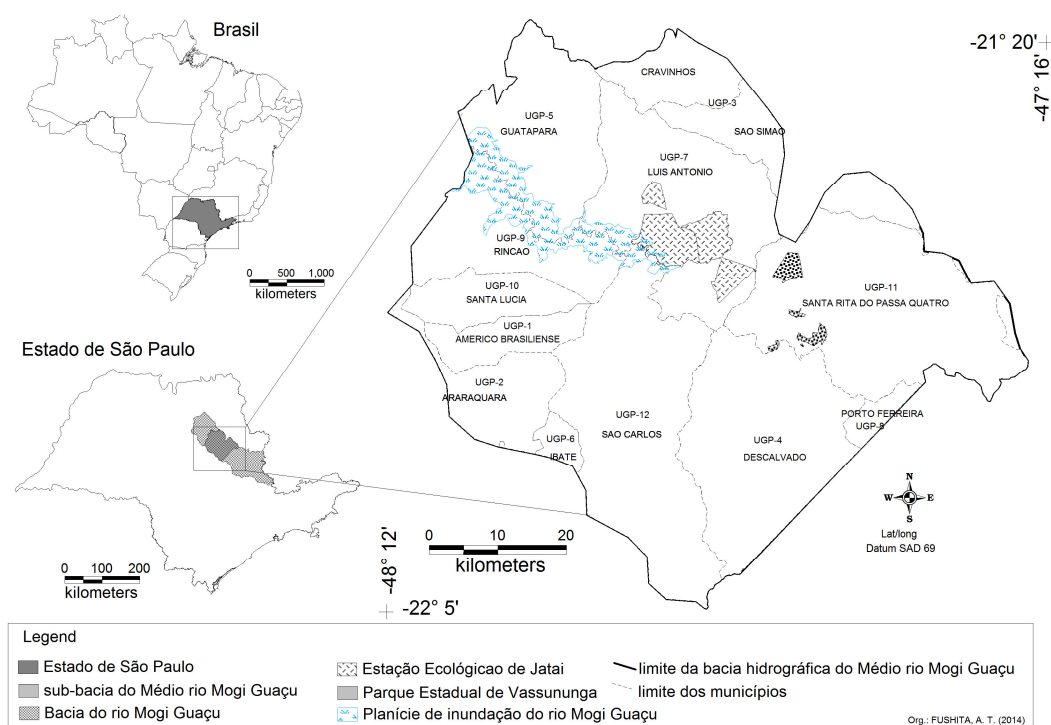
Vários trabalhos têm proporcionado informações, tendências, avaliações e comparações, modelando cenários de uso da terra, com base em resultados quantitativos ou qualitativos, em escalas global, regional ou local, auxiliando os pesquisadores e os tomadores de decisão na proposição de novas políticas direcionadas às práticas sustentáveis (Lucena et al., 2011).

Neste contexto, este estudo teve como objetivo analisar o padrão espacial e o comprometimento da sustentabilidade ecológica do trecho médio da bacia hidrográfica do rio Mogi Guaçu, com base na modelagem da dinâmica de usos da terra no intervalo de análise da evolução histórica (1989 a 1999) e da evolução simulada para um período de 50 anos (1999 a 2049).

## 2. Material e métodos

### 2.1. Área de estudo

A área de estudo compreende o trecho médio da Bacia Hidrográfica do Rio Mogi-Guaçu, inserida na região nordeste do Estado de São Paulo, Brasil, entre as coordenadas geográficas 21°20' e 22°5' de Latitude Sul e 47°16' e 48°12' de Longitude Oeste. A área investigada abrange os territórios (total ou parcial) dos municípios de Américo Brasiliense, Analândia, Araraquara, Descalvado, Guataporá, Ibaté, Luís Antônio, Pirassununga, Porto Ferreira, Rincão, Santa Cruz das Palmeiras, Santa Lucia, Santa Rita do Passa Quatro, Santa Rosa de Viterbo, São Carlos, São Simão e Tambaú (**Figura 1**).



**Figura 1:** Localização do trecho médio da Bacia Hidrográfica do rio Mogi Guaçu (Estado de São Paulo) e, em detalhe, a área da planície de inundação, as unidades de conservação locais (Estação Ecológica de Jataí, Luis Antônio e Parque Estadual de Vassununga, Santa Rita do Passa Quatro), e as unidades de gerenciamento da paisagem (UGP) referentes aos limites territoriais dos municípios inseridos na bacia hidrográfica.

## 2.2. Procedimentos metodológicos

O mapeamento de uso da terra, para os anos de 1989, 1999 e 2009, foi elaborado através de imagens LANDSAT 5 sensor TM, referentes à órbita 220 ponto 75, com datas de passagem 27 de outubro de 1989, 02 de setembro de 1999 e 24 de maio de 2009.

Para a modelagem da dinâmica de usos da terra do trecho médio da bacia hidrográfica do rio Mogi Guaçu foi utilizado o *software* DINAMICA EGO (Soares-Filho et al., 2002; Mas et al. 2011).

A primeira etapa da modelagem envolveu a elaboração da matriz de transição dos mapas de uso da terra para os anos de 1989 e 1999, considerando as classes: áreas naturais, áreas antrópicas agrícolas, áreas antrópicas não-agrícolas e ambientes aquáticos (IBGE, 2013).

As representações espaciais dos valores de declividade, malha viária, relevo, tipos de solo, geologia, unidades de conservação e hidrografia (**Quadro 1**), foram inseridos no modelo para a atribuição dos pesos de evidência, que representam a influência destas variáveis na probabilidade espacial de uma transição de uso da terra. A seguir, o modelo analisa a correlação entre as representações de cada variável e dentro de cada variável, com base nos cálculos de Qui-quadrado, Cramer, contigência, entropia e incerteza de informação conjunta, disponível no *software* DINAMICA EGO (Soares-Filho et al 2004).

A segunda etapa consistiu na modelagem da projeção de cenários da dinâmica de usos da terra para um período de 50 anos (1999 a 2049), pelo método bayesiano de pesos de evidências, com base na matriz de transição de usos da terra entre 1989 e 1999, e finalmente validado e calibrado para o ano de 2009.

Informação cartográfica	Descrição	Fonte
Declividade	Informação derivada das curvas de nível extraídas das cartas topográficas (.dgn)	IBGE (1971)
Malha viária	Informações extraídas das cartas topográficas	IBGE (1971)
Relevo	Informações extraídas do mapeamento geomorfológico do Estado de São Paulo	IPT (1981)
Tipos de solo	Cartas pedológicas fornecidas em formato vetorial, pelo Instituto Agrônomo de Campinas	IAC (2009)
Geologia	Informações extraídas do mapeamento geológico do Estado de São Paulo	IGC (1974)
Unidades de conservação	Delimitação das unidades de conservação do Estado de São Paulo	Fundação Florestal do Estado de São Paulo (2011)
Hidrografia	Informações extraídas das cartas topográficas,	IBGE (1971)

**Quadro 1:** Variáveis estruturais utilizadas na *software* DINAMICA EGO para o procedimento de modelagem de usos da terra, para os anos de 1989 e 1999, no trecho médio da Bacia Hidrográfica do rio Mogi Guaçu (Estado de São Paulo).

### 3. Resultados e Discussão

A matriz de transição (**Quadro 2**) apresenta as taxas líquidas anuais de conversão entre os tipos de usos da terra identificados para o trecho médio da Bacia Hidrográfica do rio Mogi Guaçu (SP), em 1989 e 1999.

A maior taxa de conversão foi observada na conversão entre áreas naturais para áreas antrópicas agrícolas (44,61%), refletindo a tendência para um cenário associado à perda da naturalidade da paisagem em um período de dez anos (1989 – 1999). A expansão agrícola representa o principal fator de pressão de mudanças de usos da terra para o trecho médio da Bacia Hidrográfica do rio Mogi Guaçu. Em contrapartida, somente 8% das áreas antrópicas agrícolas foram ocupadas por áreas naturais, provavelmente, como resultado de estratégias associadas a recuperação de áreas de preservação permanente, conforme dispõe o Código Florestal Brasileiro, vigente neste período (Brasil, 1965) (**Quadro 2**).

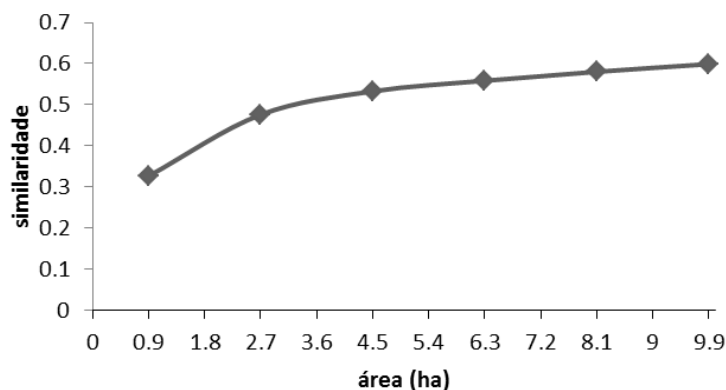
A expansão de áreas antrópicas não-agrícolas (áreas urbanas e atividades de mineração) resultou na ocupação de áreas antrópicas agrícolas (0,69%), de ambientes aquáticos (0,24%) e de áreas naturais (0,22%) (**Quadro 2**), evidenciando a pressão da urbanização como um fator secundário de mudanças de usos da terra entre os anos de 1989 a 1999.

A perda de ambientes aquáticos para áreas antrópicas agrícolas (5,8%) e áreas antrópicas não-agrícolas (0,24%) corrobora com a condição de um cenário preponderante da ocupação antrópica para o trecho médio da Bacia Hidrográfica do rio Mogi Guaçu, no período de dez anos. A taxa de conversão anual (7,02%) de ambientes aquáticos para áreas naturais resulta, provavelmente, da irregularidade do período hidrológico responsável pela ocorrência dos pulsos de inundação que alimentam e possibilitam a continuidade a planície de inundação do trecho médio da Bacia Hidrográfica do rio Mogi Guaçu (**Quadro 2**). A intensidade e frequência dos pulsos de inundação e a vazão do rio Mogi Guaçu estão definindo um cenário com predomínio de ambientes terrestres para a área de transição do ambiente aquático-terrestre (ATTZ) do rio Mogi Guaçu (Fushita e Santos, 2014).

Taxa líquida anual (%)		1999			
		Áreas naturais	Áreas antrópicas agrícolas	Áreas antrópicas não-agrícolas	Ambientes aquáticos
1989	Áreas naturais	-	44.61	0.22	0.53
	Áreas antrópicas agrícolas	8.00	-	0.69	1.07
	Áreas antrópicas não-agrícolas	0.25	0.28	-	0.00
	Ambientes aquáticos	7.02	5.80	0.24	-

**Quadro 2:** Taxa líquida anual da transição (%) das classes de uso da terra, entre os anos de 1989 e 1999, para o trecho médio da Bacia Hidrográfica do rio Mogi Guaçu (Estado de São Paulo)

A modelagem da dinâmica de usos da terra entre o período de 1989 e 1999 apresentou significância estatística para os coeficientes de pesos de evidência das representações espaciais dos valores de declividade, malha viária, relevo, tipos de solo, geologia, unidades de conservação e hidrografia. O ajuste do modelo permitiu verificar que a simulação deste cenário atingiu um valor de similaridade de até 50% em relação à localização das mudanças, na resolução espacial de 150 metros (5 células) (**Figura 2**).



**Figura 2:** Curva de ajuste do modelo de simulação aplicado ao processo de modelagem dos usos da terra do trecho médio do rio Mogi Guaçu, no período de 1989 a 1999.

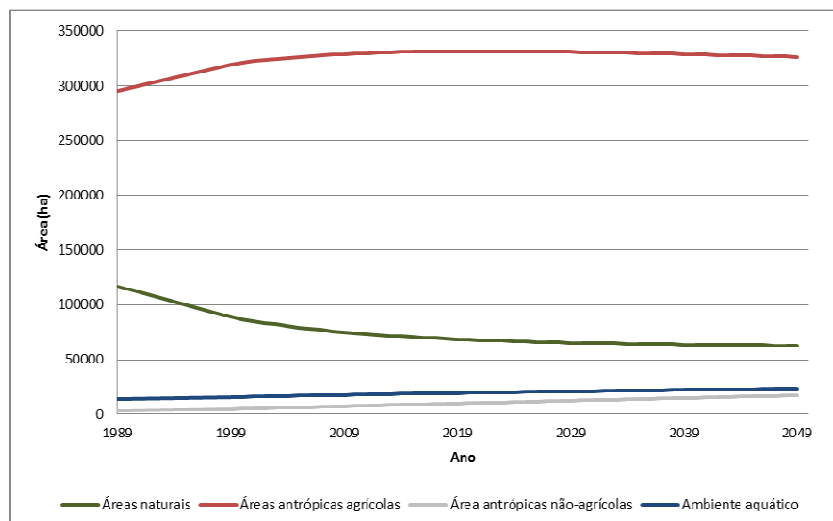
A projeção da dinâmica de usos da terra para o trecho médio da bacia hidrográfica do rio Mogi Guaçu, no intervalo de análise da evolução histórica (1989 a 1999) e da evolução simulada para um período de 50 anos (1999 a 2049), evidencia a tendência da expansão e instalação de um cenário com predomínio da ocupação antrópica (**Tabela 1 e Figura 3**). As atividades antrópicas agrícolas e não-agrícolas se intensificam e se mantêm como os principais fatores diretos de pressão de mudanças na paisagem.

Remetem ao comprometimento da sustentabilidade ecológica ainda em 1989, e que se acentua ao longo do tempo, com a projeção de um cenário simulado para 2049, com mais de 75% da área do trecho médio da bacia hidrográfica do rio Mogi Guaçu ocupada por atividades agrícolas (**Figura 4**).

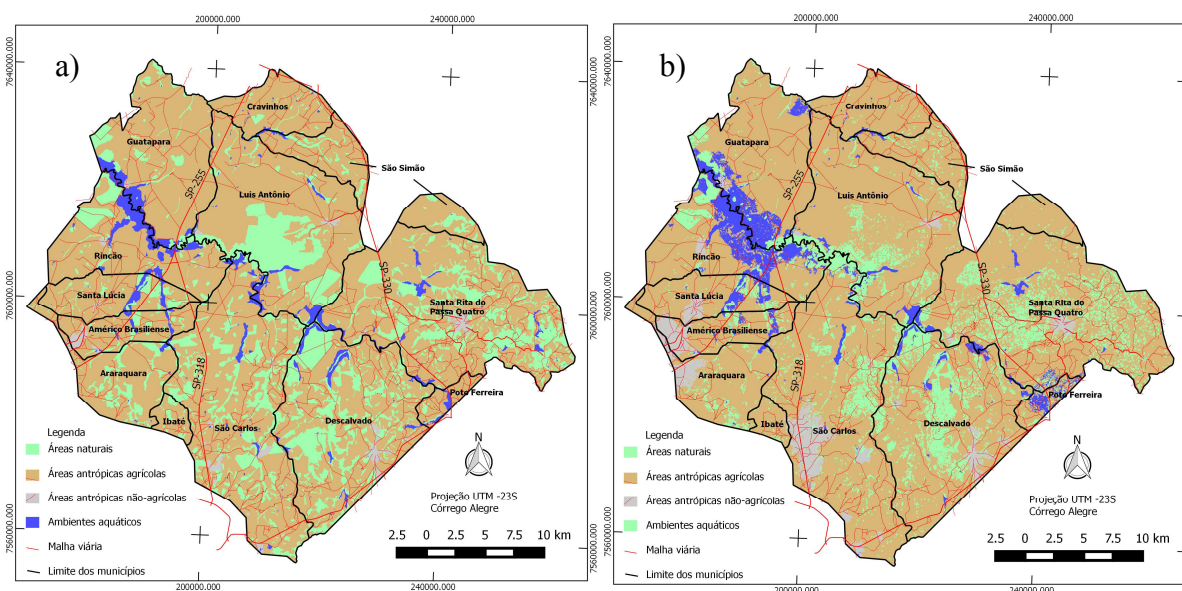
Na projeção de usos da terra para 2049, a expansão das áreas urbanas se apresenta mais evidente para os municípios de Araraquara e São Carlos (**Figura 4**), que apresentam os maiores valores de população estimada para 2014, respectivamente, de 224.304 e 238.958 habitantes (IBGE, 2010). Refletem a pressão indireta da densidade populacional e do aumento da urbanização como fatores de pressão de mudanças na paisagem.

**Tabela 1:** Valores das áreas (ha e %) das classes de usos da terra do trecho médio da bacia hidrográfica do rio Mogi Guaçu (SP) em 1989, 1999, 2009 e no cenário simulado para 2049.

Classes de usos da terra	1989		1999		2009		2049	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Áreas naturais	116.887,5	27,24	88.500,42	20,66	77.855,28	18,14	62.668,26	14,60
Áreas antrópicas agrícolas	295.588,35	68,89	319.667,58	74,50	331.372,51	77,19	326.374,02	76,06
Áreas antrópicas não-agrícolas	2.860,56	0,67	5.166,09	1,20	6.878,08	1,60	17.193,60	4,00
Ambientes aquáticos	13.757,58	3,21	15.749,28	3,67	13.162,63	3,07	22.847,49	5,32
Total	429.268,50	100,00	429.268,50	100,00	429.268,50	100,00	429.268,50	100,00



**Figura 3:** Projeção dos cenários referentes a evolução histórica (1989 a 1999) e a evolução simulada (1999 a 2049) da dinâmica de usos da terra para o trecho médio da bacia hidrográfica do rio Mogi Guaçu (SP).



**Figura 4:** Representação do cenário espacial de uso da terra em 1999 (a) e 2049 (simulado) (b), para o trecho médio da bacia hidrográfica do rio Mogi Guaçu (SP).

A expansão da área urbana do município de São Carlos projetada no cenário simulado para 2049, ao longo da Rodovia SP-318 (**Figura 4b**), pode ser corroborada pelo início da expansão urbana observada ainda em 1999 (**Figura 4a**). As áreas urbanas dos municípios de Araraquara e de Américo Brasiliense projetadas no cenário simulado para 2049, unem-se em uma área urbana única, próximas à Rodovia SP-225 (**Figura 4b**), que interliga esses municípios com o perímetro urbano do município de Ribeirão Preto.

As áreas naturais apresentam uma redução significativa no intervalo de análise da evolução histórica (1989 a 1999) e da evolução simulada para um período de 50 anos (1999 a 2049 (**Tabela 1 e Figura 3**)). As áreas naturais mais suscetíveis de serem substituídas por usos antrópicos, principalmente pelo cultivo de cana-de-açúcar, para o cenário simulado em 2049 (**Figura 4b**), estão relacionadas às regiões planas, na porção norte do trecho médio da bacia hidrográfica do rio Mogi Guaçu, nos municípios de Luis Antônio, Cravinhos, Guatapar. De modo similar o cenário simulado em 2049 evidencia uma perda significativa das áreas

naturais legalmente protegidas (Estação Ecológica de Jatui e Parque Estadual de Vassununga). Contrariamente, o cenário simulado evidencia um aumento das áreas naturais na região leste e sul, referente aos territórios municipais de Descalvado, Santa Rita do Passa Quatro e São Carlos, que apresentam as maiores variações de declividade.

Ambientes aquáticos apresentam um aumento de área no intervalo de análise da evolução histórica (1989 a 1999), e para o intervalo da evolução simulada para um período de 50 anos (1999 a 2049) (**Tabela 1 e Figura 3**). Entretanto, cenário da evolução histórica para 1990 evidencia a perda de ambientes aquáticos relacionados à planície de inundação do rio Mogi Guaçu (**Figura 4a**), com maior proximidade as áreas naturais legalmente protegidas. Esses dados corroboram com Fushita e Santos (2014) que discutem a alteração no sistema planície de inundação do rio Mogi Guaçu, em decorrência da irregularidade do período hidrológico, da redução gradativa dos valores de vazão do rio Mogi Guaçu e da intensidade dos pulsos periódicos de inundação, resultando em mudanças no percurso e extensão do rio e a extinção das lagoas marginais. Processos que estão sendo acelerados pelo aumento das atividades antrópicas na região de transição aquático-terrestre da planície de inundação do rio Mogi Guaçu. De particular interesse, o cenário simulado em 2049 evidencia um aumento da área de ambientes aquáticos na região de transição aquático-terrestre da planície de inundação do rio Mogi Guaçu (**Figura 4b**), localizados em solos hidromórficos, com declividade de 0 a 3%, em áreas utilizadas para o cultivo de arroz no município de Guatapará.

#### 4. Considerações finais

A dinâmica de uso da terra no intervalo de análise da evolução histórica (1989 a 1999) e da modelagem da evolução simulada para um período de 50 anos (1999 a 2049) evidenciou um cenário com predomínio da ocupação antrópica, em que as atividades agrícolas e a urbanização constituem os principais fatores diretos de pressão de mudanças para o trecho médio da bacia hidrográfica do rio Mogi Guaçu. A perda de áreas naturais remete ao comprometimento da sustentabilidade ecológica, observado ainda em 1989, e que se acentua ao longo do tempo, com a projeção de um cenário simulado para 2049, com mais de 75% da área do trecho médio da bacia hidrográfica do rio Mogi Guaçu ocupada por atividades antrópicas.

O fator declividade foi determinante na modelagem da projeção do cenário dos usos da terra para 2049, com a substituição de áreas naturais por áreas antrópicas agrícolas em regiões com menor variação da declividade, e a situação contrária em áreas com maiores valores de declividade.

O modelo utilizado revela algumas deficiências em função de não contemplar variáveis climáticas e aspectos relacionados à legislação ambiental. Observa-se uma evidente superestimativa dos valores e da distribuição espacial das áreas de ambientes aquáticos projetados para o cenário simulado em 2049, em função das variáveis climáticas não serem contempladas. De modo similar, a modelagem demanda um procedimento de refinagem, para a inserção dos limites territoriais das áreas legalmente protegidas (unidades de conservação de proteção integral, áreas de preservação permanente e reservas legais), inseridas no trecho médio da bacia hidrográfica do rio Mogi Guaçu. Políticas públicas e dispositivos legais devem, necessariamente, complementar o procedimento de modelagem, uma vez que são instrumentos que garantem a continuidade e a conservação destes remanescentes de áreas naturais. Interferem, sobretudo, na condição do cenário simulado em 2049, relacionado ao comprometimento efetivo da sustentabilidade ecológica do trecho médio da bacia hidrográfica do rio Mogi Guaçu.

Apesar das deficiências apontadas, a modelagem representa uma ferramenta que permitiu identificar cenários futuros de padrões espaciais da paisagem e, conseqüentemente, da

condição de sustentabilidade ecológica de uma unidade de gerenciamento da paisagem, em função das ações desenvolvimentistas local e regional.

### **Agradecimentos**

A CAPES (Proc. 23038.006939/2011-17) pelo financiamento desta pesquisa.

### **Referências Bibliográficas**

Bakker, M. M.; Doorn, A. M. Farmer-specific relationships between land use change and landscape factors: Introducing agents in empirical land use modeling. **Land Use Policy** 26 (2009) 809–817

Baldwin, R. F.; Trombulak, S. C.; Baldwin, E. D. (2009). Assessing risk of large-scale habitat conversion in lightly settled landscapes. **Landscape and Urban Planning**, 91, 219–225.

Beier, C.M., Patterson, T.M.; Chapin III, F.S. Ecosystem Services and Emergent Vulnerability in Managed Ecosystems: A Geospatial Decision-Support Tool. **Ecosystems** (2008) 11: 923–938.

Brasil. **Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965**. Institui o novo Código Florestal.

\_\_\_\_\_. **Lei Nº 9.985, de 18 de julho de 2000**.Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências.

\_\_\_\_\_.**Lei Nº 12.652 de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa e dá outras providências.

Flamenco-Sandoval, A.; Ramos, M.M.; Maser, O.R. Assessing implications of land-use and land-cover change dynamics for conservation of a highly diverse tropical rain forest. *Biological Conservation*, 138 (2007): 131-145.

Fushita, A.T.; Santos, J.E. Dinâmica da zona de transição aquática - terrestre do sistema rio-planície de inundação do rio Mogi-Guaçu (SP). VI Geopantanal. 2014.

Lambin, E.F.; Geist, H.J.; Lepers, E. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. **Annu. Rev. Environ. Resour.** 2003. 28:205–41.

Lucena, A.D.; Cavalcante, J.N.; Candido, G.A. Sustentabilidade do município de João Pessoa: uma aplicação do barômetro da sustentabilidade. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 7, n. 1, p. 19-49, jan-abr/2011, Taubaté, SP.

Mas, J.F.; Sandoval, A.F. Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México. **Geotrópico**, NS – 5 (1) Artículo 1, 2011.

Millennium Ecosystem Assessment. **Ecosystems and Human well-being? Biodiversity synthesis**. World Resources Institute, Washington, DC, 2005.

Soares-Filho, B.S.; Alencar, A.; Nepstad, D.; Cerqueira, G.; Vera Diaz, M.; Rivero, S.; Solorzano, L.; Voll, E. Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarém-Cuiabá corridor. **Global Change Biology**, 10: 745-764. 2004.