

## **O uso de ferramentas SIG na avaliação econômico-ambiental da bacia do Ribeirão Guaratinguetá , como subsídio a provisão de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA).**

Pedro Ivo Mioni Camarinha<sup>1</sup>  
Paulo Valladares Soares<sup>2</sup>  
Mariana Benessiuti Motta<sup>3</sup>  
Mariana Cassiano Ferreira<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
[pedro.camarinha@inpe.br](mailto:pedro.camarinha@inpe.br)

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” UNESP – Campus de Guaratinguetá. Av. Ariberto Pereira da Cunha,333-CEP: 12516-410- Guaratinguetá-SP,Brasil.  
[paulo.valladares27@gmail.com](mailto:paulo.valladares27@gmail.com)

<sup>3</sup> Associação Corredor Ecológico do Vale do Paraíba – ACEVP  
Av. Shishima Hifumi, 2911. CEP: 12244-390. São José dos Campos - SP, Brasil.  
[mariana@corredordovale.org.br](mailto:mariana@corredordovale.org.br)

<sup>4</sup> Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro– PUC-RIO, Eng. Civil.  
Rua Marquês de São Vicente 225 - Sala 301. CEP: 22451-900.Rio de Janeiro-RJ, Brasil.  
[marianabenessiuti@yahoo.com.br](mailto:marianabenessiuti@yahoo.com.br)

**Abstract.** Este trabalho foi desenvolvido na bacia hidrográfica do ribeirão Guaratinguetá, no município homônimo, como ferramenta às ações do projeto Produtor de Água, implementado desde 2011, no âmbito do programa de Pagamento por Serviço Ambiental (PSA). Os procedimentos metodológicos foram executados em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica) que ao integrar dissertações/tese e trabalhos técnicos, geraram produtos sistêmicos sobre os principais atributos do meio físico e da paisagem. Os mapas que foram integrados relacionam a capacidade de infiltração, o potencial erosivo do solo e a suscetibilidade a escorregamentos de encosta da bacia estudada. A partir desta integração foi gerado o Mapa de Vulnerabilidade Ambiental da Bacia, que apresenta o diagnóstico desta região quanto aos locais onde os serviços ecossistêmicos prestados pela floresta são os responsáveis pela manutenção da “saúde hídrica” da bacia. Com os resultados obtidos, foi possível estruturar informações/dados que subsidiaram atividades/ações do PSA, bem como, propor diferentes estratégias de atuação na otimização dos recursos financeiros envolvidos no programa. Para concluir este trabalho foi necessário utilizar o banco de dados disponível no Laboratório de Análises GeoEspaciais (LAGE), da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (UNESP) e estudos realizados em parceria.

**Palavras-chave:** Pagamento por Serviços Ambientais, álgebra de mapa, bacias hidrográficas, vulnerabilidade.

### **1. Introdução**

A importância da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul destaca-se em dois aspectos. Economicamente, é considerada uma das mais importantes do Brasil, pois nela circula cerca de 55% do PIB brasileiro (eixo RJ-SP). Ambientalmente, suas águas suportam toda atividade urbana, industrial e agrícola da porção paulista do Vale e, por meio da transposição de suas águas pelo sistema Guandu, abastece também a região metropolitana do RJ (12 milhões de habitantes). Um diferencial na implementação do PSA em Guaratinguetá , porção paulista da bacia, está no aproveitamento de uma base de dados espaciais e informações específicas da região de atuação do programa. As parcerias firmadas com as instituições de pesquisa e colaboradores permitiram a utilização de estudos acadêmicos organizados e integrados em ambiente SIG. Por exemplo, para selecionar áreas prioritárias para as ações florestais, foram utilizados estudos sobre o potencial erosivo do solo, a suscetibilidade a deslizamentos e do potencial de infiltração, objetivo deste estudo. Desta forma, os parceiros envolvidos e que aportam recursos ao PSA tem uma visão transparente e embasada, onde a preservação da

floresta existente, a conservação de solo e a restauração florestal são importantes de serem remuneradas para o alcance dos objetivos do programa implementado no município.

## 2. Área de estudo

O município de Guaratinguetá está localizado na região do Vale do Paraíba paulista, Estado de São Paulo, entre as coordenadas 22°48'6,48" Sul e 45°11'18,24" Oeste, com uma população aproximada de 113.357 habitantes (IBGE, 2009). O ribeirão Guaratinguetá, afluente da margem esquerda do rio Paraíba do Sul, nasce na Serra da Mantiqueira e tem todo o seu trajeto contido no município de Guaratinguetá (Figura 1). Geograficamente, a sub-bacia do Ribeirão Guaratinguetá encontra-se ao Norte do município homônimo. De acordo com Soares (2005), a bacia possui uma área de, aproximadamente, 164 km<sup>2</sup>, o que corresponde à cerca de 22% da área do município de Guaratinguetá, que é de 734 km<sup>2</sup>. Os principais afluentes na sua porção a montante, que compreendem as áreas de cabeceira e médio curso superior, são os ribeirões Taquaral, Sino e Gomerál e na sua porção à jusante, constituída por área de várzea, o ribeirão Guaratinguetá.

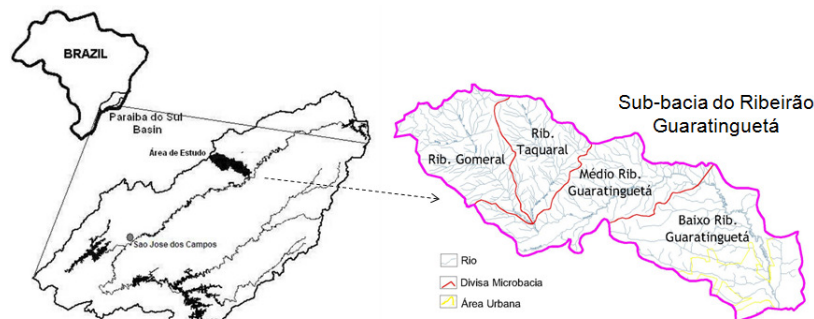


Figura 1 - Localização da área de estudo e suas subdivisões. Adaptado de Ferreira et al. (2011) e Simões et al. (2009)

## 3. Materiais e Métodos

Sucintamente, a metodologia é baseada no conceito de Álgebra de Mapas. A Álgebra De Mapas tem como objetivo cruzar informações disponíveis na forma de mapas, onde cada pixel desses mapas possui um valor numérico, escolhido através de critérios lógicos para interpretar e resolver problemas espaciais (Tomlin, 1990). Neste caso, o problema espacial em questão é encontrar onde os serviços ambientais devem ser garantidos na bacia, para que seja mantida a disponibilidade de água com boa qualidade e continuamente. Os mapas que foram utilizados nesta etapa consistem em três trabalhos realizados para a Bacia do Ribeirão Guaratinguetá: Ferreira (2011), Benessiuti (2011), Soares (2005), onde forneceram informações quanto à erosividade do solo, susceptibilidade ao escorregamento de encostas e potencial de infiltração, respectivamente. Para alcançar o objetivo principal deste trabalho, foi necessária a elaboração de produtos específicos:

- **Mapa de Vulnerabilidade Ambiental quanto à Proteção e Manutenção da Bacia**, para representar as regiões da Bacia do ribeirão Guaratinguetá, onde a floresta é mais importante para manter a disponibilidade (através da provisão de seus serviços ambientais) quali-quantitativa de água para o abastecimento do município, bem como, identificar as áreas menos vulneráveis que podem ser utilizadas nas atividades produtivas.
- **Proposta Econômico-Ambiental para Uso do Solo**, com o intuito de apontar os usos do solo considerados adequados na dinâmica observada na Bacia, aliando conservação e produção.

Os procedimentos executados em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), aplicados nestas dissertações e tese. As etapas realizadas para gerar os resultados estão apresentadas na Figura 2 e os detalhes metodológicos de cada uma são apresentados a seguir.

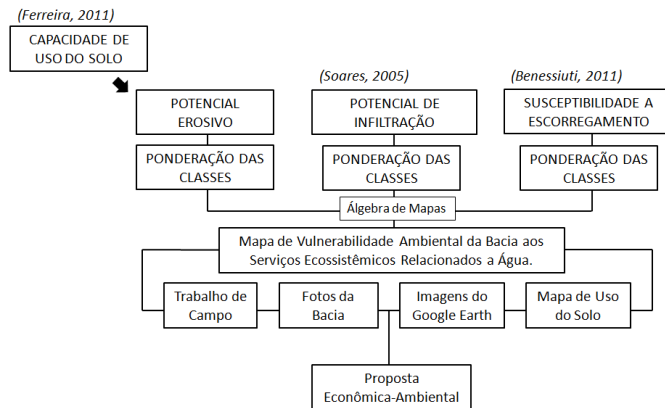


Figura 2 – Metodologia aplicada para este trabalho.

Após a ponderação dos três mapas previamente elaborados pelos seus autores - Ferreira (2011), Soares (2005) e Benessiuti (2011), realizou-se o cruzamento dos mesmos em ambiente SIG. Para tal foi utilizado o programa ArcGIS 9.2, mais especificamente a ferramenta “Raster Calculator”, que faz parte da extensão “Spatial Analyst”. Os três mapas (capacidade erosiva, potencial de infiltração e susceptibilidade a escorregamentos) receberam o mesmo “peso” na geração do Mapa de Vulnerabilidade Ambiental da Bacia aos Serviços Ambientais relacionados a Água. Isto deve-se ao fato de que os três serviços ambientais avaliados (diminuição da erosão, aumento de infiltração e da estabilidade das encostas) são intimamente ligados uns aos outros e considerou-se um mesmo grau de importância entre eles para que seja mantida a proteção e manutenção da bacia.

### 3.1 Elaboração do Mapa de Vulnerabilidade Ambiental quanto a Proteção e Manutenção da Bacia do Ribeirão Guaratinguetá.

Este mapa representa parte dos serviços ecossistêmicos exercidos pela floresta (diminuição de processos erosivos, aumento da infiltração e da estabilidade de encostas) que são mais importantes para a manutenção da qualidade e quantidade da água da bacia. Em outras palavras, o intuito é compreender como cada região da bacia está interligada com a dinâmica dos processos de erosão, deslizamentos e infiltração e apontar as principais áreas onde a presença da cobertura vegetal se faz necessária para contê-los (no caso da erosão e deslizamento) e para potencializá-lo (no caso da infiltração). Para isto foi necessário cruzar as informações específicas de cada um dos três casos, conforme apresentado nos itens a seguir.

#### 3.1.1 Mapa de Potencial Erosivo do Solo

Dentre as contribuições fornecidas em seu trabalho, Ferreira (2011) gerou um mapa de Capacidade de Uso do Solo através da avaliação de cada tipo pedológico encontrado na área de estudo e a declividade. A bacia foi dividida em dez classes que representam os diferentes tipos de solo e suas limitações quanto ao uso. Embora não seja um mapa que represente a erosividade propriamente dita, é possível correlacionar as informações sobre as limitações de cada solo quanto a este aspecto. A classificação apresentada pela autora foi proposta por Klingebiel & Montgomery (1961), do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos, e adaptado por Lepsch et al. (1991) para as condições brasileiras. Optou-se por atribuir valores que variam de um até dez, onde os maiores valores representam um maior potencial erosivo, conforme apresentado na Figura 3.

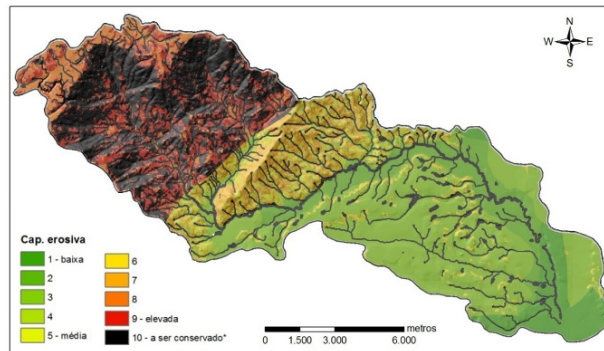


Figura 3 - Potencial Erosivo do Solo, baseado no trabalho de Ferreira (2011).

### 3.1.2 Mapa de Potencial de Infiltração

O Mapa de potencial de infiltração é proveniente do trabalho de Soares (2005), que cruzou informações referentes ao tipo de solo, geologia, geomorfologia, uso do solo, declividade e distribuição das chuvas, para elaborá-lo. Para o presente trabalho, procurou-se reproduzir a metodologia aplicada pelo autor e ponderar as classes do resultado obtido. Os valores do Mapa de Potencial de Infiltração foram divididos também em dez classes, indo de 1 até 10, conforme apresentado na Figura 4.

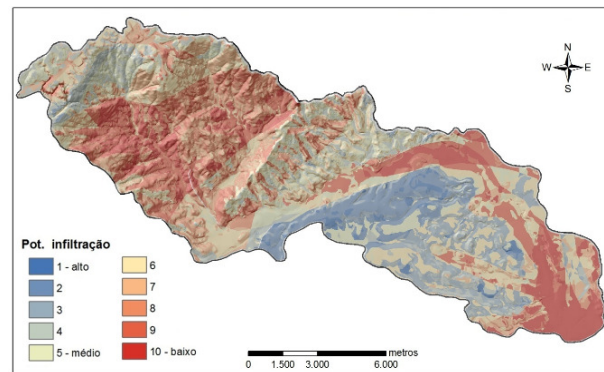


Figura 4 - Mapa de Potencial de Infiltração da Bacia do Ribeirão Guaratinguetá, baseado no trabalho de Soares (2005).

Valores numéricos elevados foram atribuídos para os menores potenciais de infiltração para representar que estas áreas são as que apresentam maior vulnerabilidade para a bacia, ou seja, são as áreas que a floresta é mais necessária para aumentar a infiltração. Para melhorar a interpretação do resultado, ao fundo foi colocado o relevo sombreado da área de estudo.

### 3.1.3 Mapa de Susceptibilidade ao Escorregamento de Encostas

O mapa de susceptibilidade ao escorregamento de encostas é proveniente do trabalho de Benessiuti (2011). Em sua pesquisa, a autora utilizou um modelo matemático de análise (Shalstab®), implementado em ambiente SIG. Detalhes sobre o algoritmo utilizado no modelo podem ser encontrados no trabalho completo de Benessiuti (2011) e nos trabalhos de seus criadores, Dietrich & Montgomery (1998). Para este trabalho, é importante ressaltar que o modelo utiliza dados referentes a topografia da bacia e também algumas propriedades do solo precisam ser incorporadas: espessura, densidade, coesão e ângulo de atrito. Os parâmetros topográficos incorporados são obtidos a partir de um modelo digital de terreno, dentro de um ambiente SIG. Os resultados do modelo são descritos em sete classes com diferentes graus de instabilidade, os quais foram reclassificados em uma escala de 1 até 7, conforme apresentado na Figura 4.

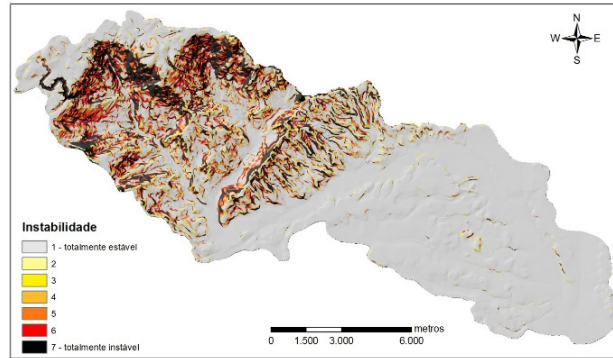


Figura 5 - Mapa de Susceptibilidade a Escorregamentos de Encostas da Bacia do Ribeirão Guaratinguetá. Adaptado de Benessiuti (2011).

### 3.2 Proposta Econômico-Ambiental

A proposta de macrozoneamento da bacia, elaborada por Ferreira (2011), permitiu criar um mosaico de uso do solo adequado para a conservação dos recursos ambientais e seus serviços ecossistêmicos, aliado a realização de atividades humanas que já eram estabelecidas na região, como agricultura e pecuária.

## 4. Resultados e discussões

Utilizando-se da metodologia apresentada anteriormente, elaborou-se o Mapa de Vulnerabilidade Ambiental quanto aos Serviços de Proteção e Manutenção da Bacia, dividida em 10 classes de vulnerabilidade, conforme a Figura 6. O resultado expressa a soma dos valores de cada pixel dos 3 mapas, dividido pelo valor 2.7 para que fosse normalizado.

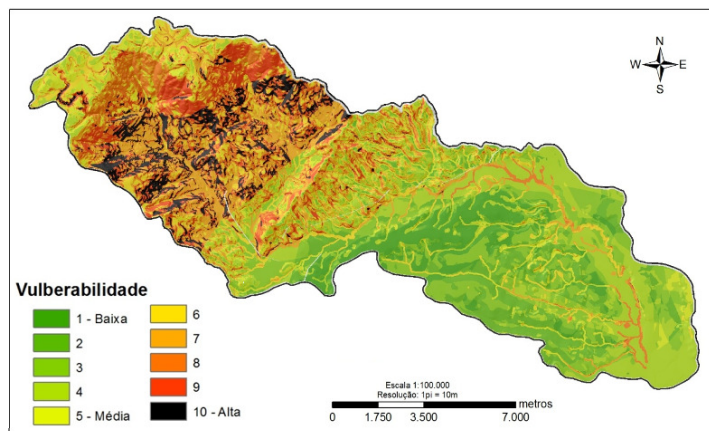


Figura 6 – Vulnerabilidade ambiental quanto aos serviços ecossistêmicos relacionados a proteção e manutenção da bacia do Ribeirão Guaratinguetá.

As análises demonstraram a existência de uma grande área que apresenta vulnerabilidade ambiental “muito alta” quanto à proteção e manutenção da bacia (Figura 66). Tais áreas estão localizadas principalmente nas regiões de relevo mais acidentado, caracterizadas geomorfologicamente como escarpas festonadas com declividade variando entre 50% e 100%, onde predominam principalmente Cambissolos. Essas características são encontradas nas sub-bacias Gomerai e Taquaral. Por apresentarem uma vulnerabilidade muito alta, a presença da floresta é essencial na disponibilidade de água com quali-quantitativa, sobretudo nos períodos de estiagem, além de diminuir o potencial de movimentos de massa. Estes aspectos serão

essenciais para elaboração da proposta econômico-ambiental e das intervenções para estas localidades, uma vez que o enfoque será a conservação.

Na região da sub-bacia do *Médio Ribeirão Guaratinguetá*, as áreas consideradas com alta vulnerabilidade foram identificadas nos locais com maior declividade (entre 30% e 50%). O uso do solo predominante nestas áreas é a pastagem, devido ao seu relevo acidentado.

As áreas identificadas com baixa até média vulnerabilidade se concentraram na região do Baixo Guaratinguetá e ao Sul do Médio. Essa região tem como principal uso a produção agrícola e pecuária, principalmente devido a sua geomorfologia de áreas planas a levemente onduladas. Entremeadas a estas regiões da bacia também são observadas, muito comumente, atividades voltadas para a produção do arroz (rizicultura), às margens do Ribeirão Guaratinguetá.

Na área de estudo ainda foram identificadas uma grande quantidade de APP's hídricas – quantificadas em aproximadamente 1890 hectares – com vulnerabilidade média/alta e que se encontram desmatadas (irregulares). Essa vegetação apresenta grande importância para a qualidade do ecossistema, principalmente relacionada à qualidade da água (TUNDISI & MATSUMURA-TUNDISI, 2010).

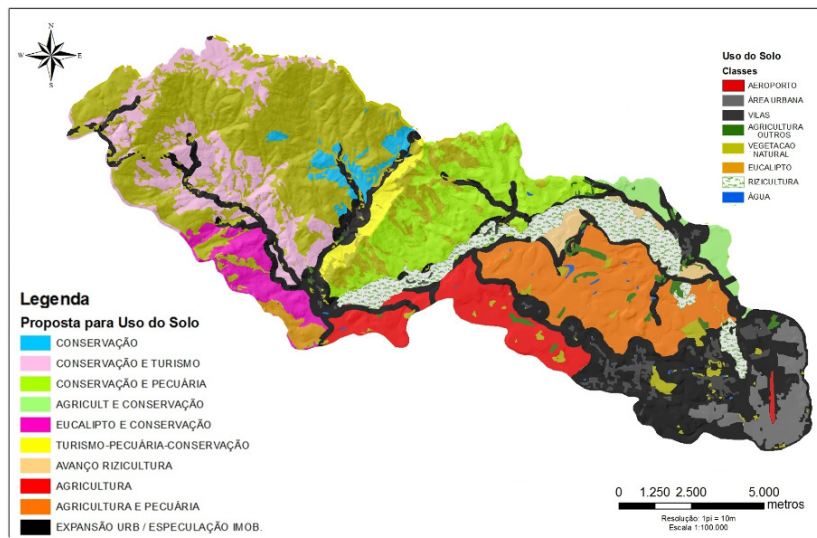


Figura 7 - Proposta econômico-ambiental para o uso do solo na bacia do ribeirão Guaratinguetá.

Na proposta econômico-ambiental, considerou-se que as regiões próximas as principais estradas sofrem, naturalmente, uma especulação imobiliária, principalmente devido ao avanço da expansão urbana. Desta forma, para as áreas que se localizam à 100m destas estradas supôs-se que há uma resistência dos proprietários em converter estas para a conservação e que, muito provavelmente, no futuro irão receber empreendimentos ou serem urbanizadas, fato já observado na dinâmica da bacia nos últimos anos.

A sub-bacia do ribeirão Taquaral pertence à zona de conservação, segundo o macrozoneamento realizado por Ferreira (2011). Na presente proposta econômico-ambiental, a região também deveria ser utilizada para conservação da mata nativa, principalmente devido à vulnerabilidade ambiental muito alta. Além disso, a presença de grandes fragmentos e o acesso dificultado colaboram para a conservação da bacia, assim como, uma menor quantidade de estradas (não-vecinais) que cortam esta região.

Além desta proposta para essa sub-bacia, existe também uma região integrando o turismo, a pecuária e a conservação (Fig.5). Esta região, é estratégica para conservação, já que permite o fluxo gênico de espécies entre fragmentos de mata nativa conservados. Do lado

esquerdo dessa região existe um grande fragmento de mata conservada, além da proposta de conservação acima citada. Do lado direito observa-se a presença de pequenos fragmentos, que podem ajudar na recomposição da vegetação na área.

A sub-bacia do ribeirão Gomerál também localiza-se no macrozoneamento de conservação, elaborado por Ferreira (2011) e apresenta vulnerabilidade muito alta. Entretanto, a região já apresenta atividades voltadas ao turismo, que são facilitadas pelo maior número de estradas com acesso facilitado ao alto da Serra da Mantiqueira e a Campos do Jordão. Desta forma, foi considerada como proposta para uso do solo desta região o turismo, além da conservação (Fig.5). Além disso, na porção sul desta sub-bacia do Gomerál foi proposta a expansão da silvicultura do eucalipto e também conservação (representada em roxo na Figura 7). Esta atribuição se deve ao fato de que já uma fazenda com o cultivo do eucalipto nestas localidades (em laranja claro na Figura 7, nos limites ao oeste da bacia) e, em direção a Noroeste, são observados vários fragmentos de mata nativa que poderiam ser interligados dependendo da disposição da Reserva Legal das propriedades que ali se encontram.

Para o Médio Ribeirão Guaratinguetá, em sua porção mais ao Centro-Norte, foi proposto utilizar o solo para a conservação e a agropecuária (em verde claro na Figura 7, praticamente no centro da bacia). A idéia é conservar os fragmentos de mata nativa que estão nas maiores altitudes sem deixar de promover a atividade econômica que se faz importante nestas áreas, uma vez que esta região já apresenta uma pecuária desenvolvida. No macrozoneamento elaborado por Ferreira (2011) esta região foi indicada, em sua grande maioria, para o uso agropecuário, o que está condizente com a proposta deste trabalho.

Na porção sul do médio Guaratinguetá foi proposta o uso do solo para a agricultura (em vermelho na Figura 5), já que a região apresenta baixa vulnerabilidade e o relevo constitui-se de áreas planas a colinas suaves, facilitando o uso de técnicas mecanizadas. Nas visitas a campo e pelo mapa de uso e ocupação do solo nota-se que esta é porção da bacia onde existem algumas atividades agrícolas, embora ainda não consolidadas em grande escala.

Permeando entre o Médio e o Baixo Guaratinguetá, um uso do solo notório é o cultivo de arroz pelo método de inundação e, portanto, distribuídas nas margens do Ribeirão Guaratinguetá. A proposta econômico-ambiental considera ainda que ocorra uma expansão deste tipo de cultura em uma pequena parte da sub-bacia (em rosa claro na Figura 7) por estarem em áreas inundáveis.

Para a região do Baixo Guaratinguetá, foi proposto, na sua região central, o uso do solo para a agricultura e pecuária (em laranja Figura 7). Esta região está inserida na zona de uso agrícola no macrozoneamento realizado por Ferreira (2011). Entretanto, a pecuária na região já está consolidada, o que indicaria também o potencial para este tipo de atividade, atentando-se para as práticas de proteção e conservação do solo.

A porção norte do baixo Guaratinguetá está inserida no macrozoneamento de uso agrícola, no trabalho elaborado por Ferreira (2011).

## **5. Considerações Finais**

Os produtos apresentados neste trabalho devem ser utilizados sempre em conjunto, da mesma forma que foram elaborados, pois as interrelações entre as atividades econômicas, sociais e ambientais devem sempre estar alinhadas para que todos os setores sejam atendidos de forma equilibrada. Com a vigência do Programa Produtor de Água estabelecido no município, estes setores já começam a se aproximar de forma espontânea, uma vez que estabelece um arranjo com múltiplas opções que podem beneficiar as partes envolvidas, a partir de um suporte financeiro voltado para estas ações. Como no Brasil a verba destinada a projetos ambientais ainda é pequena - perto da tamanha degradação observada em diversas regiões - as propostas apresentadas neste estudo permitem otimizar os recursos envolvidos para que as ações de conservação possam ser potencializadas.

É importante ressaltar que as análises apresentaram um déficit relevante quanto as Áreas de Preservação Permanente (APP's hídricas) na Bacia do Ribeirão Guaratinguetá, aproximadamente 1890ha, sendo estas as áreas que devem ser priorizadas para intervenção. Neste aspecto, ainda é possível identificar quais APP's estão em regiões mais vulneráveis para a proteção e manutenção da bacia, o que fornece subsídio para um melhor planejamento temporal das atividades que poderão ser desenvolvidas no futuro.

Por fim, o conjunto de informações compiladas provenientes de outros estudos, juntamente com os produtos específicos apresentados neste trabalho, apontam diversas características importantíssimas para qualquer tipo de planejamento que venha a ocorrer dentro da Bacia do Guaratinguetá e, ainda, podendo ser utilizado como referências para trabalhos similares em outros municípios e bacias que desejam realizar ações de conservação.

## 6. Referências Bibliográficas

Benessiuti, M. F. 2011. Estudo Dos Mecanismos De Instabilidade Em Solos Residuais De Biotita-Gnaiss Da Bacia Do Ribeirão Guaratinguetá. Dissertação de Mestrado. UNESP - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Guaratinguetá, 128p

Camarinha, p. I. M. ; Ferreira, c. C. ; Ferreira, m. C. ; Soares, p. V. ; Simoes, s. J. C. ; Trannin, I. C. B. 2011. **Uma proposta metodológica para a definição de corredores ecológicos com base em modelamento cartográfico. A bacia do rio Paraíba do Sul (Porção Paulista)**. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba. Anais do XV SBSR. São Paulo: TecArt Editora Ltd, v. 1. p. 1986-1996.

Ferreira, M.C. 2011. Proposta para o uso e manejo sustentável da bacia hidrográfica do ribeirão Guaratinguetá, SP. Dissertação de mestrado, UNESP, Bauru.

Ferreira, m. C. ; Trannin, i. C. B. ; Ferreira, c. C. ; Simões, s. J. C. . Sistema de informações geográficas aplicado à análise do uso e ocupação do solo em áreas de preservação permanente da bacia hidrográfica do ribeirão Guaratinguetá (SP). In: XV SBSR Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba. XV SBSR Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011.

Klingebiel, a. A.; Montgomery, p. H. **Land – capability classification**. Washington, D. C. USDA, 1961. 21p. (Agriculture Handbook 210) apud LEPSCH, I. F.; BELLINAZI JR., R.; BERTOLINI, D.; ESPÍNDOLA, C. R. 1991. Manual para Levantamento Utilitário do Meio Físico e Classificação de Terras no Sistema de Capacidade de Uso. 4a Aproximação. 2a edição. Campinas. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 175p.

Lepsch, I. F.; Bellinazi jr., R.; Bertolini, D.; Espíndola, C. R. 1991. **Manual para Levantamento Utilitário do Meio Físico e Classificação de Terras no Sistema de Capacidade de Uso**. 4a Aproximação. 2. ed.. Campinas. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 175p.

Montgomery, D.R.; Dietrich, W.E. 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, 30, p. 1153-1171.

Simões, s. J. C. ; Trannin, i.c.b. ; Bernardes, g. P. . Efeitos geológicos-geomorfológicos sobre a geomorfologia fluvial e sobre as inundações intensas em áreas rurais. A bacia do Ribeirão Guaratinguetá, Vale do Paraíba, SP. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009, Campo Grande. Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009.

Soares, P.V. 2005. **As interrelações de elementos do meio físico natural e modificado na definição de áreas potenciais de infiltração na porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul**. 169f. Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas.

Tomlin, D. 1990. **Geographic information systems and cartographic modeling**. New York, Prentice Hall, 362p.