



Estimativa da produção de sedimentos em função da mudança de uso e cobertura do solo¹

Caroline A. Galharte², João M. Villela³ & Silvio Crestana⁴

¹ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada à Universidade de São Paulo, com bolsa do CNPq

² USP, São Carlos, SP. E-mail: carol.galharte@gmail.com (Autor correspondente)

³ USP, São Carlos, SP. E-mail: jomarville@hotmail.com

⁴ Embrapa CNPDIA, São Carlos, SP. E-mail: silvio.crestana@embrapa.br

Palavras-chave:

mudança da paisagem
agricultura
modelagem
simulação
erosão do solo

RESUMO

Os processos de mudança de uso e cobertura do solo despertam grande preocupação quanto a se compreender e melhor planejá-los a fim de evitar impactos, como perda da biodiversidade, erosão do solo e contaminação dos recursos hídricos. O trabalho propõe estimar a produção de sedimentos em cenários da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas, localizada no município de São Carlos, SP. Para isto foi aplicado o modelo de simulação espacial CLUE-S (Conversion of Land Use and its Effects at Small Region Extent), com o objetivo de gerar cenários para o ano de 2025 da área de estudo. A posteriori, foi estimada a produção de sedimentos desses cenários com o auxílio do modelo de simulação SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Dois cenários foram simulados: expansão da cana-de-açúcar e expansão da laranja. Por meio das diferentes demandas por áreas inseridas no CLUE-S foi possível gerar cenários da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas para o ano de 2025 e, com o auxílio do SWAT, estimar a produção de sedimentos nos diferentes usos do solo e verificar que a cultura da cana-de-açúcar de variedades RB72-454, CTC6 e CTC11 e do híbrido entre *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* foi mais significativa.

Key words:

changing landscape
agriculture
modeling
simulation
soil erosion

Sediment yield estimation due to changes in land use and cover

ABSTRACT

The processes of land use change and land cover arouse great concern in understanding and better planning to avoid impacts such as loss of biodiversity, soil erosion and contamination of water resources. This paper proposes to estimate the sediment yield scenarios in the watershed of the creek Guabiobas, located in the municipality of São Carlos, SP. For this, the spatial simulation model CLUE-S (Conversion of Land Use and Its Effects at small Extent region) was used, with the goal of generating scenarios for the year 2025 of the study area. Subsequently, the sediment yield was estimated for these scenarios with the help of the simulation model SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Two scenarios were simulated: expansion of sugarcane and orange. Through the different demands for areas inserting in CLUE-S, it was possible to generate scenarios in the watershed of the creek Guabiobas for the year 2025 and, with the use of SWAT to estimate sediment yield under different land uses and to verify that the crop of sugarcane varieties RB72-454, CTC6 and CTC11 and hybrid of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla* were more significant.

INTRODUÇÃO

Devido às incertezas no desenvolvimento econômico, político e social, o futuro do uso do solo é considerado desconhecido. Ainda que não seja possível a previsão do mesmo, a construção de cenários possibilita explorar próximos acontecimentos (Rounsevell et al., 2005).

Os cenários gerados por meio de simulação possibilitam compreender os possíveis impactos e planejar melhor as mudanças de uso e cobertura do solo com o intuito de proporcionar um impacto ambiental menor e, conseqüentemente, uma produção mais sustentável (Kok, 2009).

A geração de cenários através da modelagem envolvendo a mudança da paisagem configura importante fonte de

informação para auxiliar na gestão ambiental e no planejamento do uso do solo podendo, portanto, subsidiar políticas públicas e evitar impactos como: deterioração dos recursos hídricos, mudanças climáticas e degradação do solo (Turner et al., 2007).

A erosão do solo é a principal causa da degradação das terras agrícolas e uma ameaça à integridade dos ecossistemas aquáticos devido aos processos de desprendimento e arraste das partículas do solo por meio da ação do vento (erosão eólica) e da água (erosão hídrica) (Bertoni & Lombardi Neto, 1999).

Segundo Souto & Crestana (2000), os problemas derivados da erosão hídrica podem ser de distintas grandezas. Em locais onde ocorrem os processos erosivos observa-se a perda da capacidade produtiva, em conseqüência da remoção dos horizontes superficiais; além disso, os excedentes hídricos

que chegam até a rede de drenagem da bacia hidrográfica transportam sedimentos, nutrientes e agroquímicos que contaminam as águas superficiais.

Por meio da quantidade de sedimentos transportada pelos rios é possível verificar as características e o estado da bacia hidrográfica. Isto possibilita o planejamento e o aproveitamento dos recursos hídricos da região na qual a bacia hidrográfica está inserida (Xavier, 2009).

Vale ressaltar que as mudanças de uso e cobertura do solo surgem, de modo geral, de acordo com as necessidades e padrões impostos pela economia global que têm diferentes efeitos nos ecossistemas e na sociedade. Assim, analisar as possíveis alterações na paisagem e seus impactos constitui uma tarefa complexa sendo cada vez mais importante o desenvolvimento de pesquisas que mensurem com acurácia a magnitude das alterações no uso e na cobertura do solo.

De acordo com Verburg & Veldkamp (2004) e Verburg et al. (2006), o uso da modelagem espacial representa uma importante ferramenta para avaliar cenários de mudanças de curto e longo prazo, sendo útil na tomada de decisões em diversos níveis de estudo. O arcabouço CLUE-S (Conversion of Land Use and its Effects at Small Regional Extent) é um software que tem, como principal inovação, a possibilidade de simular dinamicamente múltiplos usos da terra por meio da competição entre as classes de uso em escala local e regional (Verburg et al., 1999).

O modelo hidrossedimentológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool), que apresenta interface com o ArcGIS®, software de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), foi desenvolvido para simular o impacto das atividades agrícolas na qualidade das águas superficiais (Arnold et al., 1998).

De acordo com Portela et al. (2011), o aprimoramento nas pesquisas relacionadas aos estudos hidrossedimentológicos associados à erosão hídrica do solo gera grandes benefícios pois possibilita maior preservação do ambiente, conservação do solo e da água sobre as terras agrícolas de modo mais eficaz e maior lucratividade da lavoura para o produtor rural.

A combinação dos modelos CLUE-S e SWAT possibilita avaliar a produção de sedimentos em diferentes cenários. O objetivo do presente trabalho é estimar a produção de sedimentos por meio de modelo de simulação, em cenários do ano de 2025 da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas, cujo Cenário 1 apresenta a expansão da cultura da cana-de-açúcar de variedades RB72-454, CTC6 e CTC11 e o Cenário 2 no qual ocorreu a expansão da cultura da laranja, devido às demandas geradas por meio de regressão linear. Assim, pode-se verificar o cenário mais impactante.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo é a Microbacia Hidrográfica do Ribeirão das Guabiobas (MBH-G), localizada na região central do Estado de São Paulo, nos municípios de São Carlos, Luiz Antônio, Rincão, Santa Lúcia e Américo Brasiliense (Figura 1). O clima da região na qual a MBH-G está inserida, segundo a classificação de Köppen,

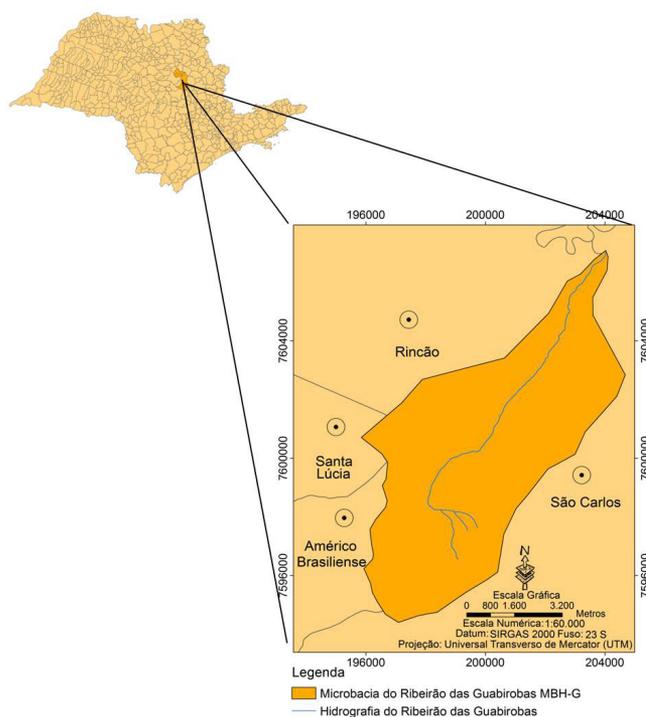


Figura 1. Localização da área de estudo microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas no Estado de São Paulo

é do tipo Cwa (Rolim et al., 2007), isto é, temperado quente com inverno seco. A estação seca vai de abril a setembro e a estação chuvosa de outubro a março. A temperatura média anual é em torno de 24 °C e a média anual da precipitação de 1400 mm.

O Ribeirão das Guabiobas é o único curso d'água a drenar a MBH-G, que percorre longitudinalmente a maior parte da microbacia até desaguar na planície de inundação do rio Mogi-Guaçu que, por sua vez, pertence à Bacia Hidrográfica do Rio Paraná, a qual abrange boa parte das regiões sudeste, centro-oeste e sul do Brasil (Minoti et al., 2011).

É importante ressaltar que a escolha da MBH-G se deve ao fato de possuir, em seu uso e cobertura do solo, as principais culturas representativas do estado de São Paulo, isto é, cana-de-açúcar com as variedades RB72-454, CTC6 e CTC11 e laranja, além de áreas de pastagem e da silvicultura com o cultivo do híbrido entre *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. Assim, os resultados podem gerar extrapolações para todo o estado de São Paulo.

A MBH-G ocupa uma área de 5146 ha e atualmente é composta por 2876 ha com cana-de-açúcar, 1417 ha com laranja, 233 ha com eucalipto, 111 ha com pastagem, 473 ha com vegetação natural e 36 ha com avicultura. Para a confecção do mapa de uso e cobertura do solo foi usada uma imagem do sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) a bordo do LandSat-7, de 11 de março de 2005, adquirida do catálogo de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para classificação/interpretação visual e realizadas viagens a campo com o intuito de melhorar o conhecimento da área e fazendo a verificação da classificação com possíveis correções,

quando necessário, da classificação do mapa. Os solos que predominam na área de estudo são os Latossolos - Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico (LVAd), Latossolo Vermelho Distrófico (LVw) e Latossolo Vermelho Eutroférico (LVef) - restando 1% de área ocupada com a associação Gleissolos e Cambissolos.

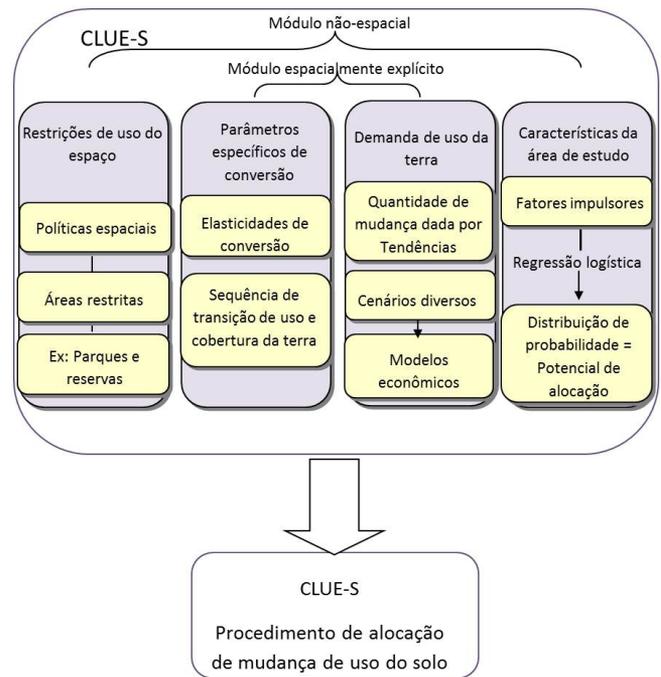
Para realizar a simulação da mudança de uso e cobertura do solo do modelo CLUE-S foi necessário montar um banco de dados que levou em consideração fatores biofísicos e socioeconômicos relevantes para área de estudo (Verburg et al., 2002). As variáveis adotadas no presente foram: Mapa de uso e ocupação de 2005 da MBH-G, densidade populacional rural, renda per capita, distância a estradas, distância a rios, distância a usinas, custo da distância a usinas, hipsometria, classes de solo, temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação. Ressalta-se que os fatores que influenciam na mudança de cada uso e cobertura do solo (variáveis dependentes) são denominados fatores explanatórios ou variáveis independentes; os dados foram gerados na interface ArcView versão 9.3 na escala de 1:250.000.

De acordo com Verburg et al. (2002), o modelo é subdividido em dois módulos distintos, denominados: módulo de demanda não espacial e módulo de alocação espacialmente explícita. No módulo não espacial é calculada a mudança de área para todos os tipos de uso do solo de forma agregada. Sendo assim, para ocorrer o aumento da área de um tipo de uso é necessário que um ou os demais tipos de usos diminuam. Os resultados desse módulo devem determinar a área coberta pelos diferentes tipos de uso e cobertura do solo ao longo do tempo (geralmente, ano a ano), que são valores de entrada do módulo de alocação. No módulo espacial ocorre a simulação enquanto as demandas são alocadas espacialmente no plano celular; o processo de alocação envolve uma combinação de modelagem dinâmica, análise espacial e empírica. Os módulos espacial e não espacial do CLUE-S estão divididos em dois submodelos, Figura 2; assim, o CLUE-S possui quatro categorias.

As categorias do modelo CLUE-S são: Características da área de estudo, Políticas e restrições de uso do espaço, Parâmetros específicos de conversão e Demanda de uso da terra (Verburg et al., 2002).

1. Características da área de estudo que se baseiam nas condições biofísicas e socioeconômicas de um local para verificar a probabilidade relativa de alocação dos diferentes tipos de uso. Geralmente a preferência de um tipo de uso da terra em determinado tempo propicia as conversões desse uso do solo frente aos demais usos possíveis existentes na área de estudo. Para calcular tal preferência utiliza-se o método estatístico regressão logística que possibilita a avaliação dos fatores que influenciam na mudança de uso do solo e em quais extensões afetam a localização de usos do solo na área de análise.

No diretório do modelo CLUE-S existe um módulo de conversão File convert que auxilia na transformação dos arquivos ASCII para um formato tabular, possibilitando seu uso diretamente em pacotes estatísticos, como o software SPSS



Fonte: Adaptado de Verburg & Veldkamp (2004)

Figura 2. Visão geral dos módulos que compõem o fluxo de informações no modelo CLUE-S

(Statistical Package for the Social Sciences) para realizar a análise de regressão logística.

2. Políticas e restrições de uso do espaço que definem as áreas onde as mudanças do uso do solo possuem algumas restrições parciais ou totais. Ressalta-se que no modelo CLUE-S as localidades são convertidas para o tipo de uso do solo com maior probabilidade acatando um mapa de distribuição dessa probabilidade para cada tipo de uso da terra.

3. Parâmetros específicos de conversão, que definem a dinâmica temporal das mudanças de uso da terra. Para isto, o modelo possui dois parâmetros: elasticidade e a sequência de transição. A elasticidade de conversão refere-se à facilidade ou não de determinado uso da terra ser convertido em outro uso, levando em consideração o tempo, o custo da conversão e a facilidade da mudança de localização quando sua área se torna mais adequada para outro tipo de uso do solo.

A sequência de transição determina, para cada uso do solo, as possíveis conversões de uso, tal como seu tempo mínimo e máximo de permanência.

4. Demanda de uso da terra: descreve possíveis cenários da evolução temporal de cada classe do uso do solo em unidades de área, ou seja, a demanda define a quantidade de área a ser alocada para cada classe a cada ano.

Essas categorias compõem o fluxo de informações e criam juntas, uma série de condições e possibilidades para as quais o modelo calcula a melhor solução por meio de um procedimento iterativo. Após a introdução de fatores biofísicos e socioeconômicos, assim como a demanda por área de cada uso e cobertura do solo e a indicação das áreas de restrição, o modelo pode realizar a simulação espacial de mudanças de uso da terra integradas (Zhang et al., 2011).

O processo de alocação espacial é determinado pelas seguintes etapas (Verburg & Veldkamp, 2004):

1) Determinação das células que podem sofrer conversões. O processo de alocação espacial não considera áreas com restrições espaciais e células que estão em uma localidade onde a conversão não é permitida de acordo com a matriz de conversão.

2) Cálculo das probabilidades totais para cada uso do solo.

3) Alocação preliminar. É realizada uma alocação preliminar com um valor igual da variável de iteração para todas as classes de uso do solo e alocando a classe com maior probabilidade total para a célula considerada.

4) Comparação entre área alocada e a demanda agregada. Para cada classe de uso do solo se compara área total alocada com sua respectiva demanda agregada.

5) Iteração. As etapas de 2 a 4 serão repetidas até que as demandas do uso do solo sejam obtidas.

Este processo pode prever e simular a expressão espacial de mudanças de terra em um período de até 20 anos. De acordo com Neitsch et al. (2002), o modelo SWAT apresenta os seguintes componentes: clima, ciclo hidrológico, cobertura do solo e crescimento de plantas, erosão, nutrientes e pesticidas e práticas de manejo.

Segundo Minoti et al. (2011), o balanço hídrico é a força que conduz todos os processos simulados pelo SWAT. A simulação hidrológica da bacia hidrográfica é separada em duas grandes divisões: na fase terrestre do ciclo hidrológico e na fase aquática.

A fase terrestre controla a quantidade de água e as cargas de sedimento, nutrientes e pesticidas que atingem o canal principal de cada sub-bacia. A fase aquática está relacionada ao movimento de água, sedimentos, entre outros, pela rede de canais, em direção à saída da bacia hidrográfica.

Inicialmente, para a simulação, o SWAT demanda o modelo Digital de Elevação (MDE) e a máscara da bacia hidrográfica para realizar o delineamento da mesma. Conseqüentemente, a bacia é dividida em sub-bacias com base no número de tributários.

A próxima etapa é inserir o mapa de uso e cobertura do solo e mapa de pedologia para que o último passo da subdivisão ocorra.

Conforme Neitsch et al. (2002), as informações de entrada para cada sub-bacia são agrupadas em Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's) baseadas no tipo de solo, uso e cobertura do solo e em classes de declividade preservando a homogeneidade permitindo maior discretização do modelo na área simulada a fim de identificar áreas mais vulneráveis.

Os dados de solo e os climáticos são as próximas informações demandadas pelo modelo para realizar a simulação.

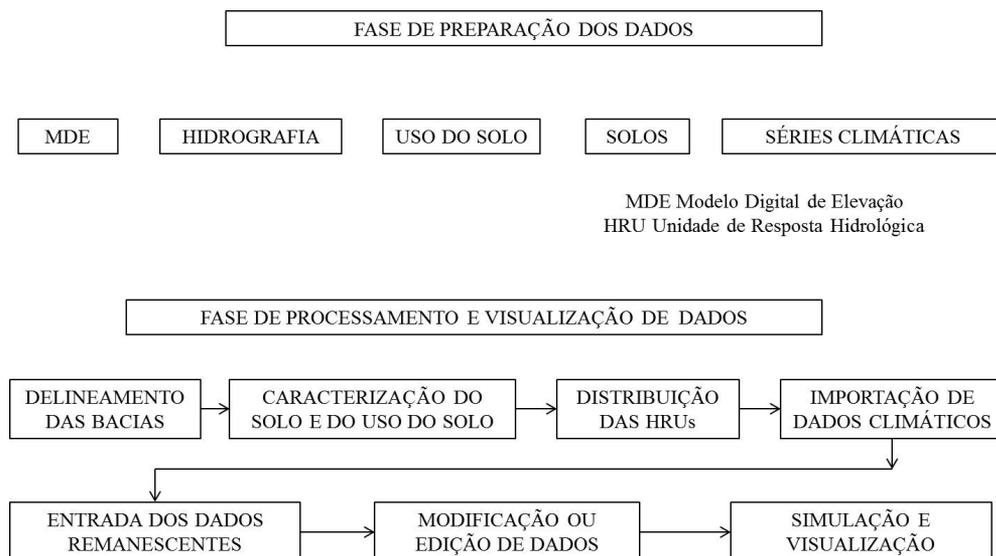
O perfil de solo pode ser subdividido em até dez camadas do solo sendo que para cada camada deve-se informar os respectivos parâmetros: grupo hidrológico; máxima profundidade da raiz no perfil do solo; profundidade das camadas de solo; densidade; capacidade de água disponível; teor de carbono orgânico; condutividade hidráulica saturada; teores de argila, silte, areia e fragmentos de rocha; albedo e fator erodibilidade do solo.

Os dados climáticos demandados pelo modelo SWAT são mensais e diários, como: temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa.

Na Figura 3 é apresentado um fluxograma ilustrando as etapas realizadas para a manipulação do modelo SWAT.

O modelo matemático SWAT foi utilizado com o objetivo de prever o impacto das práticas de manejo do solo sobre a produção de sedimentos na MBH-G, que possui diferentes tipos, usos e manejos de solo, durante o período de 20 anos, que corresponde ao cenário gerado pelo modelo CLUE-S.

Para simular foi necessário o Modelo Digital de Elevação (MDE) que utilizou, como base de informação, carta topográfica elaborada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), mapa de uso e cobertura do solo, pedologia, hidrografia, parâmetros para cada tipo de solo e dados meteorológicos diários de 1991 a 2011 sobre precipitação, temperatura máxima



Fonte: Minoti et al. (2011)

Figura 3. Fluxograma ilustrativo das etapas realizadas na manipulação do modelo SWAT

e mínima, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento, fornecidos pela Embrapa Pecuária Sudeste, localizada no município de São Carlos, SP. Vale ressaltar que o dado de entrada mapa de uso e cobertura do solo utilizado no modelo SWAT, foram os dois cenários gerados pelo modelo CLUE-S. Assim, diferentes cenários possibilitaram gerar diferentes estimativas de produção de sedimentos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao realizar a regressão logística com os usos e cobertura do solo da MBH-G, verificou-se que os fatores explanatórios (variáveis independentes) do CLUE-S que influenciaram na probabilidade de alocação do uso e cobertura da MBH-G foram custo da distância a usinas, densidade populacional rural, distância a rios, hipsometria, renda per capita, temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação; assim, as áreas com maior probabilidade para alocação dos usos e cobertura apresentavam menores distâncias às usinas, menor densidade populacional, maior distância a rios, com média de temperatura mínima de 18 °C, média de temperatura máxima de 31 °C e precipitação de 1200 mm.

Para a simulação no modelo CLUE-S, com base no Código Florestal Federal, no qual se considera mata ciliar como área de preservação permanente (Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012) e visando à sustentabilidade da área de estudo, decidiu-se por considerar que a área de vegetação natural deveria se manter a mesma; já quanto ao uso avicultura, que ocupava uma área muito pequena na MBH-G e a maior parte da propriedade pertencia à outra microbacia hidrográfica vizinha à área de estudo, optou-se por mantê-la constante durante todo o período simulado.

As demandas por áreas inseridas no modelo CLUE-S foram geradas por meio de regressão linear utilizando-se o programa Excel 2010; para isto foram elaborados mapas de uso e ocupação da MBH-G baseados em imagens de satélite LandSat-7 fornecidas pelo INPE com o objetivo de obter informações do histórico do uso e ocupação da área de estudo, desde 1988 até 2011.

A primeira demanda requereu 3447 ha de cana-de-açúcar com variedades RB72-454, CTC6 e CTC11, 236 ha do *E. grandis* e *E. urophylla*, 954 ha de laranja, 473 ha de vegetação nativa e 36 ha de avicultura, o que gerou o Cenário 1 da MBH-G de 2025, utilizando-se dos dados amostrais de 1988 a 2011; a segunda demandou 2089 ha de cana-de-açúcar com as variedades RB72-454, CTC6 e CTC11, 65 ha do *E. grandis* e *E. urophylla*, 2483 ha de laranja, 473 ha de vegetação nativa e 36 ha de avicultura, que gerou o Cenário 2 da MBH-G de 2025; esta demanda utilizou-se dos dados amostrais de 2005 a 2011; enfim, a área de vegetação nativa e a área de avicultura são as mesmas, pois ambas são áreas de restrição nas quais não ocorrem mudanças.

As diferentes demandas por áreas possibilitaram a geração de dois cenários pelo modelo CLUE-S. Ao analisar o Cenário 1

(Figura 4A) e o Cenário 2 (Figura 4B) da MBH-G gerados pelo CLUE-S e compará-los com o mapa da MBH-G de 2005 (Figura 4C), nota-se que no Cenário 1 ocorreu expansão da cana-de-açúcar em detrimento da cultura da laranja, da pastagem e do eucalipto e que a pastagem desapareceu completamente; apesar disto percebe-se que a cultura da cana-de-açúcar (variedades RB72-454, CTC6 e CTC11) não dominou todos os usos mas competiu diretamente com a cultura da laranja, tanto que é perceptível a expansão da cultura da laranja em área que outrora fora cana-de-açúcar. Além disto, a laranja também se expandiu em área de *E. grandis* e *E. urophylla*, mesmo que de forma mais modesta.

Diferente do primeiro cenário da MBH-G nota-se, ao comparar o Cenário 2 com o mapa da MBH-G de 2005, que não ocorreu expansão da cultura da cana-de-açúcar; a cultura da laranja se expandiu sobre a cana-de-açúcar (variedades RB72-454, CTC6 e CTC11), o *E. grandis* e *E. urophylla* e a pastagem, que novamente desapareceu por completo; esta tendência de expansão significativa da cultura da laranja na MBH-G é devida sobremaneira ao fato de que em 2007 uma propriedade inserida na microbacia, na qual se cultivava cana-de-açúcar, foi vendida e nesta área se iniciou o cultivo da laranja; como para a demanda

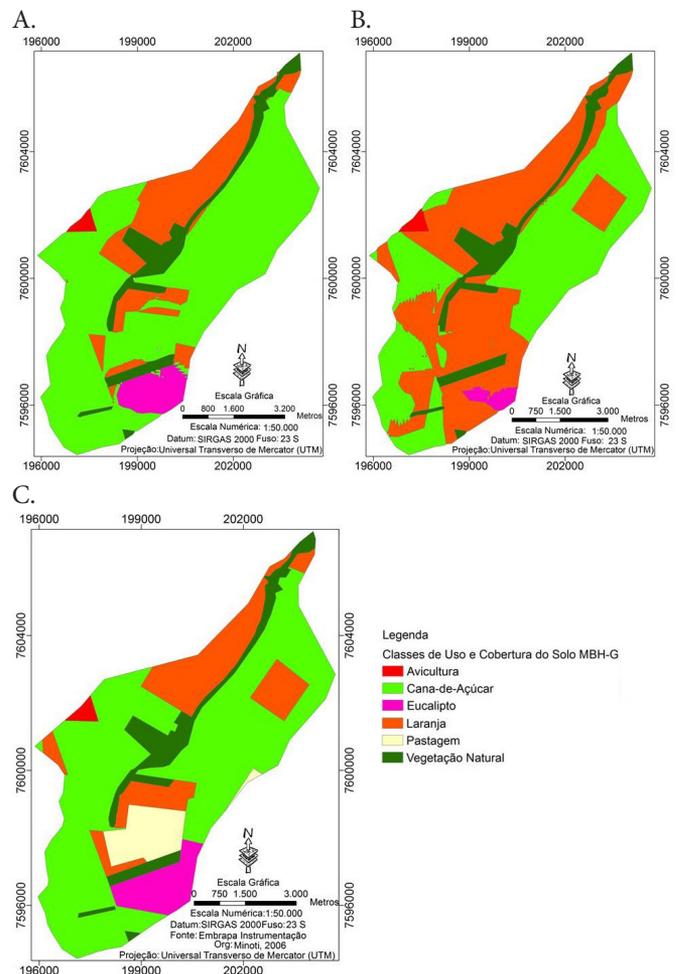


Figura 4. Mapa de uso e ocupação da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas: Cenário 1 (A), Cenário 2 (B) e mapa de uso e ocupação de 2005

deste cenário se utilizaram os dados amostrais de 2005 a 2011, gerou-se esta tendência.

O mais marcante ao analisar os dois cenários da MBH-G é a influência da demanda na formação de cenários distintos, além de que a competição entre os tipos de uso do solo difere entre os dois cenários; no primeiro cenário a cana-de-açúcar (variedades RB72-454, CTC6 e CTC11) se alocou em área de pastagem e no segundo com a laranja que competiu diretamente com a pastagem embora a cana-de-açúcar se tenha alocado em uma pequena área de pasto.

Observa-se que na simulação a expansão da cana-de-açúcar sobre a área de pastagem corresponde à realidade brasileira, tanto que Novo et al. (2010), Rudorff et al. (2010) e Wilkinson & Herrera (2010) afirmaram que a expansão da cana-de-açúcar em todo o território nacional é notória, ocorrendo principalmente sobre pastagens.

Rudorff et al. (2010) são mais específicos em relação às áreas sobre as quais a cana-de-açúcar se está expandindo haja vista que na safra 2008/2009 houve a expansão de 1,3 milhão de hectares de cana-de-açúcar, em que 56% da área expandida pela cultura ocorreu sobre área de pastagem, 40% sobre áreas agrícolas com culturas anuais e 3% sobre área com laranja e vegetação.

Por meio do modelo CLUE-S foi possível verificar fatores biofísicos, sociais e econômicos, associados à demanda por área que influenciam na mudança do uso e cobertura do solo, tanto em área de fronteira ou até áreas não atendidas pela cultura; mesmo assim, as mudanças no padrão tecnológico, juntamente com o aumento do nível de investimento e retorno por unidade de área, estabelecem novas etapas na expansão da fronteira agrícola.

Esses dois cenários serviram de dados de entrada para o modelo SWAT a fim de fornecer uma avaliação do potencial impacto das mudanças de uso do solo nos diferentes cenários.

Os cenários da MBH-G foram divididos automaticamente em 19 sub-bacias, cada uma com áreas distintas pois é possível observar as diferenças nas suas características hidrológicas em virtude dos diferentes tipos ou usos do solo nas diversas áreas da bacia hidrográfica. A posteriori, as informações de entrada para cada sub-bacia são agrupadas em Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's) baseadas no tipo de solo, uso e cobertura do solo e em classes de declividade preservando a homogeneidade.

Na Figura 5A e na Figura 5B são apresentados os mapas de distribuição da produção de sedimentos do Cenário 1 e Cenário 2, respectivamente, simulados para a MBH-G com o intuito de comparar os resultados obtidos pelo SWAT.

Ao analisar os dois cenários nota-se que a produção de sedimento é maior no Cenário 1, embora algumas sub-bacias apresentem os mesmos valores para ambos os cenários.

O valor médio da produção de sedimentos nas sub-bacias da MBH-G, Cenário 1 obtido pelo modelo SWAT, foi de 0,049 t ha⁻¹ por ano e no Cenário 2, o valor médio da produção de sedimentos foi de 0,024 t ha⁻¹ por ano.

Ao realizar a comparação entre as sub-bacias dos cenários da MBH-G, foi possível notar que das 19 sub-bacias 8 possuem

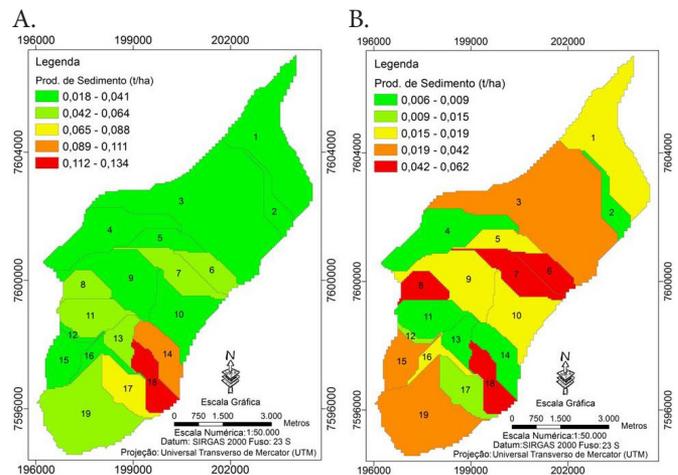


Figura 5. Mapas de distribuição da produção de sedimentos do Cenário 1 (A) e Cenário 2 (B) da MBH-G

valores próximos e 11 possuem valores distintos. Com isto verifica-se a influência do uso do solo no resultado final do SWAT uma vez que nessas 8 sub-bacias, que são: 3, 5, 6, 7, 9, 10, 15 e 16 os usos do solo são praticamente os mesmos para dois cenários da MBH-G. Nas sub-bacias 1, 2, 4, 8, 11, 12, 13, 14, 17, 18 e 19, os usos do solo são diferentes para os dois cenários. Tal análise é possível com a verificação das HRU's em cada um dos cenários; é oportuno ressaltar que o Cenário 1 possui 48 HRU's e o Cenário 2 50 HRU's.

As sub-bacias 1, 2, 4, 8, 11, 12, 13, 14, 17, 18 e 19 do Cenário 1 possuem valores maiores para a produção de sedimentos do que as do Cenário 2.

Com a análise dos números de HRU's em cada sub-bacia dos cenários foi possível notar que aumentou 1 HRU nas sub-bacias 1, 2, 8 e 12; aumentaram 2 HRU's na sub-bacia 19, diminuiu 1 HRU nas sub-bacias 11 e 17 e diminuíram 2 HRU's na sub-bacia 14 do Cenário 2 em relação ao Cenário 1.

Com a análise dos usos de cada uma das HRU's das sub-bacias dos cenários observou-se que nas sub-bacias 1, 2, 8, e 12 aumentou 1 HRU de laranja e na sub-bacia 19 aumentaram 2 HRU's de laranja; nas sub-bacias 11 e 17 diminuiu 1 HRU de cana-de-açúcar; na sub-bacia 14 diminuiu uma HRU de cana-de-açúcar e outra de eucalipto; nas sub-bacias 4, 13 e 18 uma HRU's passou de cana-de-açúcar para laranja no Cenário 2 em relação ao Cenário 1. É imprescindível ressaltar que na sub-bacia 14 a perda da HRU de eucalipto influenciou nos valores da produção de sedimentos.

É possível, assim, afirmar que, segundo a simulação realizada com o modelo SWAT e comparação do uso do solo dos cenários, pode-se estimar que a cultura da cana-de-açúcar (variedades RB72-454, CTC6 e CTC11) e do *E. grandis* e *E. urophylla* propiciou maior produção de sedimentos quando comparada com a cultura da laranja resultado este representativo porque tanto as variáveis de cana-de-açúcar quanto a espécie de eucalipto avaliadas neste estudo são cultivadas em significativa área do estado de São Paulo.

A variedade RB 72-454 cultivada nas principais regiões canavieiras do Brasil apresenta excelente adaptação a solos de

baixa fertilidade, alto potencial produtivo, de maturação média a tardia, boa brotação de soqueira e resistência a algumas doenças foliares (PLANALSUCAR, 1987). Assim como a variedade RB72-454, a variedade CTC11 tem maturação média a tardia e ótima para colheita mecanizada. De acordo com Ferreira et al. (2010) a variedade CTC6 é tolerante aos danos foliares causados pela aplicação de herbicidas e se destaca pelo porte ereto e alta produtividade agrícola.

Segundo Carvalho & Nahuz (2001), o objetivo do cruzamento das espécies *E. Grandis* com *E. Urophylla* almejou obter plantas com bom crescimento, característica do *E. Grandis* e um leve aumento da densidade da madeira além de melhorias no rendimento e nas propriedades físicas da celulose, características do *E. Urophylla*. As estimativas observadas na MBH-G são concomitantes com o proposto por Bertoni & Lombardi Neto (1999), que determinaram uma perda média de solo para diversas culturas no Estado de São Paulo, sendo que para a cultura da cana-de-açúcar essa média era de 12,4 t ha⁻¹ por ano, para pastagem era de 0,4 t ha⁻¹ por ano, para reflorestamento era de 0,9 t ha⁻¹ por ano, para laranja a média era 0,9 t ha⁻¹ por ano e para milho a média era 12 t ha⁻¹ por ano.

Vale ressaltar que a perda do horizonte superficial do solo gera grande impacto pois em geral é a camada mais fértil e rica em matéria orgânica. Assim, a cobertura vegetal tem papel relevante no controle da erosão e na redução das perdas de matéria orgânica e nutrientes por meio de sedimento (Martins Filho et al., 2009).

Weill & Sparovek (2008), realizaram um estudo com o objetivo de verificar indicadores para avaliação do impacto da erosão na qualidade do solo em sistemas de produção agrícola para serem aplicados como ferramenta de planejamento na interpretação da tolerância de perda de solo em áreas agrícolas e observaram que a cultura da cana-de-açúcar era o uso que exercia maior pressão sobre a qualidade do solo na área de estudo sendo que em 99% da área ocupada com a cultura as taxas de perda de solo superaram a taxa de sua renovação, caracterizando a degradação deste recurso.

O modelo SWAT proporciona estimativas de onde e quando a produção de sedimentos pode ocorrer. Com tais resultados é possível tomar medidas de conservação para controlar mais efetivamente a perda de sedimentos; entretanto, precauções devem ser tomadas em relação à interpretação quantitativa dos resultados visto que se deve direcionar maior atenção aos resultados qualitativos (Machado & Vettorazzi, 2003).

CONCLUSÕES

1. O modelo de simulação espacial CLUE-S possibilitou simular cenários em função da mudança do uso do solo na microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas, a partir de fatores socioeconômicos e biofísicos, no período de 20 anos.

2. As diferentes demandas por áreas geradas a partir de dados históricos de uso e ocupação do solo da área por meio

de regressão linear influenciaram diretamente nos resultados dos cenários.

3. Utilizando o modelo SWAT foi possível estimar que a cultura da cana-de-açúcar de variedades RB72-454, CTC6 e CTC11 e do eucalipto híbrido entre *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, nos cenários da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas gerados pelo CLUE-S, propiciam maior produção de sedimentos quando comparadas com a cultura da laranja, ilustrando claramente a dependência do uso e a cobertura do solo com a produção de sedimentos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Doutorado; ao Programa de Pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, EESC-USP e à Embrapa Instrumentação Agropecuária (CNPDia).

LITERATURA CITADA

- Arnold, J. G.; Srinivasan, R.; Muttiah, R. S.; Williams, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, v.34, p.73-89, 1998.
- Bertoni, J.; Lombardi Neto, F. *Conservação do solo*. 2.ed. São Paulo: Ícone, 1999. 355p.
- Carvalho, A. M.; Nahuz, M. A. R. Valorização da madeira do híbrido *Eucalyptus grandis x urophylla* através da produção conjunta de madeira serrada em pequenas dimensões, celulose e lenha. *Scientia Forestalis*, v.59, p.61-76, 2001.
- Ferreira, R. R.; Oliveira, F. T. R.; Delite, F. S.; Azevedo, R. A.; Nicolai, M.; Carvalho, S. J. P.; Christoffoleti, P.J.; Figueira, A. Tolerância diferencial de variedades de cana-de-açúcar a estresse por herbicidas. *Bragantia*, v.69, p.395-404, 2010.
- Kok, K. The potential of fuzzy cognitive maps for semi-quantitative scenario development, with an example from Brazil. *Global Environmental Change*, v.19, p.122-133, 2009.
- Machado, R. E.; Vettorazzi, C. A. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, p.735-741, 2003.
- Martins Filho, M. V.; Liccioti, T. T.; Pereira, G. T.; Marques Júnior, J.; Sanchez, R. B. Perdas de solo e nutrientes por erosão num Argissolo com resíduos vegetais de cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola*, v.29, p.8-18, 2009.
- Minoti, R. T.; Silva, F.; Lombradi Neto, F.; Koide, S.; Crestana, S. Application of models to estimate erosion, sediment production and future scenarios in two Brazilian tropical watersheds. In: *Conceptual and modelling studies integrated groundwater surface water and ecological systems*. IAHS-AISH Publication, 345, 2011. p.99-105.

- Neitsch, S. L.; Arnold, J. G.; Kiniry, J. R.; Williams, J. R.; King, K. W. Soil and water assessment tool - Theoretical documentation: Version 2000. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2002. 458p.
- Novo, A. L.; Jansen, K.; Slingerland, M.; Giller, K. Biofuel, dairy production and beef in Brazil: Competing claims on land use in São Paulo State. *Journal of Peasant Studies*, v.37, p.769-792, 2010.
- PLANALSUCAR - Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-Açúcar. RB72-454: Uma nova variedade de cana-de-açúcar para todo o Brasil. *Brasil Açucareiro*, v.105, p.8-18, 1987.
- Portela, J. C.; Cogo, N. P.; Amaral, A. J. do; Gilles, L.; Bagatini, T.; Chagas, J. P.; Portz, G. Hidrogramas e sedimentogramas associados à erosão hídrica em solo cultivado com diferentes sequências culturais, com diferentes condições físicas na superfície. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.225-240, 2011.
- Rolim, G. de S.; Camargo, M. B. P. de; Lania, D. G.; Moraes, J. F. L. de. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o Estado de São Paulo. *Bragantia*, v.66, p.257-533, 2007.
- Rounsevell, M. D. A.; Ewert, F.; Reginster, I.; Leemans, R.; Carter, T. R. Future scenarios of European agricultural land use II. Projecting changes in cropland and grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v.107, p.117-135, 2005.
- Rudorff, B. F. T.; Aguiar, D. A. de.; Silva, W. F. da; Sugawara, L. M.; Adami, M.; Moreira, M. A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat Data. *Remote Sensing*, v.2, p.1057-1076, 2010.
- Souto, A. R.; Crestana, S. Identificação das áreas potenciais de produção de sedimentos com o modelo AGNPS e técnicas de SIG em uma microbacia hidrográfica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.4, p.429-435, 2000.
- Turner, B. L.; Lambin, E.; Reenberg, A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v.104, p.20666-20671, 2007.
- Verburg, P. H.; Koning, G. H. J. de; Kok, K.; Veldkamp, A.; Bouma, J. A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use. *Ecological Modelling*, v.116, p.45-61, 1999.
- Verburg, P. H.; Rounsevell, M. D. A.; Veldkamp, A. Scenario-based studies of future land use in Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v.114, p.1-6, 2006.
- Verburg, P. H.; Soepboer, W.; Limpiada, R.; Espaldon, M. V. O.; Sharifa, M.; Veldkamp, A. Land use change modelling at the regional scale: the CLUE-S model. *Environmental Management*, v.30, p.391-405, 2002.
- Verburg, P. H.; Veldkamp, A. Projecting land use transitions at forest fringes in the Philippines at two spatial scales. *Landscape Ecology*, v.19, p.77-98, 2004.
- Weill, M. A. M.; Sparovek, G. Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP). II - Interpretação da tolerância de perda de solo utilizando o método do Índice de Tempo de Vida. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.815-824, 2008.
- Wilkinson, J.; Herrera, S. Biofuels in Brazil: Debates and impacts. *Journal of Peasant Studies*, v.37, p.749-768, 2010.
- Xavier, F. V. Contribuições metodológicas ao estudo da produção e distribuição espacial de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Manso utilizando o modelo AVSWAT 2009. Campo Grande: UFMT, 2009. 148p. Dissertação Mestrado
- Zhang, P.; Liu, Y.; Pan, Y.; Yu, Z. Land use pattern optimization based on CLUE-S and SWAT models for agricultural non-point source pollution control. *Mathematical and Computer Modelling*, p.1-8, 2011.