

## **SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DE FORMAS NITROGENADAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO GUAMIUM, PIRACICABA-SP**

*Eduardo Dutra de Armas*<sup>1\*</sup>; *Denise Santos da Silva*<sup>1</sup>; *Caio Villafanha Negro*<sup>2</sup>; *Guilherme Libardi Miraldo*<sup>2</sup>

**Resumo** – Nitrogênio é um dos contaminantes mais comuns em águas superficiais e subterrâneas, proveniente de fontes pontuais e difusas. O controle das fontes difusas é difícil, tanto pela identificação das áreas críticas ao aporte do nutriente, como pela gestão das atividades geradoras. A modelagem computacional é uma ferramenta preditiva que propicia a avaliação de cenários alternativos para a minimização da poluição ambiental proveniente de atividades agrícolas em bacias hidrográficas. O presente trabalho teve por objetivo identificar, através da modelagem em SWAT, as áreas da bacia do Ribeirão Guamium com maior potencial de aporte de nitrogênio às fontes hídricas superficiais e subterrâneas, tanto no cenário atual de uso do solo, quanto em cenário alternativo de expansão e adequação das áreas de APP. Os resultados obtidos evidenciam que a maior parte do nitrogênio que atinge as fontes hídricas encontra-se na forma nítrica, sendo 95% presente na água subterrânea. A adequação das áreas de APP, onde os maiores aportes de  $N_{\text{orgânico}}$  foram observados, foi capaz de reduzir a sua carga aos rios, por escoamento superficial. A carga de nitrato na água subterrânea não foi mitigada pela adequação da APP, pois as áreas mais críticas estão situadas em regiões com solos mais arenosos e permeáveis.

**Palavras-Chave** – nitrogênio, SWAT, poluição.

## **SIMULATION OF THE DYNAMIC OF CHEMICAL FORMS OF NITROGEN IN GUAMIUM WATERSHED, PIRACICABA-SP**

**Abstract** – Nitrogen is one of the most frequent contaminant in water bodies, superficial or groundwater, derived from point or not-point sources. Diffuse sources are of hardy control, due to the difficult in identifying the areas of higher loadings of nutrient to the water sources, as far as for the necessity of management of polluting activities. The modeling is a predictive tool of great applicability to evaluation of alternative scenarios aiming the mitigation of environmental pollution caused by agricultural activities in watersheds. This study aimed to identify, through the SWAT model, areas in the Guamium watershed with higher nitrogen loadings to groundwater and superficial water bodies, as in the real scenario of soil use, as in an alternative scenario of expansion and adequacy of riparian areas. The results show that great part of nitrogen arrives to water sources in nitric form, being 95% present in groundwater. The adequacy of riparian areas, where higher loading of  $N_{\text{organic}}$  was observed, was able to reduce the loading associated to runoff into the rivers. The nitrate loading to groundwater was not reduced by adequacy of riparian zone, because the contamination with this substance is associated to a region with a more sandy and permeable soil.

**Keywords** – nitrogen, SWAT, pollution.

<sup>1</sup> Centro Universitário Salesiano de São Paulo - UNISAL, Rua Dom Bosco, 100, Santa Catarina, Americana-SP, CEP 13466-327, eduardmasrs@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Biogotec Pesquisa e Soluções Ambientais Ltda., Rua Santos Dumont, 350, Vila Independência, Piracicaba-SP, CEP 13418-120

\* Autor Correspondente

## INTRODUÇÃO

As altas taxas de aplicação de fertilizantes na agricultura moderna têm levado a grandes preocupações mundiais quanto à poluição de fontes hídricas, apesar dos benefícios trazidos à produção agrícola. Estudos tem demonstrado que o nitrogênio, especialmente na forma de nitrato ( $\text{NO}_3$ ) é um dos principais poluentes gerados pela drenagem das áreas agrícolas, atingindo fontes hídricas superficiais por escoamento superficial e fontes subterrâneas, por lixiviação. A intensidade da contaminação das águas subterrâneas é dependente das quantidades de nitrato presentes ou adicionadas ao solo, da permeabilidade do solo e da sua capacidade de reter nitrato, das condições climáticas, principalmente da pluviosidade, do manejo da irrigação, bem como da profundidade do lençol freático ou aquífero subterrâneo.

A bacia hidrográfica do Ribeirão Guamium, situada no município de Piracicaba-SP, apresenta 93% de zona rural, sendo 78% da bacia ocupada pela cultura da cana-de-açúcar. Sua produção é alicerçada na aplicação de fertilizantes inorgânicos e vinhaça em solos de elevada permeabilidade e relevos de morrotes. Estudos realizados na Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba, onde a bacia em estudo está situada, têm demonstrado altos níveis de nitrogênio nos rios da região, decorrentes de fontes pontuais, devido ao elevado nível de urbanização e industrialização da região, bem como de fontes difusas.

A modelagem da dinâmica ambiental de nutrientes em bacias hidrográficas, envolvendo o transporte e destino em fontes hídricas, a partir de fontes pontuais e principalmente difusas, é um método eficiente para predição de contaminação e avaliação de boas práticas de manejo para redução da poluição ambiental.

O principal objetivo deste trabalho foi identificar, em cenário atual de uso do solo e cenário alternativo de expansão e adequação das áreas de preservação permanente (APP), as áreas da bacia com maior potencial de aporte de nitrogênio às fontes hídricas superficiais por escoamento superficial, bem como as regiões mais suscetíveis a contaminação subterrânea por nitrato, visando avaliar o potencial do modelo SWAT como uma ferramenta para subsidiar os processos de gestão e planejamento ambiental desta bacia hidrográfica.

## METODOLOGIA

### Descrição da bacia hidrográfica

A Bacia Hidrográfica do Ribeirão Guamium está localizada integralmente na porção norte do município de Piracicaba-SP, entre as longitudes  $47^\circ 34' 20,85''$  O –  $47^\circ 40' 29,68''$  O e latitudes  $22^\circ 32' 18,64''$  S –  $22^\circ 41' 43,14''$  S, no Estado de São Paulo (Figura 1), com uma área territorial de 7.051 ha, dos quais 481 ha encontram-se na zona urbana (Prefeitura do Município de Piracicaba, 2007).

Juntamente com 34 outras bacias (Barreto et al., 2006), a mesma integra a Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba (Sub-Bacia do Médio Tietê), manancial de maior expressividade no município e pertencente à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá - UGRH-5. O relevo da Bacia do Ribeirão Guamium apresenta altitudes variando de 459 a 672 m, sendo que as maiores altitudes e declividades estão presentes na porção norte da bacia, enquanto a porção sul apresenta o relevo mais suave.

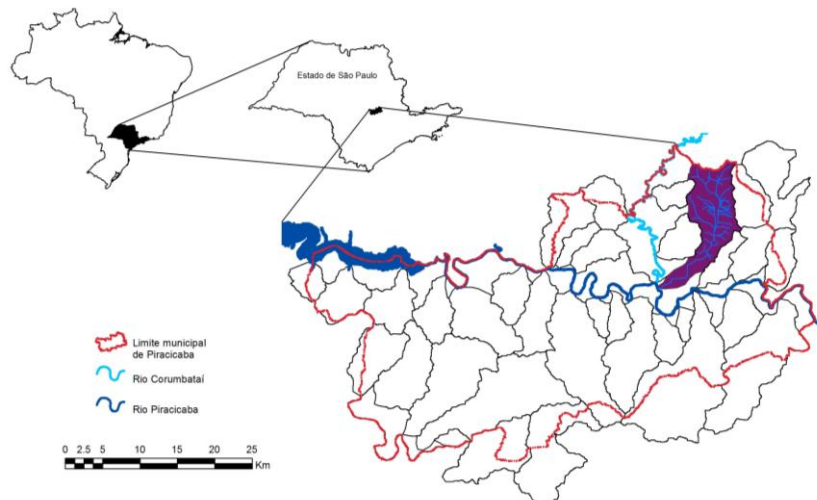


Figura 1 – Bacia hidrográfica do Ribeirão Guamium

O Ribeirão Guamium é o mais expressivo curso d'água formador desta unidade de estudo, desenvolvendo-se de forma livre e por vezes represada (natural ou artificialmente) até atingir a desembocadura no Rio Piracicaba (altitude de aproximadamente 406 m). Ao longo de seu percurso de aproximadamente 19,0 Km de extensão, o Ribeirão Guamium recebe os tributários Córrego Duas Águas e o Córrego Água Branca. Em seus trechos iniciais, o ribeirão atravessa uma área agrícola de domínio canavieiro e fracamente urbanizada, com um contingente de 1.682 habitantes na área rural, segundo dados censitários do IBGE-2000. E continua a se desenvolver em meio a esse cultivo até a porção média da bacia, sendo que em seu trecho final o ribeirão atravessa a malha urbana do município, onde se depara com um acréscimo populacional (16.946 habitantes), totalizando na bacia 18.628 habitantes e área urbanizada de 485 ha (7%).

Em função da pequena rede de drenagem da referida bacia, a área de preservação permanente (APP) é pequena e encontra-se degradada. Atualmente, a mesma não apenas se encontra degradada, como em sua maioria é ocupada com cana-de-açúcar e com a própria urbanização. A reserva legal (RL) também se apresenta deficitária na bacia (Barreto et al., 2006), apresentando recursos florestais degradados (apenas 491 ha, representando 7% da bacia, de floresta remanescente, na forma de fragmentos descontínuos), com uso da terra predominantemente com cana-de-açúcar (5.444 ha, 78% da bacia), além do uso urbano e outros.

### Descrição do modelo

O modelo matemático empregado, denominado SWAT, um acrônimo para “Soil and Water Assessment Tool”, é um modelo elaborado para trabalho em escala de bacias, visando quantificar os impactos decorrentes de práticas de manejo de solo em bacias hidrográficas grandes e complexas. Sobretudo, é um modelo de domínio público, mantido pelo Serviço de Pesquisa Agrícola dos Estados Unidos da América (USDA/USA), utilizado em inúmeros países. Sua seleção para ser aplicado ao projeto em questão deve-se ao fato de sua capacidade de simular, dinamicamente, os processos em bacias hidrográficas, bem como sua adoção anterior à Bacia do Corumbataí, uma sub-bacia da Bacia do Rio Piracicaba, vizinha a Bacia do Ribeirão Guamium, onde se vislumbrou um bom ajuste deste modelo em simular a realidade local.

Neste trabalho foi empregado o ArcSWAT para SWAT2005, uma extensão desenvolvida para o software de Sistema de Informação Geográfica ArcGis<sup>®</sup> e uma interface gráfica para o modelo SWAT (DI LUZIO et al., 2002). A interface foi instalada sobre ArcGis<sup>®</sup> 9.3, contendo a extensão Spatial Analyst<sup>®</sup> 2.0. Os softwares foram instalados e executados sob sistema operacional Windows 7 Profissional, em uma máquina com processador Dual Core de 2,31 GHz e 4 Gb de memória RAM.

### **Bases digitais e dados tabulares**

Os fenômenos hidrogeoquímicos em bacias hidrográficas são representados por processos dinâmicos, espacialmente e temporalmente distribuídos, em virtude das distintas características edafoclimáticas da área de estudo. Desta forma, a modelagem matemática de tais processos através de ferramentas de simulação computacional requer um conjunto de informações sobre o meio físico simulado, de modo a estabelecer um modelo conceitual básico que represente a geomorfologia, a pedologia, o uso e cobertura do solo e as condições climáticas do meio. A modelagem hidrológica no SWAT tem como base espacial de trabalho as microbacias delimitadas (discretizadas) a partir de um modelo digital da elevação do terreno.

O Modelo Digital do Terreno (MDT) da bacia do Ribeirão Guamium foi gerado em uma grade regular de 10 m x 10 m (Figura 2), a partir da vetorização das curvas de nível, com espaçamento vertical de 5 m, e dos pontos cotados, provenientes de cartas planialtimétricas do Plano Cartográfico do Estado de São Paulo, na escala 1:10.000. Uma área de contribuição de 130 ha foi definida, obtendo-se 27 microbacias, com área variando de 2,9 a 1294,4 ha e 253 HRUS (Unidades de Resposta Hidrológica – divisão não-espacializada representando combinações únicas de tipos de solo e uso e cobertura do solo para cada microbacia, de modo a refletir as diferenças nos processos hidrológicos dentro da unidade integradora que é definida pela microbacia).

Um mapa de Uso e Cobertura do Solo da bacia (Figura 2) foi extraído da base digital de uso da terra do município de Piracicaba, proveniente do projeto “Atlas Rural de Piracicaba” (Barreto, 2006), gerada a partir de imagens do satélite Landsat-7, referentes a passagens de 13 de maio de 2002, 17 de agosto de 2002 e 8 de janeiro de 2003.

A base digital de solos da bacia (Figura 2) foi extraída da base digital de solos do município de Piracicaba gerada no projeto “Atlas Rural de Piracicaba” (Barreto, 2006), a partir do mapa de solos proveniente do Levantamento Semidetalhado do IAC, em escala 1:100.000, aprimorado com dados do levantamento dos solos urbanos de Piracicaba, coordenado pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ) em 2002, em conjunto com a Prefeitura Municipal de Piracicaba, contando também com dados de levantamento de solos da região de latitude superior a 48°, executado pela ESALQ em 1999.

Além de bases digitais, o modelo matemático SWAT requer um conjunto de informações tabulares para complementar as informações das bases digitais e subsidiar os módulos que caracterizam as práticas agrícolas realizadas na bacia e que definem a dinâmica climática temporal do sistema.

Uma vez que o modelo incorpora um módulo para simulação de crescimento de plantas, um banco de dados com as características fenológicas das plantas identificadas no mapa de uso e cobertura do solo faz-se necessário. Para tal, o banco de dados padrão do modelo foi empregado,

fazendo-se adequações dos parâmetros quando e, se necessário, da realização da calibração do modelo.

Um banco de dados dos solos da bacia foi elaborado a partir de informações extraídas de 15 perfis de solo coletados continuamente por sondagem mecânica tipo Direct-Push em tubos de PVC de 55 mm de diâmetro, introduzidos pneumaticamente em diversos pontos representativos dos principais grupos de solos da bacia, até a profundidade máxima de 12,0 m ou até que um impedimento físico fosse encontrado. As amostras coletadas foram submetidas a determinação de granulometria e propriedades físicas, como condutividade hidráulica, densidade e conteúdo de água disponível.

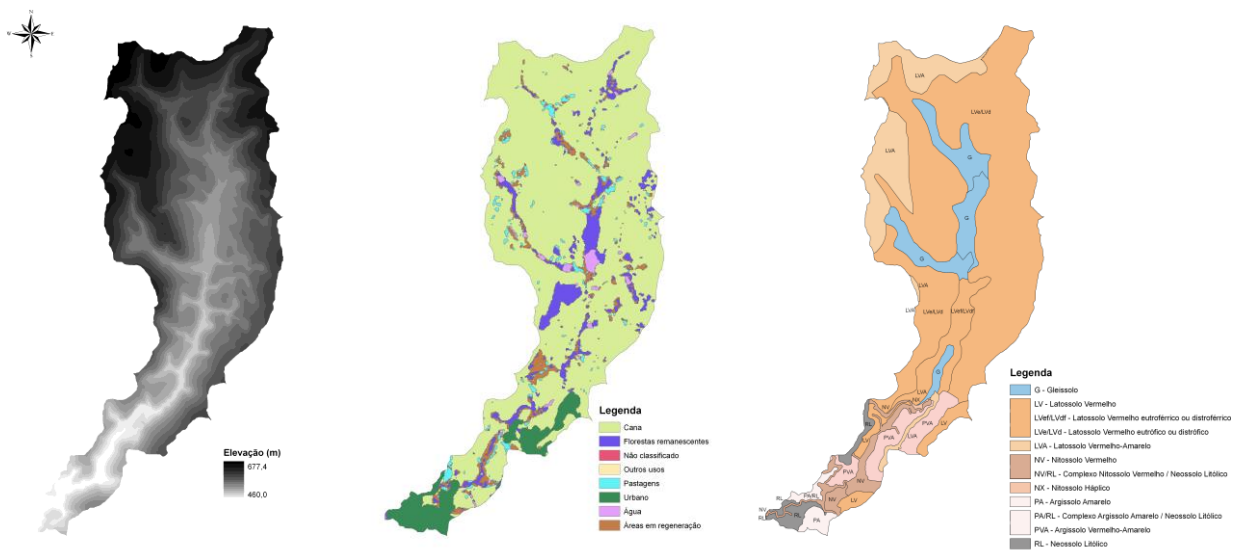


Figura 2 – Bases digitais para simulação

Uma vez que o modelo propicia a simulação temporal dos processos hidrogeoquímicos da bacia hidrográfica, um banco de dados climáticos, com informações diárias de precipitação, temperatura média do ar, radiação global, umidade relativa do ar e velocidade média do vento, foi elaborado a partir de informações provenientes da Estação Meteorológica da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, com dados diários de 1917 a 2012. Visando garantir que não ocorram falhas na série histórica diária inserida no modelo, parâmetros probabilísticos das séries históricas foram extraídos de modo a suprir o módulo gerador de dados climáticos WXGEN.

O arquivo de dados de consumo de água foi alterado, de modo a refletir o real balanço hídrico da bacia pela remoção de água através dos usos outorgados no Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo – DAEE.

### Cenários simulados

Em virtude da reduzida rede de drenagem desta bacia, reduzindo as áreas de preservação permanente a serem mantidas, dois cenários de uso e cobertura do solo foram simulados:

- a) Um cenário atual de uso e cobertura do solo, onde apenas 42% das áreas de APP não se encontram ocupadas com cana-de-açúcar, sendo caracterizadas como áreas em estágio

inicial de regeneração natural, com raras ocorrências de vegetação arbustiva, ou ocupadas com pastagens;

- b) Um cenário alternativo de expansão e adequação das áreas de APP, compostas por vegetação de floresta mista.

Em ambos os cenários, as áreas cultivadas com cana-de-açúcar foram simuladas de acordo com as práticas de manejo descritas na Tabela 1, enquanto que para os demais usos e coberturas do solo, manteve-se os cenários padrões do modelo.

Tabela 1 – Operações de manejo simulada no cultivo de cana-de-açúcar

Ano	Data	Operação
1	15 de janeiro	Plantio de cana-de-açúcar
1	15 de janeiro	Aplicação de fertilizante (700 kg/ha) na formulação 06-24-24
2	15 de junho	Corte de cana-de-açúcar
2	20 de junho	Aplicação de fertilizante nitrogenado (120 kg de N/ha)
3	15 de junho	Corte de cana-de-açúcar
3	20 de junho	Aplicação de fertilizante nitrogenado (120 kg de N/ha)
4	15 de junho	Corte de cana-de-açúcar

### Calibração do modelo

Devido a ausência de medições regulares de vazão no Ribeirão Guamium, foram adotados como parâmetros de calibração para esta simulação, os parâmetros ajustados para a bacia hidrográfica do Rio Corumbataí, vizinha a bacia do Guamium. Entretanto, algumas medições de vazão foram realizadas no Ribeirão Guamium para avaliar a sua ordem de grandeza e permitir uma avaliação do fluxo estimado pelo modelo SWAT.

A simulação foi realizada para um período de 30 anos, dos quais foram excluídos os primeiros 10 anos de registros que correspondem ao período de auto-ajuste do balanço hidrológico, restando 20 anos de registros para tratamento e representação de médias anuais das variáveis de saída de interesse.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Calibração hidrológica

A separação do fluxo da bacia do Rio Corumbataí por meio do filtro digital recursivo automatizado determinou que o fluxo de base contribui com 63% do fluxo total (Tabela 2). O balanço hídrico total estimado pelo modelo SWAT apresentou valores levemente superiores ao resultado observado para a bacia, mas grande concordância foi verificada para a contribuição do fluxo de base e do escoamento superficial (Tabela 2). Observa-se que o modelo apresentou um excelente ajuste com as séries históricas fluviométricas, nas escalas anual, mensal e mensal por ano do período total simulado (Figura 3).

Adotando-se os parâmetros aqui ajustados para a simulação na bacia do Ribeirão Guamium obteve-se um balanço hídrico representado por um fluxo total anual de 585,5 mm, sendo 40,8% decorrentes do escoamento superficial e 59,6% do fluxo de base.

Tabela 2 – Balanço hídrico anual observado e simulado na bacia do rio Corumbataí

	Total	Fluxo de base	Escoamento superficial
Observado	465,00 mm*	292,95 mm (63%)**	172,05 mm (37%)**
Simulado (calibração)	540,88 mm	353,23 mm (65,31%)	188,95 mm (34,93%)
Simulado (validação)	531,96 mm	343,15 mm (64,51%)	190,00 mm (35,72%)

\* calculado a partir da série histórica fluviométrica (1972-2003) do posto 4D-021-Recreio do DAEE.

\*\* calculado pelo filtro digital recursivo automatizado a partir da série histórica.

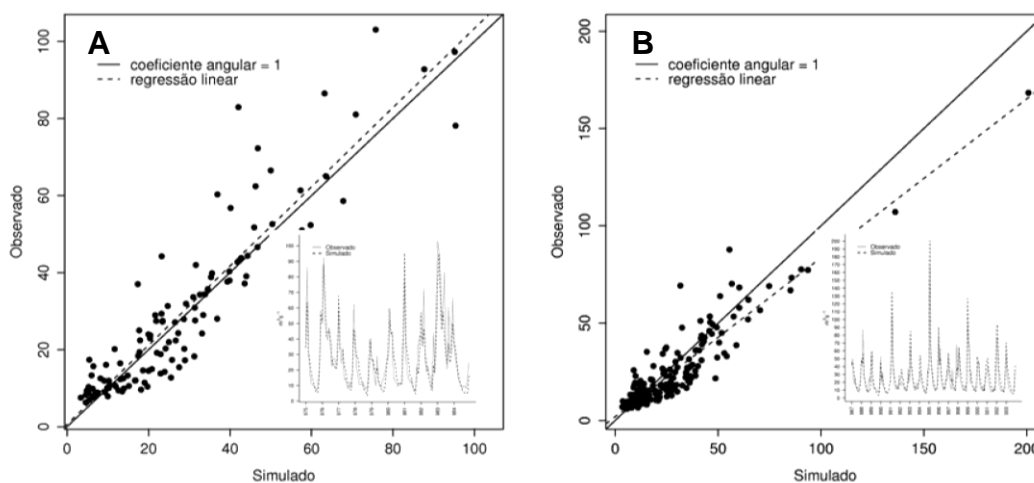


Figura 3 – Dispersão de pontos e série temporal da vazão diária observada e simulada no período de calibração (A) e validação (B) do modelo SWAT para a sub-bacia do rio Corumbataí

## Modelagem das cargas de nitrogênio

De um modo geral, observa-se que a maior parte do nitrogênio que atinge os corpos hídricos encontra-se na forma nítrica, sendo que 95% está presente na água subterrânea (Tabela 3). Os resultados obtidos evidenciam que a adequação das áreas de APP, isto é, sua cobertura vegetal, propiciou uma redução expressiva, de 20,2%, na carga de nitrogênio orgânico adicionada aos rios da bacia do Ribeirão Guamium, devido a redução de 3,49% na quantidade de N orgânico e mineral aplicados na bacia. Reduções pouco expressivas foram estimadas para as cargas de nitrato aos corpos hídricos superficiais e subterrâneos.

O balanço biogeodinâmico de nitrogênio evidenciou cargas distintas sendo transferidas aos corpos hídricos ao longo da bacia. A identificação espaço-temporal das áreas mais vulneráveis e condicionantes para o aporte desta molécula, bem como a identificação de solos associados é um aspecto fundamental para o gerenciamento de atividades na bacia hidrográfica.

O mapeamento de áreas críticas evidencia que as maiores cargas de nitrogênio orgânico na zona rural (porção central e norte da bacia) estão associadas às áreas de APP, onde sua recuperação resultou em expressiva redução da carga aportada aos rios (Figura 4). Entretanto, os maiores aportes de nitrogênio estão presentes na região urbanizada, ao sul da bacia, onde a recuperação da APP não resultou em redução da contaminação. Por outro lado, o aporte de nitrato na água subterrânea não foi mitigado pela adequação da APP, uma vez que as regiões mais críticas estão concentradas a

oeste da bacia, onde os solos apresentam maiores teores de areia, favorecendo a permeabilidade deste ânion.

Tabela 3 – Balanço de nitrogênio simulado na bacia do Ribeirão Guamium

	Cenário atual	Cenário alternativo	Redução (%)
Quantidade de N orgânico e mineral aplicado na bacia (kg N.ha.ano <sup>-1</sup> )	57,010	55,021	3,49
Carga de N <sub>orgânico</sub> para os rios (kg N.ha.ano <sup>-1</sup> )	0,608	0,485	20,23
Carga de nitrato para os rios por escoamento superficial (kg N.ha.ano <sup>-1</sup> )	1,577	1,503	4,69
Carga de nitrato para os rios por fluxo lateral (kg N.ha.ano <sup>-1</sup> )	0,740	0,736	0,54
Carga de nitrato para a água subterrânea (kg N.ha.ano <sup>-1</sup> )	44,346	43,715	1,42

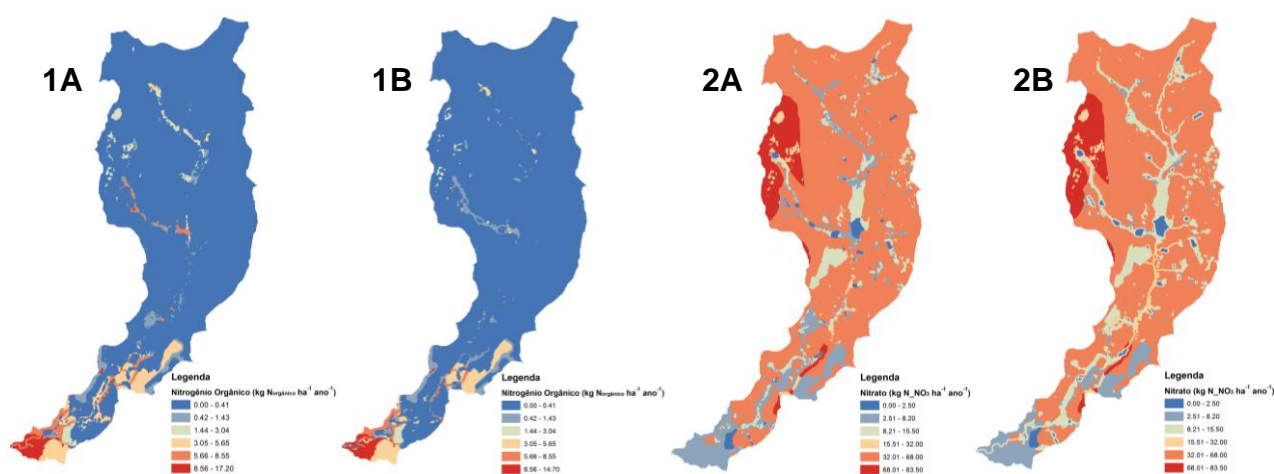


Figura 4 – Distribuição das áreas de maior aporte de N<sub>orgânico</sub> às fontes hídricas superficiais (1) e nitrato às fontes subterrâneas (2), em cenário atual (A) e alternativo (B) de uso do solo na bacia do Ribeirão Guamium

## CONCLUSÃO

Os resultados obtidos levam a concluir que:

- Nitrogênio orgânico é a principal forma de contaminação dos corpos hídricos superficiais na bacia em estudo;
- Nitrato é a principal forma de contaminação de fontes hídricas, em especial subterrânea;
- O SWAT mostrou-se uma ferramenta de alto potencial para avaliação de áreas críticas ao processo de contaminação difusa e importante para a gestão do espaço territorial da bacia.

## REFERÊNCIAS

- BARRETO, A. G. O., SPAROVEK, G.; GIANNOTTI, M. *Atlas Rural de Piracicaba*. Piracicaba: IPEF, 2006. 76 p.
- CHRISTOFOLETTI, A. *Modelagem de sistemas ambientais*. São Paulo: Edgard Blücher, 1999. 236p.
- DI LUZIO, M.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J.G.; NEITSCH, S.L. *ArcView interface for SWAT2000: user's guide*. 2002. 345 p.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE PIRACICABA. Instituto de Pesquisas e Planejamento de Piracicaba. *Banco de dados*. Piracicaba: IPPLAP, 2007.