

# Estudo da poluição pontual e difusa na bacia de contribuição do reservatório da usina hidrelétrica de Funil utilizando modelagem espacialmente distribuída em Sistema de Informação Geográfica

*Study of point and diffuse pollution in the Funil reservoir hydropower plant contribution basin using spatially distributed Geographic Information System modeling*

**Ricardo Neves de Souza Lima<sup>1</sup>, Celso Bandeira de Melo Ribeiro<sup>2</sup>, Cláudio Clemente Faria Barbosa<sup>3</sup>, Otto Corrêa Rotunno Filho<sup>4</sup>**

## RESUMO

Este estudo avaliou o potencial poluidor da bacia de contribuição do reservatório de Funil (BCRF), localizado na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, considerando a geração da carga de nutrientes, nitrogênio (N) e fósforo (P), por fontes pontuais e difusas, a partir de uma modelagem distribuída utilizando Sistema de Informação Geográfica (SIG). As cargas e concentrações médias anuais desses nutrientes foram geradas a partir do acoplamento de equações empíricas, em SIG, considerando informações espaciais de uso e cobertura do solo, população residente na bacia e vazão média anual de longo período, obtida por equações do tipo chuva-vazão. Os resultados indicaram que 80% da carga total de nitrogênio foram provenientes de fontes pontuais e 20% de fontes difusas, enquanto que, da carga total de fósforo, 89,1% foram originadas de fontes pontuais e 10,9% de fontes difusas. As concentrações de nutrientes estimadas pelo modelo empírico apresentaram bons ajustes em relação aos valores observados de fósforo e de nitrogênio no rio Paraíba do Sul, com  $R^2=0,96$  ( $p<0,01$ ) e  $R^2=0,70$  ( $p<0,01$ ), respectivamente. Dessa forma, o modelo foi capaz de detectar, de forma significativa, a tendência das variações nas concentrações de nutrientes ao longo de diferentes trechos da BCRF.

**Palavras-chave:** poluição hídrica; geoprocessamento; bacia hidrográfica; nutrientes.

## ABSTRACT

This study evaluated the potential polluter of the Funil Reservoir Contribution Basin (BCRF), located in the Paraíba do Sul River basin, considering the generation of nutrient loading, nitrogen (N) and phosphorus (P), due to point and diffuse sources from a distributed modeling using Geographic Information System (GIS). Loads and annual average concentrations of these nutrients were generated from the coupling of empirical equations, in GIS, considering spatial information such as land use/cover, population living in the basin and long period average annual flow obtained by equations of rainfall-runoff. The results indicated that 80% of the total load of nitrogen was generated from point sources and 20% from diffuse sources, while 89.1% were originated from point sources and 10.9% from diffuse sources for the corresponding total load of phosphorus. The model estimated adequately the concentration when compared to the observed values and it was able to detect the trend of changes in nutrient concentrations along different sections of the BCRF highlighting significant correlations between the observed and simulated concentrations of phosphorus and nitrogen with  $R^2=0.96$  ( $p<0.01$ ) and  $R^2=0.70$  ( $p<0.01$ ), respectively.

**Keywords:** water pollution; geoprocessing; watershed; nutrients.

<sup>1</sup>Mestre em Ecologia e graduado em Geografia na Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) - Juiz de Fora (MG), Brasil.

<sup>2</sup>Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) e Professor Adjunto Nível 4 do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental na UFJF - Juiz de Fora (MG), Brasil.

<sup>3</sup>Doutor em Sensoriamento Remoto e Docente Permanente do curso de pós graduação em sensoriamento remoto no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) - São José dos Campos (SP), Brasil.

<sup>4</sup>Doutor em Engenharia Civil pela University of Waterloo e Professor associado na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

**Endereço para correspondência:** Ricardo Neves de Souza Lima - Rua Delfim Moreira, 174/204 - Centro - 36010-570 - Juiz de Fora (MG), Brasil - E-mail: ricneves80@yahoo.com.br

**Recebido:** 05/12/13 - **Aceito:** 20/05/15 - **Reg. ABES:** 127676

## INTRODUÇÃO

Os impactos gerados sobre os recursos hídricos pela produção e transporte de nutrientes nas bacias hidrográficas foram acelerados nos últimos 50 anos devido à modificação da paisagem para o desenvolvimento de atividades agrícolas e urbanas (RIVERS *et al.*, 2011). Um dos reflexos dessas modificações tem sido constatado por meio do excesso de nutrientes nos ecossistemas aquáticos, especificamente o nitrogênio e o fósforo, que se apresentam como os principais responsáveis pelo processo de eutrofização dos corpos de água.

A bacia de contribuição do reservatório de Funil está localizada no trecho médio-superior da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, sendo esta uma bacia de importância estratégica no desenvolvimento regional, e que vem apresentando, nas últimas décadas, um aumento acelerado da atividade industrial e da urbanização, com intensificação dos problemas ambientais pré-existentes (CEIVAP, 2006).

A identificação e o mapeamento das áreas fornecedoras de substâncias como o nitrogênio e o fósforo são de grande importância no planejamento e na adoção de medidas de controle da poluição (STEINKE & SAITO, 2008), sendo que o monitoramento e a quantificação são fundamentais para uma avaliação do estado trófico dos corpos de água em uma bacia hidrográfica.

As águas residuárias, que abrangem os efluentes domésticos e as descargas industriais, representam a maior fonte artificial de poluição pontual de corpos hídricos. Essas fontes são consideradas pontuais na medida em que os poluentes atingem um determinado corpo de água de forma concentrada no espaço, com localização definida e frequentemente com regime contínuo de produção.

As cargas poluidoras não pontuais (ou difusas) são geradas em áreas extensas e chegam aos corpos de água de forma intermitente, dificultando, assim, sua identificação, medição e controle (LIBOS; ROTUNNO FILHO; ZEILHOFER, 2003). As cargas difusas estão intimamente associadas à geologia, ao uso do solo (presença e tipo de floresta, práticas agrícolas e pastagens) e à morfologia da bacia de drenagem (THOMANN & MUELLER, 1987).

A modelagem e a simulação de fenômenos ambientais consistem em uma forma simplificada de representar e avaliar determinados processos de um sistema ambiental real (MILLER, 2007). Atualmente, o avanço da computação e a crescente disponibilização de dados e de informações ambientais especializadas têm permitido o desenvolvimento de modelos hidrológicos e de transporte de massa através de implementações em ambiente de Sistemas de Informação Geográficas (SIG) (LIBOS; ROTUNNO FILHO; ZEILHOFER, 2003), favorecendo maiores avanços na área de modelagem da qualidade da água a partir da análise da bacia hidrográfica como um sistema distribuído no espaço.

Por meio dessa abordagem, é possível avaliar, de forma sistemática, os processos que envolvem a dinâmica hidrológica e o transporte de poluentes na bacia, além de permitir a simulação da contribuição integrada de fontes pontuais e não pontuais de poluição, servindo, dessa forma, como um instrumento de suma importância à tomada de decisão e apoio ao planejamento dos recursos hídricos.

Sistemas de suporte à decisão que utilizam modelos hidrológicos acoplados às plataformas SIG têm sido frequentemente utilizados para a avaliação espacial e quantitativa do transporte de nutrientes em bacias hidrográficas, apresentando bons resultados (GRIZZETTI; BOURAOUI; DE MARSILY, 2005; NEVES; DA SILVA; CRESTANA, 2006; HUANG & HONG, 2010; LINS *et al.*, 2012). Alguns desses sistemas georreferenciados já incorporam modelos de qualidade da água para avaliação dos efeitos das cargas pontuais e difusas provenientes de bacias hidrográficas sobre os corpos hídricos, tais como o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) (ARNOLD *et al.*, 1998; 2012) e o modelo AnnAGNPS (BINGNER & THEURER, 2005; HUANG & HONG, 2010).

No entanto, a grande quantidade de dados requeridos de entrada, incluindo extensas séries históricas e dados de diferentes naturezas, além de uma prévia calibração e validação das condições hidrodinâmicas para adequadamente representar as condições de transporte de massa na bacia em estudo, impõe dificuldades na modelagem de poluentes, tornando-se necessária a utilização de métodos simplificados com embasamento físico para a avaliação preliminar, no nível de diagnóstico, dos focos de pressão sobre a qualidade das águas em grandes bacias.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial poluidor da bacia de contribuição do reservatório da usina hidrelétrica (UHE) de Funil (BCRF) com relação às cargas pontuais e difusas de nitrogênio e fósforo por meio de uma modelagem espacialmente distribuída em ambiente SIG.

## METODOLOGIA

### Caracterização da área de estudo

A área de estudo compreende a porção da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul a montante da barragem do reservatório da UHE de Funil (Figura 1), que corresponde aos trechos superior e médio do rio Paraíba do Sul. Essa área da bacia abrange, em quase sua totalidade, a região do Vale do Paraíba Paulista (SP), entre as coordenadas geográficas 22° 21'S e 23° 39'S e 44° 31'W e 46° 25'W, com uma área de drenagem de aproximadamente 13.400 km<sup>2</sup> (FCR, 2009).

### Métodos

Um resumo esquemático dos procedimentos metodológicos adotados na modelagem distribuída de nutrientes na BCRF pode ser observado no fluxograma da Figura 2.

### Coeficientes de exportação - cargas pontuais e difusas

A estimativa da poluição pontual na BCRF foi realizada a partir da quantificação da população total residente por setor censitário, de acordo com os dados do Censo Demográfico 2010 (IBGE, 2010), para a avaliação da carga total de nitrogênio (N) e fósforo (P) proveniente do esgoto doméstico. O cálculo da carga de N e P gerado pelo esgoto sanitário doméstico foi

realizado com base na descarga per capita dessas substâncias de acordo com os coeficientes médios estabelecidos no módulo 1 do Modelo Matemático de Correlação Uso do Solo/Qualidade da Água (MQUAL), versão 1 (Tabela 1). Esse modelo foi desenvolvido pela Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo durante os estudos do Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da Bacia do Guarapiranga, adotado como instrumento técnico da Lei Estadual nº 12.233/2006 (MORUZZI *et al.*, 2012). Maiores detalhes sobre o modelo MQUAL podem ser encontrados em SMA (2010).

Para a análise da poluição difusa, foi realizado o mapeamento dos principais tipos de uso e cobertura do solo (UCS) na BCRF através da classificação de imagens multiespectrais do sensor TM do satélite LANDSAT 5 obtidas da base de dados do *U.S Geological Survey* (USGS), correspondentes às cenas WRS2 219/076 (órbita/ponto) de 24 de agosto de 2010 e WRS2 218/076 (órbita/ponto) de 2 de setembro de 2010.

O mapeamento das classes de UCS foi executado por intermédio de uma classificação automática supervisionada das imagens LANDSAT 5 utilizando o método de máxima verossimilhança Gaussiana (MAXVER) disponível no código computacional ENVI® versão 4.8.

Para a estimativa da carga potencial de nitrogênio e fósforo totais ( $N_T$  e  $P_T$ ) provenientes de fontes difusas, foi utilizada a abordagem de unidade de carga em função do tipo de uso e cobertura do solo. Esse método consiste em aplicar taxas ou coeficientes de geração de cargas (expressos em  $g \cdot ha^{-1} \cdot dia^{-1}$  ou equivalentes) para cada categoria de uso do solo existente na área em estudo, cujos valores sejam representativos das condições médias vigentes.

A estimativa das cargas difusas totais anuais de  $N_T$  e  $P_T$  na BCRF foi obtida a partir dos coeficientes médios de exportação do modelo MQUAL1 (Tabela 1) associados aos diferentes tipos de uso e cobertura do solo existentes na bacia. Como forma de considerar o decaimento da carga de nutrientes durante o

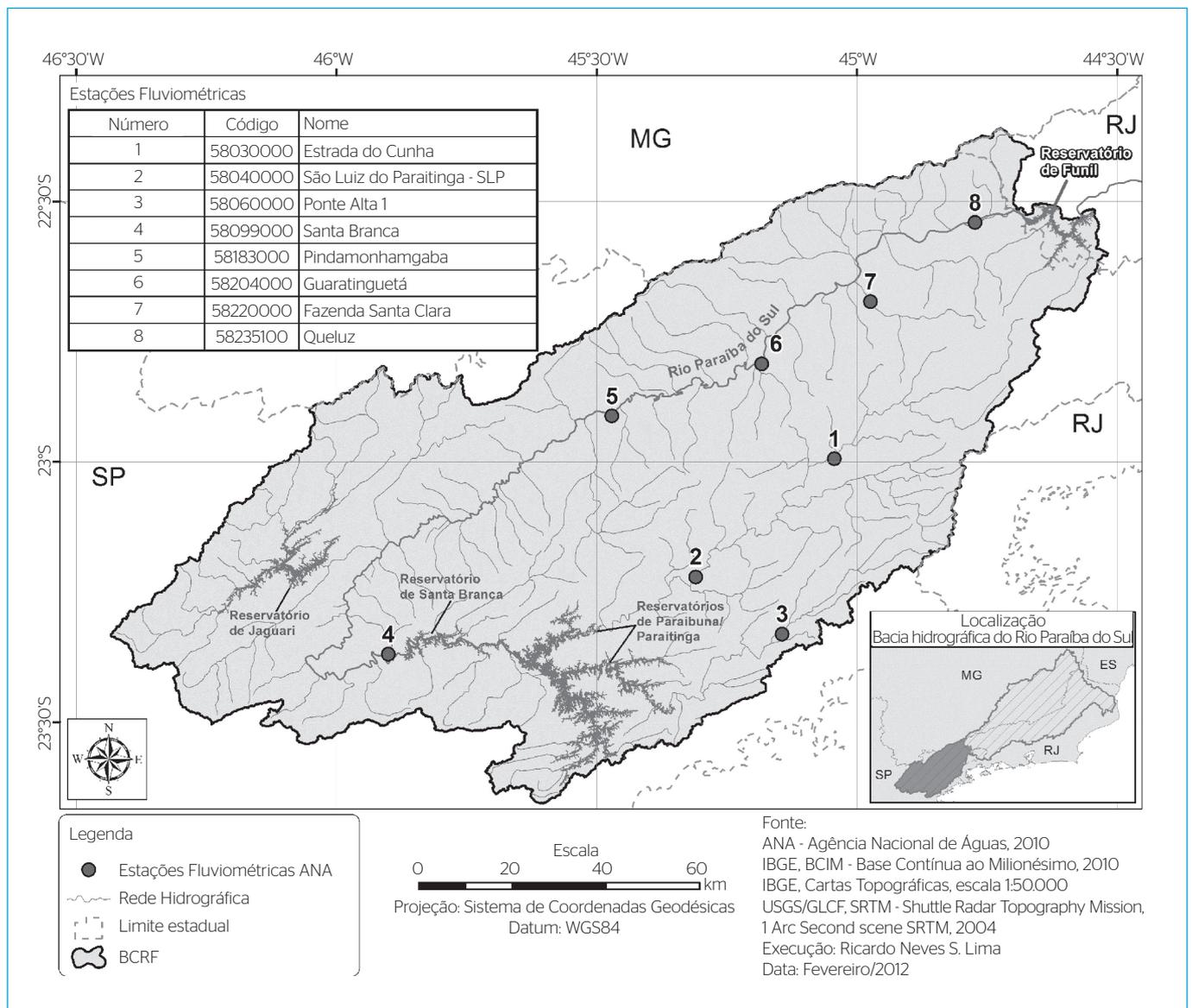


Figura 1 - Localização da área de estudo (bacia de contribuição do reservatório de Funil).

percurso do escoamento superficial, foram adotados, para as cargas difusas, coeficientes de atenuação em função da distância. Para esse procedimento, foi utilizado um índice normalizado denominado Indicador de Distância (DI), proposto por Cecchi *et al.* (2007), que foi utilizado para ponderar os coeficientes de exportação, conforme Equações 1 e 2, a seguir:

$$DI_i = \exp (-[ D_i ] * k) \tag{1}$$

$$CE_{PD} = DI_i * CE_{UCS} \tag{2}$$

onde:

$DI_i$ : indicador de distância entre a célula  $i$  e o corpo de água;

$D_i$ : distância euclidiana da célula  $i$  ao rio medida em número de células;

$k$ : constante de valor igual a 0,090533;

$CE_{PD}$ : coeficiente de exportação ponderado pela distância ( $kg.km^{-2}.ano^{-1}$ );

$CE_{UCS}$ : coeficiente de exportação de cada tipo de uso e cobertura do solo ( $kg.km^{-2}.ano^{-1}$ );

Se  $D_i = 0$ , então,  $DI_i = 1$ ; entretanto, se  $D_i = \infty$ ,  $DI_i = 0$ .

### Modelagem hidrológica

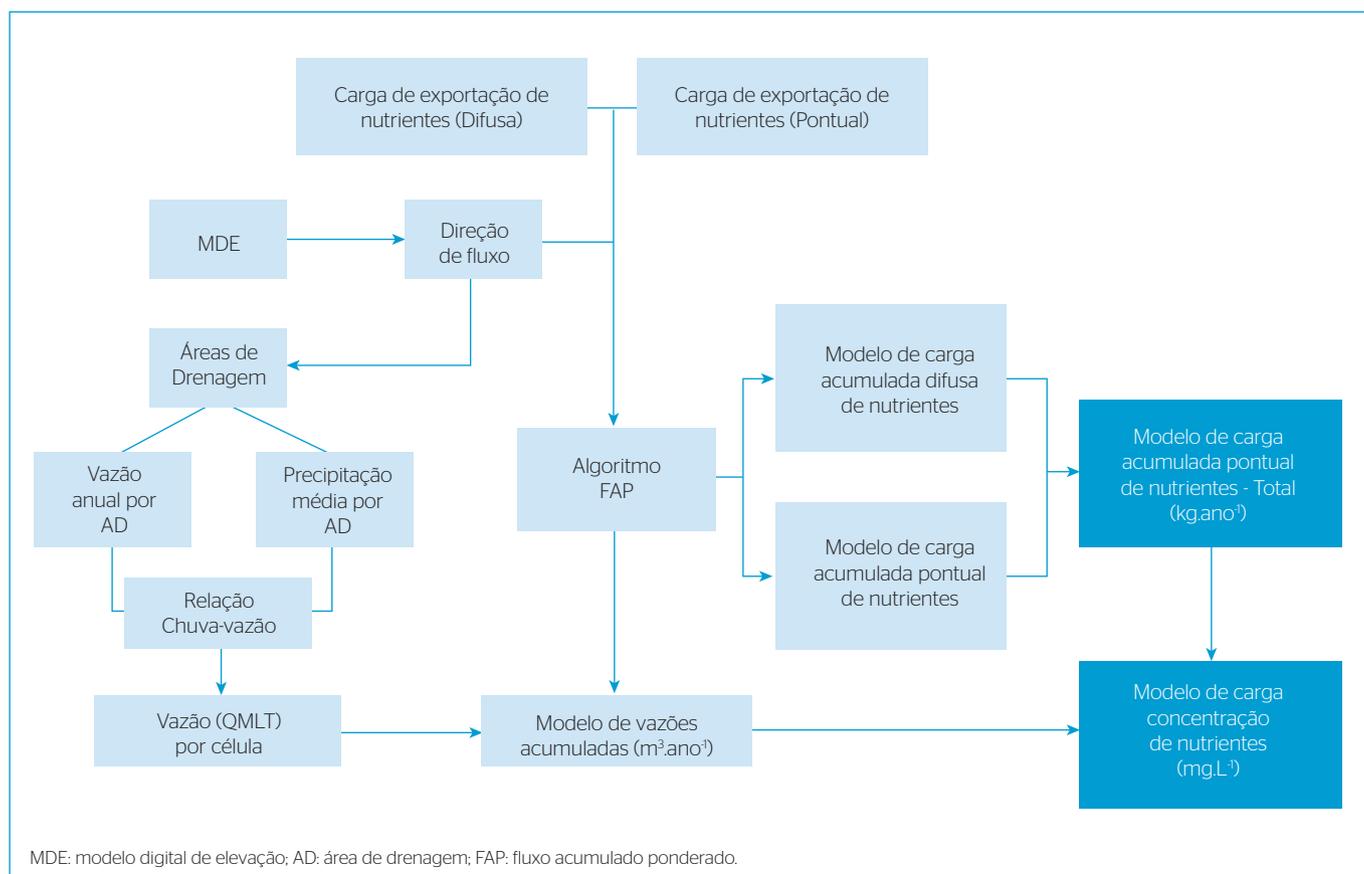
Para a modelagem do comportamento hidrológico médio da BCRF, foi utilizado, inicialmente, o modelo digital de elevação (MDE) da bacia, proveniente

do projeto TOPODATA (VALERIANO; ROSSETTI; ALBUQUERQUE, 2009), com objetivo de elaborar, em SIG, o modelo de direção de fluxo do escoamento superficial. Esse modelo determina as direções preferenciais do escoamento sobre o terreno de acordo com o método desenvolvido por Jenon e Domingue (1988). As etapas do algoritmo para a definição das direções de fluxo estão descritas em Buarque *et al.* (2009).

**Tabela 1** - Coeficientes médios anuais de exportação ( $kg.km^{-2}.ano^{-1}$ ) e carga média per capita ( $kg.hab^{-1}.ano^{-1}$ ) de fósforo e nitrogênio total adotados no estudo.

Fonte	Tipo	Unidade	P <sub>total</sub>	N <sub>total</sub>
Afloramento rochoso	Difuso	$kg.km^{-2}.ano^{-1}$	10,22	182,50
Área Urbana			12,41	465,01
Corpo hídrico			0,00	0,00
Cultura agrícola			126,29	1076,75
Floresta			14,24	219,00
Mineração			12,41	465,01
Pastagem			10,22	182,50
Silvicultura			14,24	219,00
Solo Exposto			12,41	465,01
Carga per capita			Pontual	$kg.hab^{-1}.ano^{-1}$

Fonte: adaptado de SMA (2010).



**Figura 2** - Fluxograma metodológico da modelagem distribuída de nutrientes na bacia de contribuição do reservatório de Funil.

A partir do modelo de direção de fluxos, foram delimitadas, no módulo *Spatial Analyst* do SIG ArcGIS®, as áreas de drenagem (AD) das estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA) existentes na BCRF.

Para a construção de uma relação entre chuva e vazão na BCRF, foram utilizados dados espacializados de precipitação (em mm.ano<sup>-1</sup>), gerados a partir da interpolação das isoietas médias anuais, correspondente ao período de 1977 a 2006, disponibilizadas no Atlas Pluviométrico do Brasil pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). A precipitação média anual por AD foi obtida através de uma função zonal no SIG ArcGIS em que os valores de precipitação nas células pertencentes a cada AD foram sumarizados através de parâmetros estatísticos descritivos.

As informações hidrológicas da BCRF foram obtidas através do cálculo das vazões médias de longo termo (QMLT) com base nos registros da série histórica de vazões das estações fluviométricas pertencentes à rede de monitoramento da Agência Nacional das Águas (ANA) (Tabela 2). Foi definido o período base de 1977 a 2005, realizando-se a análise de estacionariedade das séries de vazões, através de testes de homogeneidade das variâncias e médias de seus valores, no código computacional Sistema Computacional para Análises Hidrológicas (SisCAH) (GPRH, 2009).

Para permitir a comparação com as informações de precipitação nas áreas de drenagem, a vazão em m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> foi transformada em mm.ano<sup>-1</sup>, através da Equação 3:

$$Q_{\text{anual}} = \left( \frac{\text{QMLT} * 31536000}{A} \right) * 10^3 \quad (3)$$

onde:

Q<sub>anual</sub>: vazão anual (mm.ano<sup>-1</sup>);

QMLT: vazão média de longo termo (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>);

A: área de drenagem (m<sup>2</sup>);

31536000: quantidade de segundos no ano;

10<sup>3</sup>: fator de conversão de metro (m) para milímetro (mm).

**Tabela 2** – Estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas selecionadas na bacia de contribuição do reservatório de Funil para o estudo hidrológico.

Código	Nome da Estação	Série de dados	
		Início	Fim
58030000	Estrada do Cunha	04/1934	11/2006
58040000	São Luís do Paraitinga - SLP	03/1988	10/2006
58060000	Ponte Alta 1	09/1933	11/2006
58099000	Santa branca	07/1952	11/2006
58183000	Pindamonhangaba	01/1939	09/2006
58204000	Guaratinguetá	01/1939	12/2007
58220000	Fazenda Santa Clara	12/1935	09/2006
58235100	Queluz	11/1934	01/2005

Foram realizadas análises de regressão linear e não lineares simples entre os dados de chuva e vazão com objetivo de obter o melhor ajuste possível entre esses dados. A função de regressão que apresentou o melhor ajuste para a relação chuva-vazão foi aplicada sobre o mapa de precipitação, possibilitando obter o plano de informação da vazão média de longo termo em função da precipitação em mm.m<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup>.

A estimativa do volume anual de água acumulado no sentido do escoamento superficial na BCRF foi obtida através da aplicação do algoritmo de fluxo acumulado ponderado (FAP), utilizando-se a ferramenta *Hydrology* do módulo *Spatial Analyst Tools* do SIG ArcGIS. Esse algoritmo foi aplicado utilizando, como entradas, o modelo de direção de fluxos e o plano de informação da vazão média de longo termo. Como resultado, foi elaborado o modelo acumulado das vazões médias de longo termo (QMLT) em toda a área da BCRF em m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>.

### Estimativa de carga e concentração média de nutrientes

As cargas anuais acumuladas de nutrientes (kg.ano<sup>-1</sup>) por fontes pontuais e difusas na BCRF foram estimadas pela combinação do plano de informações das cargas potenciais de N e P (obtidas das Tabelas 1 e 2) com o plano de informação da direção de fluxo do escoamento superficial, aplicando-se o algoritmo FAP no SIG ArcGIS.

O modelo de concentração média anual de nutrientes (mg.L<sup>-1</sup>) na BCRF foi obtido a partir da combinação do modelo de cargas anuais acumuladas de nutrientes com o modelo acumulado das vazões médias de longo termo, utilizando a Equação 4:

$$C_a = \frac{L_a}{Q_a} * 10^6 * 10^{-3} \quad (4)$$

onde:

C<sub>a</sub>: concentração média anual de N e P (mg.L<sup>-1</sup>);

L<sub>a</sub>: carga acumulada de N ou P (kg.ano<sup>-1</sup>);

Q<sub>a</sub>: vazão média anual (m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>);

10<sup>6</sup>: transformação da unidade de kg para mg;

10<sup>-3</sup>: transformação da unidade de m<sup>3</sup> para litro (L).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados do Censo Demográfico 2010 indicaram que a BCRF apresenta população total de 2.069.465 habitantes distribuídos em 3620 setores censitários, dentre os quais 136 setores apresentam áreas parcialmente dentro da bacia.

Do total de setores censitários, 3.157 são do tipo urbano, nos quais residem mais de 93% da população total da BCRF, enquanto os outros 463 setores censitários são classificados como rurais, onde residem apenas 6,8% da população total.

As classes de uso e cobertura do solo na BCRF, obtidas a partir da classificação de imagens Landsat TM5, podem ser observadas na Figura 3, e as áreas ocupadas por cada classe estão dispostas na Tabela 3.

Com base no mapa de uso e cobertura do solo da BCRF, constatou-se a predominância de áreas de pastagem (62%), que representam a matriz paisagística dominante em praticamente toda a bacia do rio Paraíba do Sul. As áreas de floresta representam a segunda classe de UCS em área ocupada na BCRF, com 26,8% do total, enquanto as áreas de reflorestamento (Silvicultura) ocupam uma área significativa na BCRF, com 4,8% do total, com predomínio de espécies do gênero *Eucalyptus* e, em menor extensão, de *Pinus*.

As áreas urbanas ocupam uma área correspondente a 2,2% do total da BCRF, localizando-se majoritariamente ao longo do vale do rio Paraíba do Sul, com elevada concentração populacional e de indústrias.

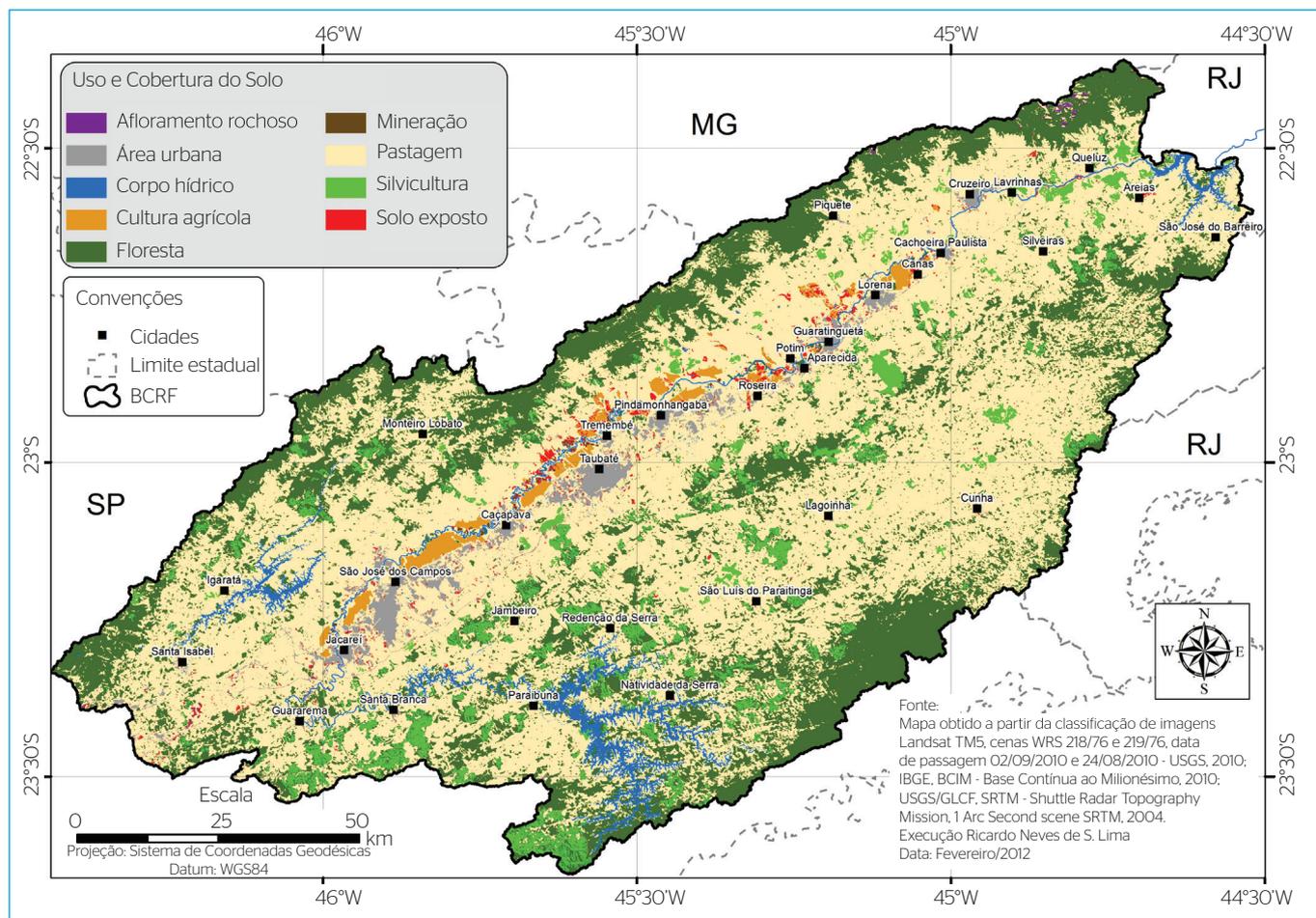
As culturas agrícolas representam 1,15% da área total da BCRF e correspondem principalmente a orizicultura irrigada, que ocupa as várzeas do rio Paraíba do Sul. Essa atividade é considerada altamente impactante pelo elevado volume de água utilizado na irrigação, assim como pela grande quantidade de nutrientes e defensivos agrícolas que são drenados das lavouras em direção aos corpos de água (ANDRADE et al., 2010).

As áreas de solo exposto e de mineração totalizaram 0,78% da área da BCRF e, apesar de representarem uma pequena fração da área da bacia, constituem importantes fontes de produção de sedimentos que levam ao assoreamento e eutrofização dos corpos de água superficiais.

**Tabela 3** – Quantificação das classes de uso e cobertura do solo na bacia de contribuição do reservatório de Funil.

Classe UCS	Área (km²)	Área (%)
Afloramento rochoso	6,88	0,05
Área urbana	304,34	2,27
Corpo hídrico	277,41	2,07
Cultura agrícola	153,85	1,15
Floresta	3600,37	26,85
Mineração	9,26	0,07
Pastagem	8319,17	62,04
Silvicultura	643,94	4,80
Solo exposto	94,99	0,71
Total	13410,20	100,00

UCS: de uso e cobertura do solo.



**Figura 3** – Mapa de uso e cobertura do solo.

## Cargas de exportação de nutrientes

O modelo de cargas potenciais de exportação de nutrientes de fontes pontuais (por célula), elaborado a partir das cargas remanescentes por setor censitário pode ser observado nas Figuras 4A e 4B.

Observa-se, nesses mapas, que as maiores cargas potenciais de exportação de N e de P de origem doméstica se concentraram nas áreas urbanas ao longo das várzeas do rio Paraíba do Sul, onde existe uma densidade populacional bastante elevada.

Os resultados do modelo de cargas potenciais de exportação de nutrientes de fontes difusas (por célula), elaborado a partir dos coeficientes de exportação por uso do solo, podem ser observados nas Figuras 4C e 4D.

Observa-se que as maiores cargas potenciais difusas de exportação de nutrientes estão concentradas ao longo do vale do rio Paraíba do Sul. Essa região apresenta intensa ocupação por cultivos irrigados de arroz e superfícies impermeabilizadas nas áreas urbanas, contribuindo com elevadas cargas de nutrientes para os cursos de água, especialmente para o rio Paraíba do Sul.

## Relação chuva-vazão

Com relação à análise das séries de vazões, constatou-se a estacionariedade do conjunto de registros fluviométricos ao longo do período adotado

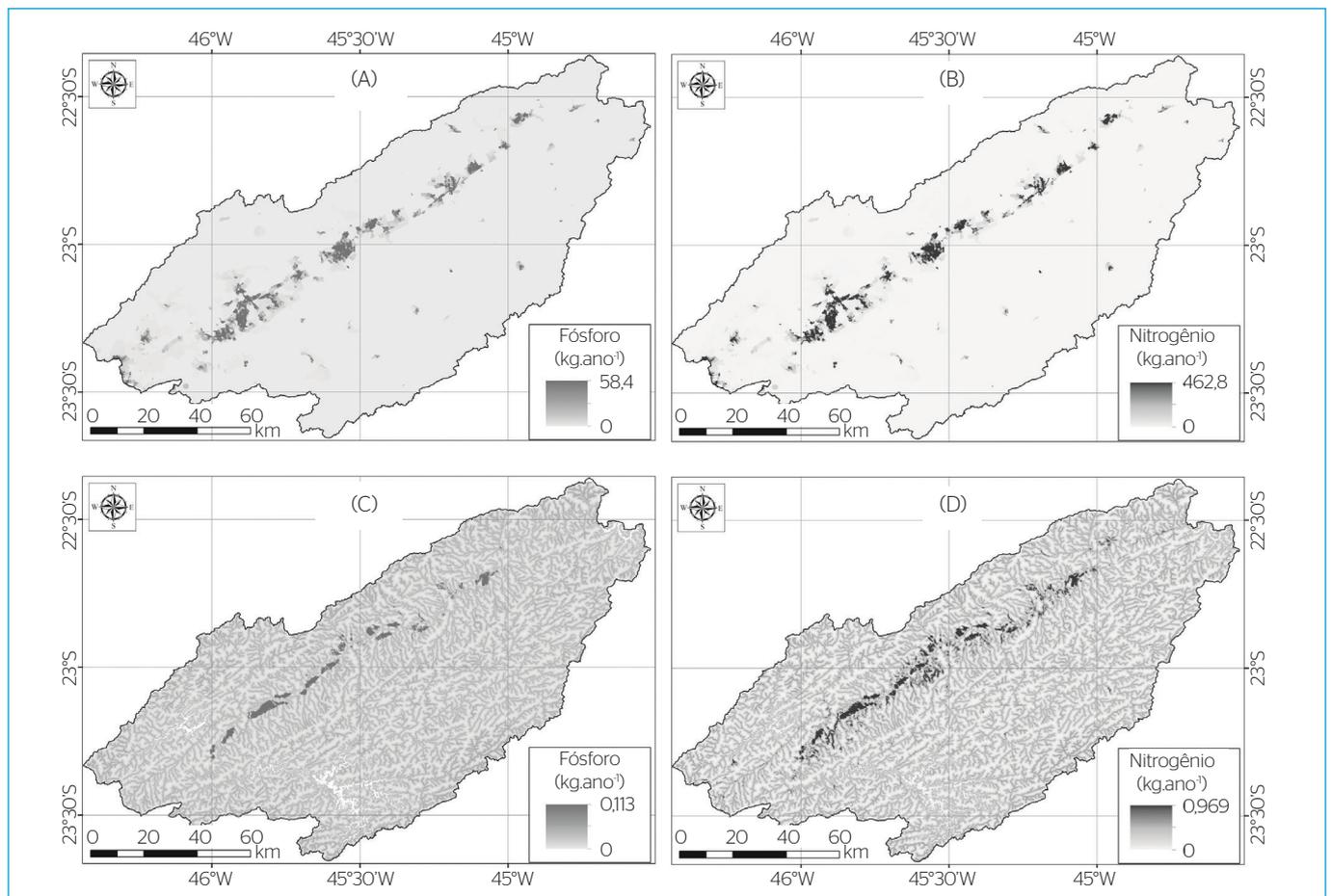
como base para o estudo. Na Tabela 4, são apresentadas algumas características hidrológicas da BCRF com relação ao período de referência utilizado da série histórica de registros das estações fluviométricas da ANA.

A extração das médias anuais de precipitação em cada área de drenagem obtidas a partir da interpolação das isoietas médias anuais (1977-2006) pode ser observada na Tabela 5, juntamente com os valores de vazão média de longo termo, convertido para  $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ .

Com o resultado da análise de regressão estatística entre a chuva e vazão nas AD's das estações fluviométricas, foi selecionado o modelo linear que melhor representou essa relação (Figura 5).

A partir do estabelecimento da relação chuva-vazão na BCRF, gerou-se o modelo de fluxo acumulado das vazões médias de longo termo (QMLT) em  $\text{m}^3\cdot\text{ano}^{-1}$  através do algoritmo FAP. Dessa forma, foi possível contabilizar as células que contribuem para o escoamento em cada ponto da bacia, somando suas vazões estimadas em cada célula, o que resultou na informação do volume acumulado escoado anualmente ( $\text{m}^3\cdot\text{ano}^{-1}$ ).

Na Tabela 6, são apresentados os desvios entre as vazões obtidas com o modelo de vazão anual acumulada e as vazões médias de longo termo observadas nas estações fluviométricas.



**Figura 4** - Modelo de cargas potenciais de exportação de nutrientes: fósforo (A) e nitrogênio (B) de fontes pontuais; fósforo (C) e nitrogênio (D) de fontes difusas.

Observou-se que o maior desvio absoluto foi de 20,7% na estação 58204000, localizada no rio Paraíba do Sul, próximo à cidade de Guaratinguetá (SP), sendo que, na média, os desvios absolutos situaram-se em 11,65%, demonstrando o bom desempenho do modelo.

### Cargas anuais acumuladas de nutrientes

A combinação dos planos de informação de direção do fluxo do escoamento superficial e das cargas de exportação de nutrientes, através da

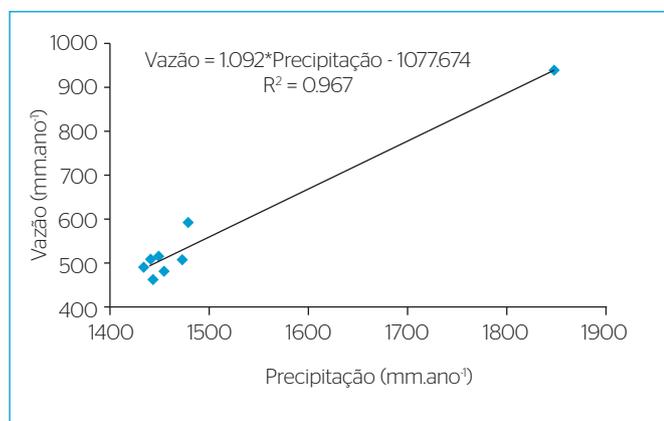
**Tabela 4** - Características hidrológicas nas estações fluviométricas pertencentes à Agência Nacional de Águas na bacia de contribuição do reservatório de Funil.

Cod. Estação	AD (km <sup>2</sup> )	Q <sub>MLT</sub> (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Q <sub>95</sub> (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Nº anos
58030000	733,0	13,71	6,60	28
58040000	1946,8	30,38	14,12	17
58060000	277,6	8,25	3,47	28
58099000	4934,0	79,66	37,61	28
58183000	9573,3	156,65	81,45	28
58204000	10746,3	157,70	88,04	17
58220000	233,7	3,79	1,61	28
58235100	12760,5	194,72	108,49	27

**Tabela 5** - Vazão e chuva média de longo termo por área de drenagem de cada estação.

Cod. Estação	Vazão QMLT (mm.ano <sup>-1</sup> )	Precipitação média anual (mm.ano <sup>-1</sup> )
58030000	58 972	1477,26
58040000	492,13	1434,11
58060000	937,29	1848,34
58099000	509,15	1442,29
58183000	516,04	1449,21
58204000	462,79	1443,21
58220000	511,24	1472,25
58235100	481,23	1453,42

QMLT: vazões médias de longo termo.



**Figura 5** - Modelo de regressão linear para a relação chuva-vazão e respectivo ajuste.

aplicação do algoritmo FAP, permitiu a quantificação da carga anual acumulada de nitrogênio e fósforo (em kg.ano<sup>-1</sup>) em cada célula no sentido do escoamento superficial (Figura 6).

O modelo de cargas potenciais acumuladas de nutrientes de fontes pontuais e não pontuais (difusas) totalizou, para a BCRF, uma carga potencial anual de 5.747.626 kg de nitrogênio e 649.812 kg de fósforo. As maiores cargas foram observadas no rio Paraíba do Sul, por ser o principal corpo receptor de poluentes da bacia. Nota-se, porém, que alguns cursos de água de menor porte também apresentaram elevada carga de nutrientes, principalmente aqueles localizados nas regiões de São José dos Campos (SP) e Taubaté (SP), por atravessarem áreas intensamente urbanizadas e de agricultura irrigada.

A modelagem da carga anual de nutrientes na BCRF indicou que cerca de 80% da carga total de nitrogênio foi proveniente de fontes pontuais e 20% de fontes difusas, enquanto que, da carga total de fósforo, 89,1% foi originada de fontes pontuais e 10,9% de fontes difusas. Com relação aos diferentes trechos da BCRF, definidos pelas áreas de drenagem das estações fluviométricas, observou-se que a proporção entre os nutrientes de fontes pontuais e difusas foi variada, sendo que a carga total estimada de nitrogênio, na maioria dos trechos, é proveniente de fontes difusas, enquanto que, para o fósforo, essa proporção apresentou tendência para a maior predominância das fontes pontuais (Figura 7).

A partir dos dados obtidos pelo modelo distribuído, observa-se que a contribuição das cargas anuais de nitrogênio de fontes difusas na BCRF foi significativa (20%). Esse fato indica que, apesar do elevado grau de urbanização dessa região, uma parcela considerável do processo de eutrofização dos corpos hídricos na BCRF pode estar relacionada aos tipos de cobertura e manejo do solo, especialmente nas áreas rurais e de cultura intensiva. Já com relação ao fósforo, percebe-se uma maior contribuição de fontes pontuais, como os esgotos domésticos, onde os compostos fosfatados inorgânicos originam-se, principalmente, dos detergentes e demais produtos químicos domésticos, enquanto os compostos fosfatados orgânicos têm sua origem vinculada aos dejetos fisiológicos da população residente (VON SPERLING, 2005).

**Tabela 6** - Comparação entre as vazões de longo termo observadas nas estações fluviométricas e as estimadas a partir do modelo de vazão anual acumulada.

Cod. Estação	QMLT Obs. (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	QMLT Simul. (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Desvio (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Desvio absoluto (%)
58030000	13,71	13,90	0,19	1,38
58040000	30,38	33,85	3,47	11,42
58060000	8,25	8,99	0,74	8,96
58099000	79,66	87,22	7,56	9,49
58183000	156,65	171,69	15,04	9,60
58204000	157,70	190,37	32,67	20,72
58220000	3,79	4,43	0,64	16,92
58235100	194,72	230,73	36,01	18,49

QMLT: vazões médias de longo termo.

O trecho da BCRF onde se verificou a maior contribuição por fontes difusas na carga de N e P foi correspondente à área de drenagem da estação 58060000, com 88,1% da carga total de nitrogênio e 78,8% da carga total de fósforo. A cobertura do solo nessa região é predominantemente formada por florestas (73%), com um contingente populacional restrito (1.427 habitantes), baixa densidade demográfica (5,14 habitantes.km<sup>-2</sup>) e onde a população residente é inteiramente rural, o que resulta em uma baixa participação de efluentes sanitários (fontes pontuais) na carga total de nutrientes gerados nessa área.

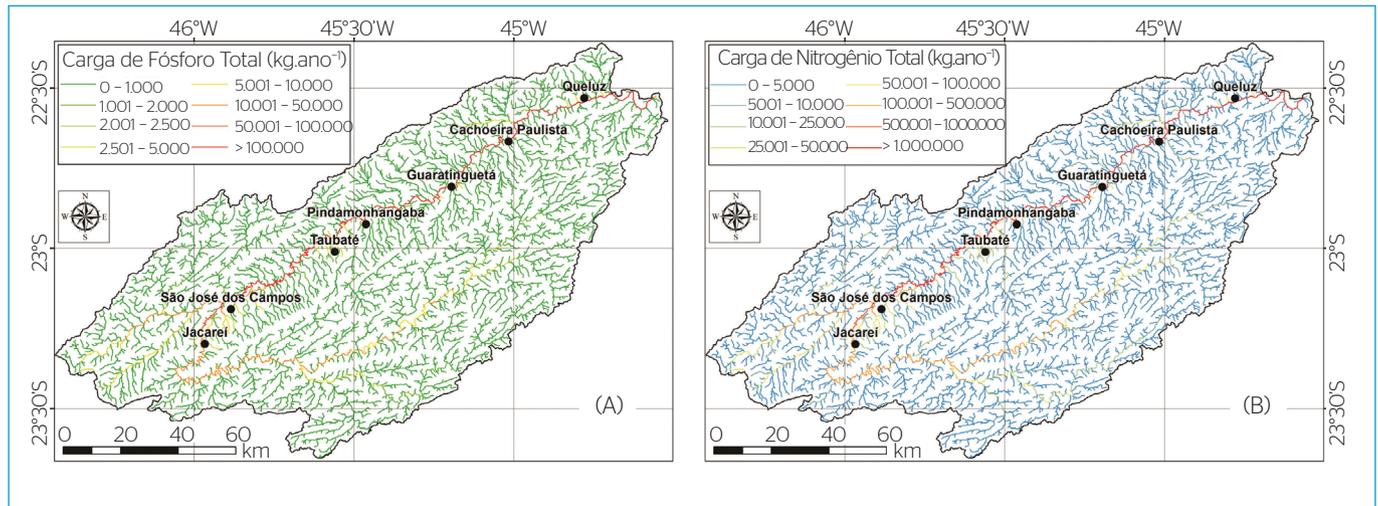
A região com maior contribuição por efluentes sanitários (fontes pontuais) na carga total estimada de N e P foram as áreas de drenagem das estações localizadas no rio Paraíba do Sul (58183000, 58204000 e 58235100), as quais abrangem o trecho entre São José dos Campos e Queluz. Nessa região, a população é predominantemente urbana, com elevada densidade demográfica média (166 habitantes.km<sup>-2</sup>), o que resulta em uma intensa descarga de efluentes sanitários de origem

doméstica, que contribuem diretamente para a poluição do rio Paraíba do Sul nesse trecho.

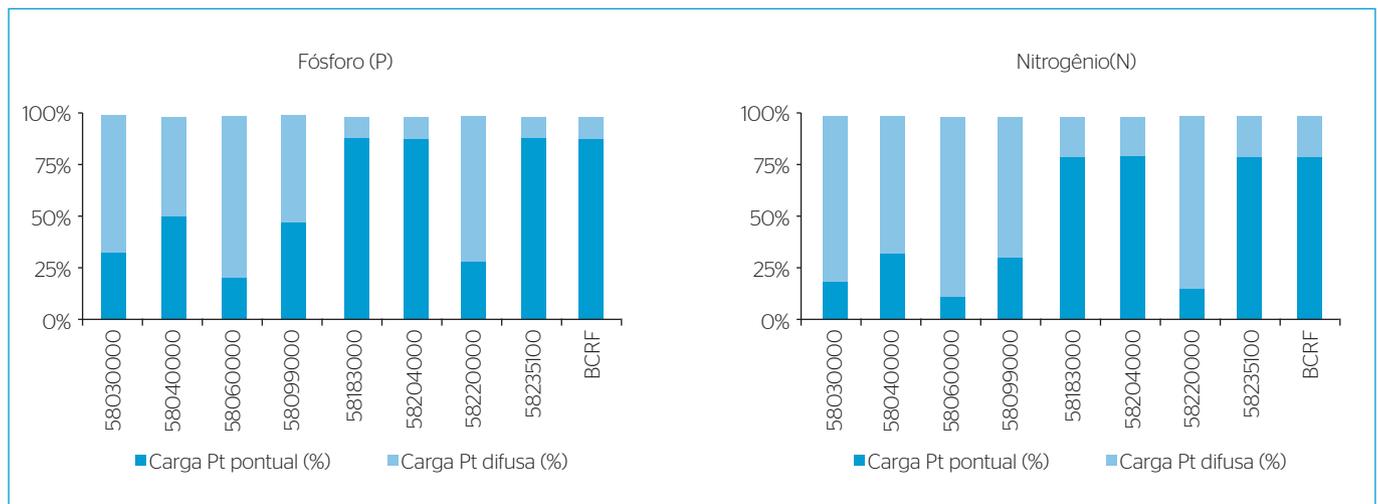
**Concentração média estimada de nutrientes**

A concentração média de nutrientes na BCRF (em mg.L<sup>-1</sup>) por AD (Tabela 7) foi obtida a partir do modelo da concentração anual de nitrogênio e fósforo (Figura 8). Esse modelo resultou da combinação do modelo de cargas totais acumuladas de N e P (em kg.ano<sup>-1</sup>) e do modelo de fluxo acumulado das vazões médias (em m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>) por meio da Equação 2.

A concentração de nutrientes nos corpos de água da bacia, estimada pelo modelo distribuído, mostrou haver uma forte pressão sobre a qualidade das águas, a qual ocorre, de forma concentrada, no trecho central da bacia ao longo do rio Paraíba do Sul, especialmente entre Jacareí e Cachoeira Paulista (Figura 8). Além do elevado grau de urbanização nesse trecho, os cultivos de arroz irrigado e a mineração são importantes fatores de degradação da qualidade das águas superficiais.



**Figura 6 -** Modelo do potencial de cargas anuais acumuladas de nutrientes na bacia de contribuição do reservatório de Funil - fósforo (A) e nitrogênio (B).



**Figura 7 -** Proporção entre as cargas de fontes pontuais e difusas de Fósforo e Nitrogênio nos diferentes locais (estações) da bacia de contribuição do reservatório de Funil.

Nos tributários da margem direita do rio Paraíba do Sul, ao longo desse trecho, foram obtidas as maiores concentrações de nutrientes, influenciadas pelas baixas vazões estimadas, as quais resultam em uma menor capacidade de diluição dos poluentes. Somado a isso, as elevadas cargas domésticas e agrícolas que esses corpos de água recebem anualmente condicionam uma grande vulnerabilidade com relação à poluição orgânica. As regiões das serras do Mar e da Mantiqueira, ao sul e ao norte da bacia, abrigam importantes remanescentes florestais que favorecem a manutenção da qualidade das águas. Especialmente nos tributários da margem esquerda do rio Paraíba do Sul, foram observadas as menores concentrações de nutrientes, em razão principalmente da baixa ocupação e da maior proporção de cobertura vegetal.

A comparação entre as concentrações simuladas pelo modelo de concentração de nutrientes e os registros observados de fósforo e nitrogênio na BCRF, utilizando os dados de qualidade das águas monitoradas pela CETESB em determinados pontos da bacia, pode ser verificada na Figura 9. Os valores observados correspondem à média do ano de 2010 (CETESB, 2011).

A partir do gráfico da Figura 9, pode-se constatar que as concentrações de N e P estimadas pelo modelo distribuído foram similares aos valores

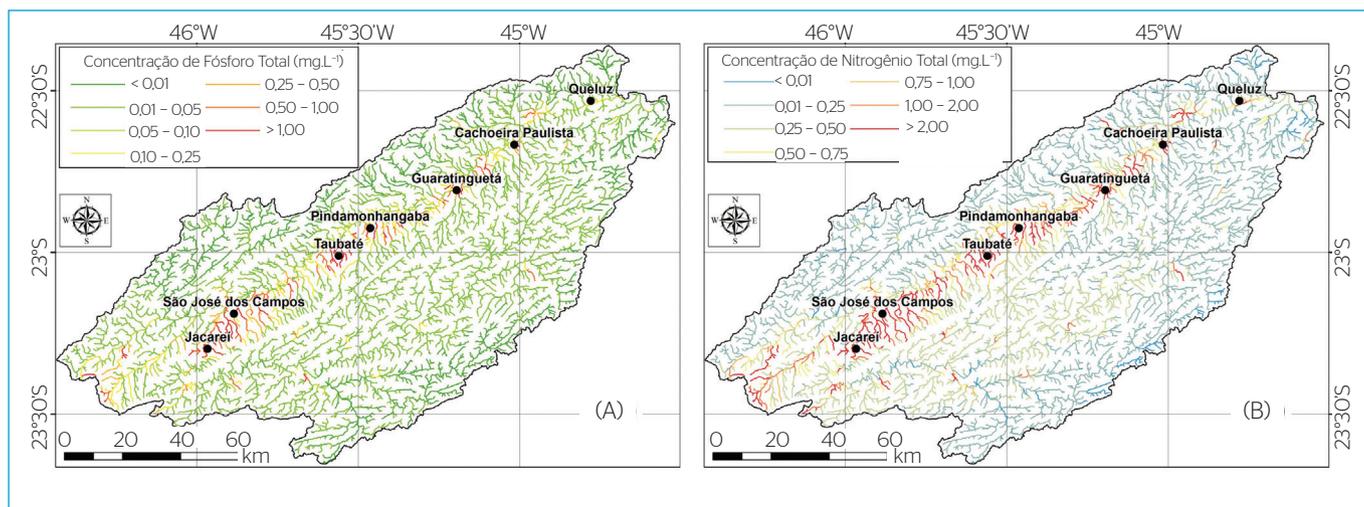
médios observados no ano de 2010 nas estações de monitoramento da CETESB. O desvio absoluto médio em relação aos valores observados foi de 42,8% para as concentrações de nitrogênio e de 13,4% para as concentrações de fósforo. O maior desvio observado para os valores simulados de nitrogênio foi de -267% na estação UNNA 02800, localizada no rio Una, enquanto que, para o fósforo, o maior desvio foi de +55,1% na estação localizada no rio Parateí (PTEI 02900). Tais diferenças podem ser decorrentes da menor capacidade do modelo para estimar as cargas de nutrientes em cursos de água de pequeno porte, como os rios Parateí e Una, onde influências de pequena escala podem gerar maiores variações na concentração de nutrientes na água. No entanto, considerando apenas as estações localizadas no rio Paraíba do Sul (PARB 02050 a 02900), os desvios médios absolutos foram de 10,4 e 22,3%, para o fósforo e nitrogênio, respectivamente, o que demonstrou o bom desempenho do modelo nesse trecho da bacia. Verificou-se, também, nesse trecho, que as relações lineares entre as concentrações simuladas e observadas de fósforo e nitrogênio foram significativas, com  $R^2=0,96$  ( $p<0,01$ ) e  $R^2=0,70$  ( $p<0,01$ ), respectivamente, indicando, de modo bastante aderente, a tendência das variações nas concentrações potenciais de nutrientes ao longo de diferentes trechos do rio Paraíba do Sul na BCRF.

Observou-se, ainda, que as correlações entre as cargas simuladas e as concentrações observadas de N e P nas estações localizadas no rio Paraíba do Sul foram significativas, como apresentado nos gráficos da Figura 10. Assim, o modelo utilizado, neste trabalho, poderia servir, também, como uma ferramenta de predição, ainda que preliminar, das concentrações de nutrientes e, portanto, do grau de poluição orgânica nesse trecho da bacia.

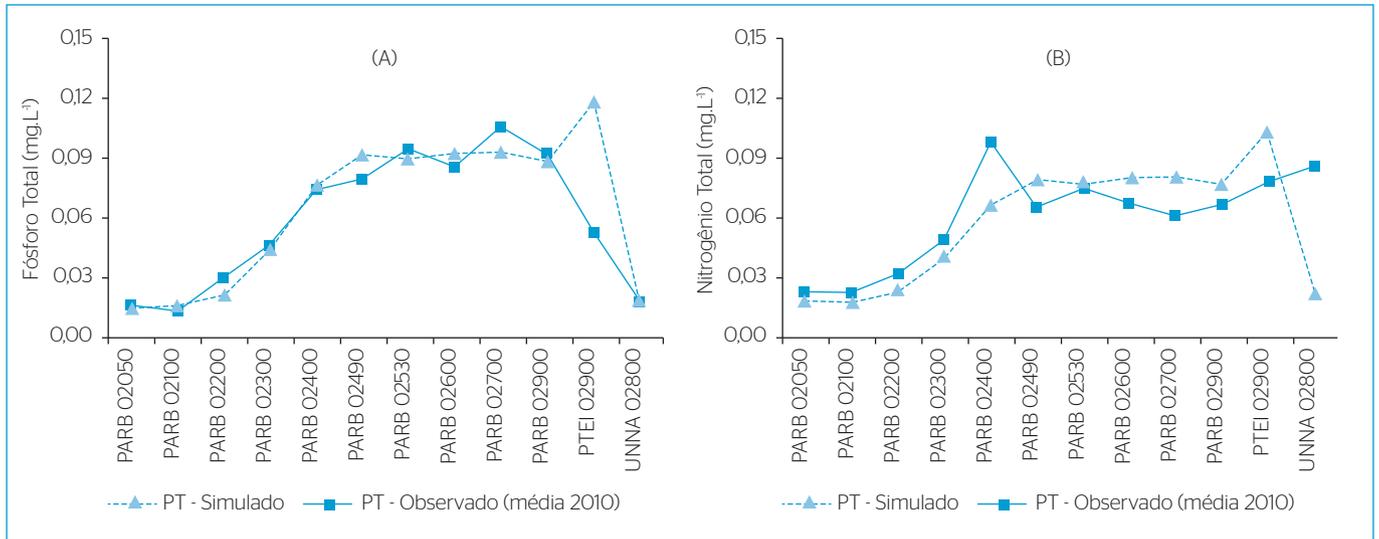
Cabe destacar que, neste estudo, o transporte de nutrientes no meio aquático foi considerado conservativo e, portanto, as cargas e concentrações aqui apresentadas seriam capazes apenas de permitir conduzir uma avaliação preliminar ou estimar o potencial de transporte anual de nutrientes na BCRF.

**Tabela 7** - Concentrações médias simuladas de Nitrogênio e Fósforo nas estações fluviométricas.

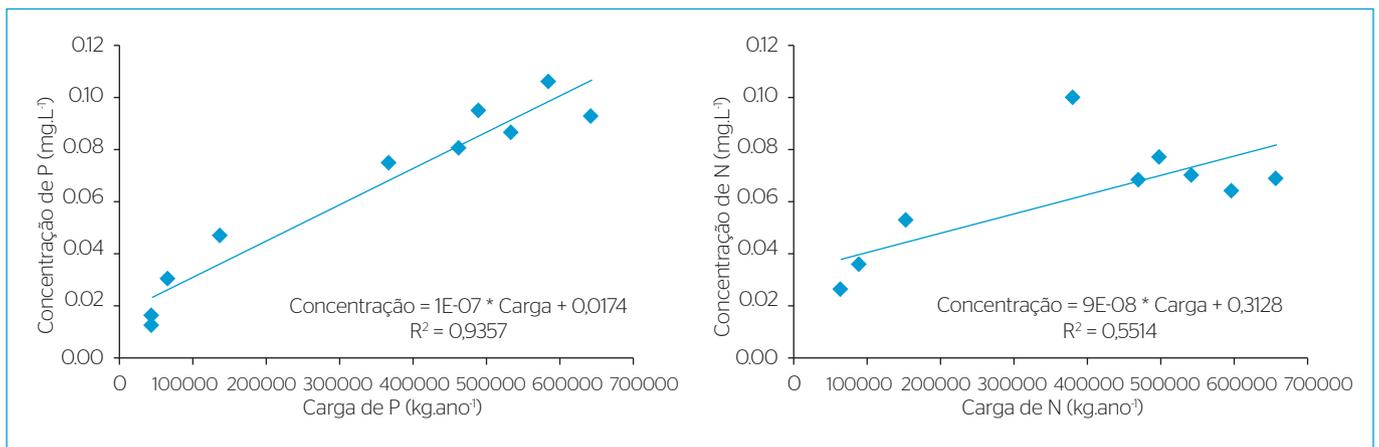
Cod. Estação	Concentração média anual simulada (mg.L <sup>-1</sup> )	
	Nitrogênio (N)	Fósforo (P)
58030000	0,157	0,011
58040000	0,204	0,016
58060000	0,095	0,007
58099000	0,199	0,016
58183000	0,793	0,090
58204000	0,815	0,093
58220000	0,160	0,011
58235100	0,779	0,088



**Figura 8** - Modelo do potencial de concentração média anual de nutrientes na bacia de contribuição do reservatório de Funil - fósforo (A) e nitrogênio (B).



**Figura 9** - Comparação entre as concentrações observadas e simuladas de fósforo total (A) e nitrogênio total (B) total na bacia de contribuição do reservatório de Funil.



**Figura 10** - Modelo de regressão linear para a relação entre as cargas simuladas e as concentrações observadas de nitrogênio e fósforo nas estações do rio Paraíba do Sul na bacia de contribuição do reservatório de Funil.

## CONCLUSÕES

No presente trabalho, o método aplicado, baseado na modelagem distribuída da poluição orgânica na BCRF, em ambiente SIG, possibilitou avaliar o potencial de geração de fósforo e de nitrogênio por fontes pontuais e difusas a partir de modelos de cargas unitárias baseadas em informações populacionais e dos tipos de uso e cobertura do solo. Complementarmente, foi possível indicar as possíveis origens e estimativas de suas cargas e concentrações anuais na rede de drenagem.

O modelo de cargas acumuladas indicou que os trechos da BCRF com maior produtividade de nutrientes estariam relacionados principalmente à maior proporção de áreas ocupadas por culturas agrícolas e superfícies urbanizadas e à elevada densidade demográfica, enquanto as áreas menos produtivas seriam influenciadas pela maior proporção

de cobertura florestal e pela baixa densidade demográfica. Verificou-se que grande parte dos afluentes da margem direita do rio Paraíba do Sul, ao longo do trecho Jacaré-Cachoeira Paulista, apresentariam as maiores concentrações de nutrientes em razão da elevada carga potencial de N e P associada às baixas vazões estimadas nesses tributários. Nos afluentes da margem esquerda, as condições seriam mais favoráveis devido ao menor aporte de cargas orgânicas.

Apesar das limitações observadas, os resultados obtidos permitiram a obtenção de um panorama espacializado das pressões antrópicas sobre os recursos hídricos superficiais da BCRF, com relação aos nutrientes fósforo e nitrogênio, podendo servir como instrumento em estudos ambientais integrados e na tomada de decisão de planejadores e gestores públicos a partir de informações de fácil acesso à comunidade e pesquisadores em geral.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, M.H.; SOUZA, C.F.; VARALLO, A.C.T.; PERES, J.G. (2010) Impactos da produção de arroz inundado na qualidade da água do rio Paraíba do Sul - trecho Taubaté, SP, Brasil. *Revista Ambiente & Água*, v. 5, n. 1, p. 114-133.
- Arnold, J.G.; Srinivasan, R.; Muttiah, R.S.; Williams, J.R. (1998) Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: model development. *Journal of American Water Resources Assessment*, v. 34, p. 73-89.
- Arnold, J.G.; Moriasi, D.N.; Gassman, P.W.; Abbaspour, K.C.; White, M.J.; Srinivasan, R.; Santhi, C.; Harmel, R.D.; van Griensven, A.; van Liew, M.W.; Kannan, N.; Jha, M.K.. (2012) SWAT: model use, calibration, and validation. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, v. 55, p. 1491-1508.
- Bingner, R.L. & Theurer, F.D. (2005) AnnAGNPS technical processes: documentation version 3.2, USDA-ARS National Sedimentation Laboratory, 2005. Disponível em: <[http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/60600505/AGNPS/PLModel/Document/Tech\\_Doc.PDF](http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/60600505/AGNPS/PLModel/Document/Tech_Doc.PDF)> Acesso em: 01 dez. 2005.
- BUARQUE, D.C.; FAN, F.M.; PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W. (2009) Comparação de métodos para definir direções de escoamento a partir de modelos digitais de elevação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 14, n. 2, p. 91-103.
- CECCHI, G.; MUNAFÒ, M.; BAIOTTO, F.; ANDREANI, P.; MANCINI, L. (2007) Estimating river pollution from diffuse sources in the Viterbo province using the potential non-point pollution index. *Annali dell'Istituto Superiore di Sanità*, v. 43, n. 3, p. 295-301.
- COMITÊ EXECUTIVO DE ESTUDOS INTEGRADOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAIBA DO Sul - CEIVAP. (2006) *Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul - Resumo*. Diagnóstico dos Recursos Hídricos - Relatório Final (PSR-010-RO - Relatório Contratual R-7). Resende-RJ: AGEVAP. 201 p. Disponível em: <<http://www.ceivap.org.br/downloads/PSR-010-RO.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2011.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. (2011) *Qualidade das águas superficiais no Estado de São Paulo 2010*. São Paulo-SP: CETESB. 300p. Disponível em: <[http://aguasinteriores.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/32/2013/11/relatorio\\_2010.zip](http://aguasinteriores.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/32/2013/11/relatorio_2010.zip)> Acesso em: 01 out. 2015.
- FUNDAÇÃO CHRISTIANO ROSA - FCR. (2009) *Plano da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul - UGRHI 02 - 2009-2012*. Piquete-SP: FCR. 325 p.
- GRUPO DE PESQUISAS EM RECURSOS HÍDRICOS - GPRH. (2009) *SISCAH Sistema Computacional para Análises Hidrológicas - Versão 1.0*. Viçosa: GPRH.
- GRIZZETTI, B.; BOURAOUI, F.; DE MARSILY, G. (2005) Modelling nitrogen pressure in river basins: A comparison between a statistical approach and the physically-based SWAT model. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 30, p. 508-517.
- HUANG, J. & HONG, H. (2010) Comparative study of two models to simulate diffuse nitrogen and phosphorus pollution in a medium-sized watershed, southeast China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 86, p. 387-394.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. (2010) *Censo Demográfico 2010. Agregados por Setores Censitários*. Disponível em: <[http://downloads.ibge.gov.br/downloads\\_estatisticas.htm](http://downloads.ibge.gov.br/downloads_estatisticas.htm)>. Acesso em: 21 maio 2012.
- JENSON, S.K. & DOMINGUE, J.O. (1988) Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 54, n. 11, p. 1593-1600.
- LIBOS, M.; ROTUNNO FILHO, O.C.; ZEILHOFER, P. (2003) Modelagem da poluição não pontual na bacia do rio Cuiabá baseada em Geoprocessamento. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 8, n. 4, p. 113-135.
- LINS, R.C.; MENDES, C.A.B.; AGRA, S.G.; CARVALHO, A.E.; FRAGOSO JÚNIOR, C.R. (2012) Integração de um Modelo Hidrológico a um SIG para Avaliação da Qualidade da Água na Bacia do Rio Doce. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, n. 4, p. 171-181.
- MILLER, G.T. (2007) *Ciência ambiental*. São Paulo: Thomson Learning. 123p.
- MORUZZI, R.B.; COCEIÇÃO, F.T.; SARDINHA, D.S.; HONDA, F.P.; NAVARRO, G.R.B. (2012) Avaliação de cargas difusas e simulação de autodepuração no córrego da Água Branca, Itirapina (SP). *Geociências*, v. 31, n. 3, p. 447-458.
- NEVES, F.F.; DA SILVA, F.G.B.; CRESTANA, S. (2006) Uso do modelo AVSWAT na avaliação do aporte de nitrogênio (N) e fósforo (P) aos mananciais de uma microbacia hidrográfica contendo atividade avícola. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 11, n. 4, p. 311-317.
- RIVERS, M.R.; WEAVER, D.M.; SMETTEM, K.R.J.; DAVIES, P.M. (2011) Estimating future scenarios for farm-watershed nutrient fluxes using dynamic simulation modeling. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 36, p. 420-423.
- SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - SMA. (2010) *Elaboração do Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da Bacia Hidrográfica do Reservatório Billings. Relatório Final*. Processo N° 7097/2007, Contrato SMA/CPLA N° 09/2007, São Paulo.
- STEINKE, V.A. & SAITO, C.H. (2008) Exportação de carga poluidora para identificação de áreas úmidas sob risco ambiental na bacia hidrográfica da Lagoa Mirim. *Sociedade & Natureza*, v. 20, n. 2, p. 43-67.
- THOMANN, R.V. & MUELLER, J.A. (1987) *Principles of surface water quality modeling and control*. New York: Harper & How, 644 p.
- VALERIANO, M.M.; ROSSETTI, D.F.; ALBUQUERQUE, P.C.G. (2009) TOPODATA: desenvolvimento da primeira versão do banco de dados geomorfológicos locais em cobertura nacional. In: *XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 25-30 abril 2009, Natal. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2009. Artigos p. 5499-5506. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.14.21.06/doc/5499-5506.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2012.
- VON SPERLING, M. (2005) *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 3 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais. 452 p.