

Quantificação das cargas de nitrogênio e fósforo na sub-bacia hidrográfica do ribeirão Bom Jardim (MG)



Quantification of nitrogen and phosphorus loads in the Bom Jardim river sub-basin (MG)



- **Data de entrada:**
27/02/2018
- **Data de aprovação:**
22/01/2019

Alessandra Campos dos Santos^{1*} | Caroline Soler Martins¹ | Nágela Aparecida de Melo¹ | José Eduardo Alamy Filho¹

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2020.050>

ORCID ID

Santos AC  <https://orcid.org/0000-0002-9322-8391>
Martins CS  <https://orcid.org/0000-0003-3907-179X>

Melo NA  <https://orcid.org/0000-0002-7188-3985>
Filho JEA  <https://orcid.org/0000-0001-5207-9396>

Resumo

A poluição e a degradação dos recursos hídricos, principalmente por atividades antrópicas, constituem-se em alguns dos maiores desafios da gestão da água. O avanço da agricultura e da pecuária em áreas de vegetação natural pode comprometer o fornecimento de água em quantidade e de qualidade. Isso porque essas atividades geram poluentes que podem ser transportados para os corpos d'água. Assim, o presente trabalho tem como objetivo estimar as descargas de nutrientes (nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal e fósforo) e os índices de abatimento desses nutrientes para diferentes cenários de uso e ocupação do solo na sub-bacia do ribeirão Bom Jardim, utilizando o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), e comparar com valores medidos em campo. A referida sub-bacia está localizada entre os municípios de Uberlândia e Uberaba (MG), e seus cursos d'água alimentam o reservatório de água do Bom Jardim, destinado para o abastecimento público da cidade de Uberlândia. Os resultados gerados por meio das simulações no SWAT mostraram que as áreas ocupadas por agricultura tendem a gerar uma quantidade maior de escoamento superficial, o que contribui para o aporte de nutrientes no exutório da sub-bacia. As simulações também mostraram que a substituição de parte das áreas de agricultura por mata é uma alternativa interessante no que diz respeito à redução das descargas de nutrientes. Os índices de abatimento de nutrientes calculados apontaram o nitrato como o mais sensível a alterações, indicando que uma dada substituição por floresta consegue retribuir em uma maior atenuação deste nutriente.

Palavras-chave: Bacia hidrográfica. SWAT. Simulação hidrológica.

Abstract

*Pollution and degradation of water resources, mainly by anthropic activities, are some of the major challenges of water management. The advancement of agriculture and livestock in areas of natural vegetation can compromise the supply of water in quantity and quality. This is because these activities generate pollutants that can be transported to water bodies. Thus, the present work aims to estimate the nutrient discharges (nitrate, nitrite, ammoniacal nitrogen and phosphorus) and the abatement indices of these nutrients for different land use and occupation scenarios in the sub-basin of the Bom Jardim river, using the model *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), and compare with measured values in the field. This*

¹ Universidade Federal de Uberlândia (UFU) - Uberlândia - Minas Gerais - Brasil.

***Autora correspondente:** s.c.ale@hotmail.com.

sub-basin is located between Uberlândia and Uberaba (MG), and its rivers feed the Bom Jardim water reservoir, destined for the public supply of the city of Uberlândia. The results generated by the SWAT simulations showed that the areas occupied by agriculture tend to generate a greater amount of surface runoff, which contributes to the nutrient supply in the sub-basin. The simulations also showed that the substitution of part of the areas of agriculture by forest is an interesting alternative in what concerns the reduction of the nutrient discharges. The calculated nutrient abatement rates indicated nitrate as the most sensitive to the changes, indicating that a given substitution by forest can compensate in a greater attenuation of this nutrient.

Keywords: Watershed. SWAT. Hydrological simulation.

1 INTRODUÇÃO

A água proveniente da precipitação pode seguir diferentes caminhos, através da infiltração no perfil do solo, do escoamento superficial, do escoamento subterrâneo, da evapotranspiração, entre outros. Esses componentes do ciclo hidrológico são influenciados, principalmente, pela cobertura e pelo uso do solo, que por sua vez também interferem na qualidade da água dos mananciais (SAJIKUMAR; REMYA, 2015). O transporte de nutrientes das áreas de terra para os corpos d'água é um resultado normal dos processos erosivos. Porém cargas excessivas de nutrientes nos corpos hídricos podem causar eutrofização e tornar a água imprópria para o consumo humano (NEITSCH et al., 2011). A principal ligação entre o uso do solo para agricultura e a poluição da água das bacias pode ser explicada pela grande quantidade de fertilizantes e agrotóxicos que são aplicados nessas áreas (HUANG et al., 2015).

Haja vista a relevante relação entre o uso e o manejo do solo com os componentes do ciclo hidrológico, e a conseqüente influência na disponibilidade e na distribuição hídrica, na produção e no transporte de nutrientes em uma bacia hidrográfica, estudos visando o entendimento dessas relações são cada vez mais comuns. Os modelos hidrológicos desempenham um papel importante nesse sentido, servindo de auxílio nas estratégias de gerenciamento dos recursos hídricos (VOLK; BOSCH, 2017).

Os modelos melhoram a compreensão dos sistemas hidrológicos de uma determinada área por meio de representações matemáticas do fluxo de água e seus constituintes, além de ajudar a avaliar os efeitos de diferentes mudanças, como as alterações climáticas e as modificações no uso e ocupação do solo (MEIYAPPAN et al., 2014; ZAHABIYOUN et al., 2013). Existem diversos modelos desenvolvidos com o objetivo de quantificar os recursos hídricos e os nutrientes em escala de bacia hidrográfica, sendo o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) o escolhido para a realização deste trabalho. O SWAT (ARNOLD et al., 1998) é caracterizado por ser um modelo de tempo contínuo, que opera em um passo de tempo diário, capaz de realizar simulações por longos períodos de tempo. Ele foi desenvolvido com a finalidade de prever o impacto do uso e do manejo do solo sobre os recursos hídricos, sedimentos e nutrientes, em escala de bacia hidrográfica (GASSMAN et al., 2007). Os principais elementos do modelo SWAT incluem o clima, a hidrologia, as propriedades do solo, o crescimento das plantas, o uso e manejo do solo, os nutrientes, os pesticidas, as bactérias e os patógenos. Para realizar as simulações, o SWAT divide a bacia hidrográfica em diversas sub-bacias, que depois são subdivididas em Unidades de Resposta Hidrológica (URH). As URHs são áreas homogêneas, caracterizadas por apresentarem o mesmo tipo de solo, uso e manejo do solo, e mesma declividade (ARNOLD et al., 2012).

O presente artigo tem como objetivo estimar as descargas de nutrientes (nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal e fósforo) e os índices de abatimento destes nutrientes para diferentes cenários de uso e ocupação do solo na sub-bacia do ribeirão Bom Jardim, utilizando o modelo SWAT, e comparar com valores medidos em campo.

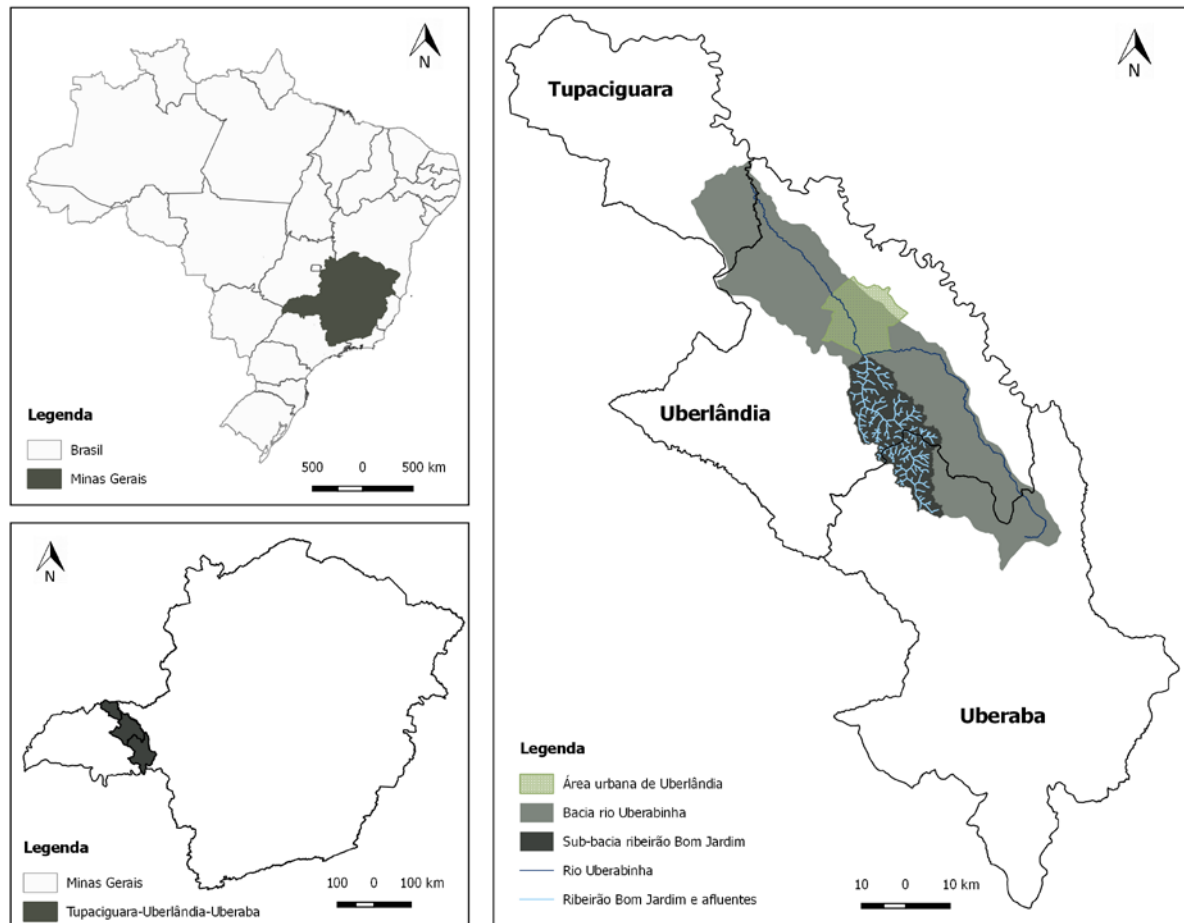
2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Este trabalho tem como área de estudo a sub-bacia hidrográfica rural do ribeirão Bom Jardim,

que abrange parte do território dos municípios de Uberlândia e Uberaba, localizados na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, no estado brasileiro de Minas Gerais (Fig. 1). A referida sub-bacia possui uma área de drenagem de 398,54 km², com um perímetro de 108,848 quilômetros. O ribeirão do Bom Jardim tem sua nascente em Uberaba, percorrendo cerca de 40 quilômetros até a sua foz no rio Uberabinha, próximo à área urbana de Uberlândia (BRITO, 2002). O ribeirão Bom Jardim e seus afluentes alimentam um reservatório que é o responsável por aproximadamente 50% do abastecimento de água da cidade de Uberlândia.

Figura 1 - Localização da sub-bacia hidrográfica do ribeirão Bom Jardim



Sistema de Referência de Coordenadas SIRGAS 2000 UTM zone 22 S Elaborado por: Alessandra Campos dos Santos 2017

Fonte: IBGE (2017a); Topodata (2017)

2.2 Base cartográfica

Para a geração do Modelo Digital de Elevação (MDE), utilizaram-se as cartas topográficas do Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (Topodata) (INPE, 2017), com resolução espacial de 90 metros (Fig. 2). Os dados pedológicos e de declividade foram retirados do estudo realizado por Brito (2002) na região do Bom Jardim (Fig. 3). O mapa de uso e ocupação do solo foi gerado a partir das imagens de satélite do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2016), com resolução espacial de 30 metros (Fig. 4).

2.3 Dados climáticos

Os dados climáticos diários que foram utilizados são referentes ao período de 01 de janeiro

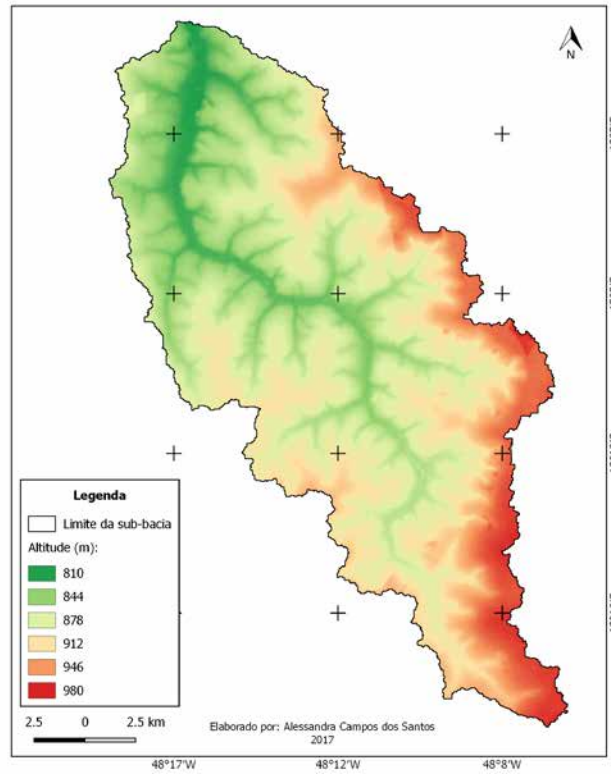
de 1981 a 31 de dezembro de 2016, totalizando 35 anos contínuos. Esses dados correspondem às séries históricas das estações meteorológicas e pluviométricas localizadas nas proximidades da sub-bacia do ribeirão Bom Jardim (Tabela 1).

Para o Gerador Climático do SWAT, utilizado com o objetivo de preencher as falhas nas séries históricas, os parâmetros climáticos obtidos das estações meteorológicas de Uberlândia-A507 (86776) e de Uberaba (83577) foram parametrizados mensalmente. Essa parametrização consiste no cálculo da média mensal e do desvio padrão. Esses cálculos foram realizados por meio de uma planilha eletrônica WGN Macro, disponibilizada gratuitamente no site do SWAT.

Tabela 1 – Estações e dados climáticos utilizados nas simulações e suas fontes

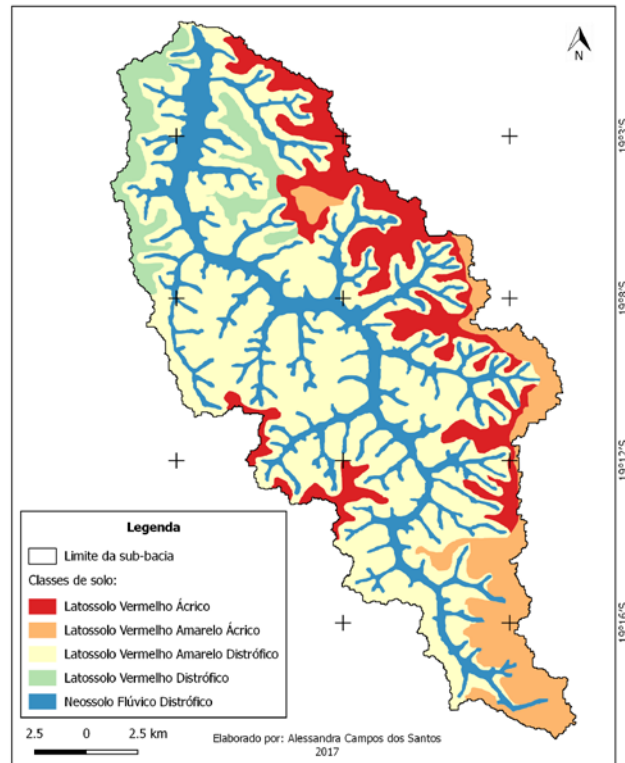
| Estações Pluviométricas | Dados | Fonte |
|-----------------------------------|---|---|
| Patrimônio Rio do Peixe (1948016) | Precipitação (mm) | (HIDROWEB, 2016) |
| Fazenda Paraíso (1948005) | | |
| Itiguapira (1947026) | | |
| Fazenda Letreiro (1948006) | | |
| Porto Saracura (1947019) | | |
| Estações Meteorológicas | Dados | Fonte |
| Uberlândia-A507 (86776) | Precipitação (mm), temperatura máxima e mínima (°C), radiação solar (MJ/m ² /dia), velocidade do vento (m/s) e umidade relativa (fração) | Laboratório de Climatologia e Recursos Hídricos do Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia |
| Uberaba (83577) | | Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa do Instituto Nacional de Meteorologia |

Figura 2 - Mapa Altimétrico da sub-bacia do ribeirão Bom Jardim (2017)



Fonte: Topodata (2017)

Figura 3 – Mapa Pedológico da sub-bacia do ribeirão Bom Jardim, 2002



Fonte: Brito (2002)

2.4 Dados de uso e ocupação do solo

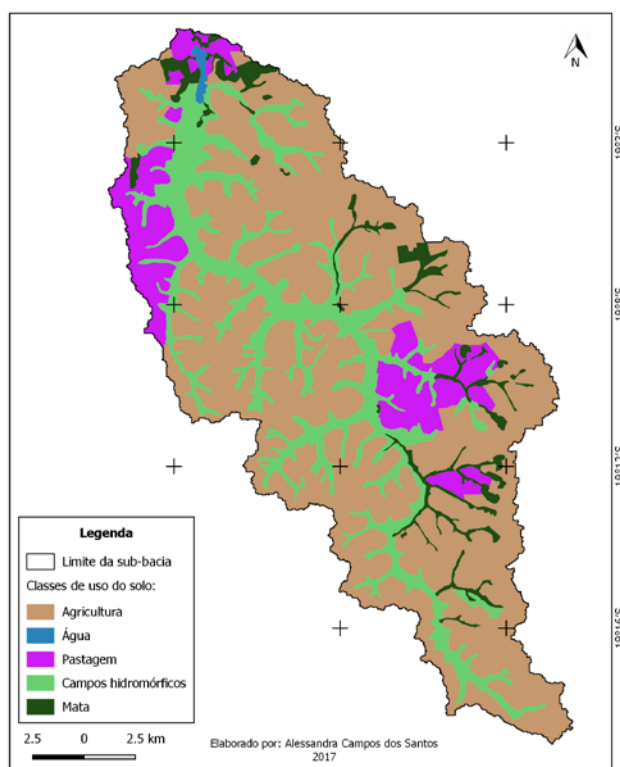
Para uma melhor diferenciação do uso do solo, a área de agricultura, que representa 64,40% da área total da sub-bacia, foi subdividida em soja (52%), milho (25,5%) e cana-de-açúcar (22,5%). Essa divisão foi feita de acordo com estudos realizados pelo IBGE a respeito da produção agrícola de lavouras temporárias nos municípios de Uberlândia e Uberaba (IBGE, 2017b; IBGE, 2017c). As classes de uso do solo e

suas respectivas áreas e códigos do SWAT estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Classes de uso do solo da sub-bacia do Bom Jardim de acordo com o SWAT

| Classes | Área (%) | Código do SWAT |
|----------------------|----------|----------------|
| Água | 0,30 | WATR |
| Campos hidromórficos | 19,94 | RNGE |
| Mata | 5,16 | FRST |
| Pastagem | 10,20 | PAST |
| Soja | 33,49 | SOYB |
| Milho | 16,42 | CORN |
| Cana-de-açúcar | 14,49 | SUGC |
| - | 4,399 | 32,012 |

Figura 4 – Mapa de Uso e Ocupação do Solo da sub-bacia do ribeirão Bom Jardim (2016)



Fonte: INPE (2016)

2.5 Descrição do modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT)

Para que o SWAT possa representar todos os processos hidrológicos da bacia hidrográfica, o ciclo hidrológico é simulado baseado no balanço hídrico, descrito pela Eq. 1.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

Na qual:

SW_t = quantidade final de água no solo ($\text{mm H}_2\text{O}$);

SW_0 = quantidade inicial de água no solo no dia i ($\text{mm H}_2\text{O}$).

t = tempo (dias).

R_{day} = quantidade de precipitação no dia i ($\text{mm H}_2\text{O}$).

Q_{surf} = quantidade de escoamento superficial no dia i ($\text{mm H}_2\text{O}$).

E_a = quantidade de evapotranspiração no dia i ($\text{mm H}_2\text{O}$).

w_{seep} = quantidade de água que entra na zona de aeração do perfil do solo no dia i ($\text{mm H}_2\text{O}$).

Q_{gw} = quantidade de fluxo de retorno no dia i ($\text{mm H}_2\text{O}$).

O modelo SWAT, geralmente, calcula o escoamento superficial por meio do método do número da curva (CN) do *The Natural Resources Conservation Service* (USDA-NRCS, 2004). O método CN utiliza uma equação para estimar o escoamento total a partir da precipitação total. Essa relação não leva em consideração as variáveis tempo e intensidade da precipitação. O SWAT modela o ciclo completo do nitrogênio e do fósforo, que caracteriza sistemas dinâmicos que inclui a água, a atmosfera e o solo. O equacionamento e os métodos utilizados para calcular a produção e o transporte desses nutrientes estão detalhados no manual "*Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*", desenvolvido por Neitsch et al. (2011).

2.6 Cenários alternativos de uso do solo para a sub-bacia do ribeirão Bom Jardim

Com o objetivo de atestar a aplicabilidade do modelo SWAT na simulação de nitrogênio e fósforo, diferentes cenários de uso e ocupação do solo foram propostos, começando pelo cenário 1, referente ao uso do solo do ano de 2016, que consiste em agricultura (64,40%; sendo que, deste

total, 52% é soja, 25,5% é milho e 22,5% é cana-de-açúcar), campos hidromórficos (19,94%), pastagem (10,20%), mata (5,16%) e água (0,3%). Depois, foram realizadas simulações aumentando a porcentagem de mata sobre as áreas de agricultura. Essas alterações foram feitas nas sub-bacias que possuíam tanto áreas de agricultura quanto áreas de mata: cenário 2 (aumento de 2% da mata sobre a área de agricultura); cenário 3 (aumento de 4%); cenário 4 (aumento de 6%); cenário 5 (aumento de 8%); cenário 6 (aumento de 10%); cenário 7 (aumento de 15%); cenário 8 (aumento de 20%); cenário 9 (aumento de 30%); cenário 10 (aumento de 40%); cenário 11 (aumento de 50%) e cenário 12 (substituição de 100%). Vale destacar que o cenário 12 é hipotético, servindo apenas para fins comparativos.

2.7 Coleta de água para análises laboratoriais e medição da vazão

As coletas de água foram realizadas em 5 pontos da sub-bacia do Bom Jardim (Fig. 5), nos dias 22 de junho (período de estiagem), 10 de outubro (período de estiagem) e 14 de novembro de 2017 (transição entre o período de estiagem e o período chuvoso).

Os pontos 1 e 2 estão localizados no córrego da Enxada, um dos afluentes diretos do reservatório do Bom Jardim, na margem direita desta represa. O uso do solo predominante nas proximidades destes pontos é a pastagem, mas também há zonas agrícolas, principalmente na cabeceira desta microbacia. O ponto 3 está localizado no próprio curso do ribeirão Bom Jardim, a montante da zona de remanso produzida pelo reservatório. Os usos do solo predominantes nas adjacências deste ponto são a pastagem e o campo hidromórfico. Todavia, esta constitui, entre os 5 pontos selecionados, a seção que drena a maior área a montante do reservatório do Bom Jardim. Consequentemente, esta área de contribuição também inclui vastas zonas de agricultura situadas a montante do re-

servatório. O ponto 4 está localizado no curso do ribeirão Bom Jardim, imediatamente a jusante do reservatório e próximo à cachoeira do Bom Jardim. O uso do solo predominante nas adjacências deste ponto é a pastagem e a mata. Por fim, o ponto 5 está localizado imediatamente após a entrada do canal de adução, a jusante do reservatório. Entre todas as seções, esta é a mais próxima do reservatório. O uso do solo predominante nas proximidades deste ponto é a pastagem.

Desde a coleta da água até sua análise, foram respeitadas as exigências da Norma Brasileira (NBR) 9898/1987: Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. As análises foram executadas para determinação dos compostos: nitrato (NBR 12620/1992), nitrito (NBR 12619/1992), nitrogênio amoniacal (NBR 10560/1988) e fósforo total (NBR 12772/1992).

Também foram realizadas medições da vazão instantânea nos 5 pontos da sub-bacia, por meio do Método Acústico Doppler (ADCP), Método do Flutuador, Método do Vertedor e Método do Moinete, dependendo das características da seção do curso d'água.

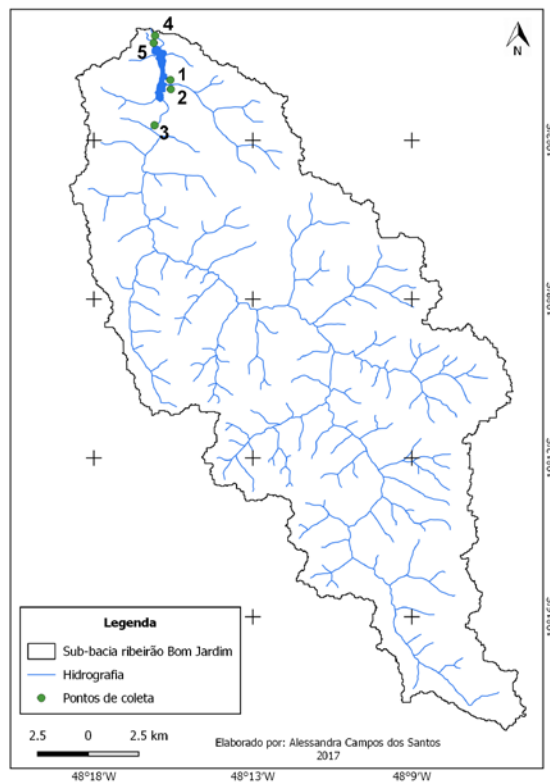
A partir dos resultados das concentrações de nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal, fósforo total e da medição da vazão instantânea, foi possível calcular a descarga desses nutrientes, por meio da Eq. 2:

$$\dot{M} = Q * C \quad (2)$$

Na qual \dot{M} é a descarga de massa (kg/mês), Q é a vazão instantânea ($m^3/mês$) e C é a concentração do nutriente (kg/m^3).

O cálculo da descarga tem como objetivo quantificar o aporte de nutrientes na região do reservatório do Bom Jardim.

Figura 5 – Localização dos pontos de coleta, reservatório e a hidrografia da sub-bacia do ribeirão Bom Jardim



Fonte: Topodata (2017)

2.8 Cálculo do índice de abatimento – ou de atenuação – de nutrientes

Com os cenários de áreas de floresta incrementais, conjectura-se que haja reduções nas cargas de nitrogênio e de fósforo gerados na sub-bacia. Uma forma de mensurar essa redução consiste no cálculo dos índices de abatimento de poluentes. Neste trabalho, o termo “poluente” faz referência aos nutrientes que afluem até o exutório da sub-bacia. Dessa maneira, os índices de abatimento levam em conta a massa de poluente que foi reduzida, em um intervalo de tempo, mediante a aplicação dos cenários conservacionistas. Neste caso, tais índices podem ser calculados, genericamente, de acordo com a Eq. 3:

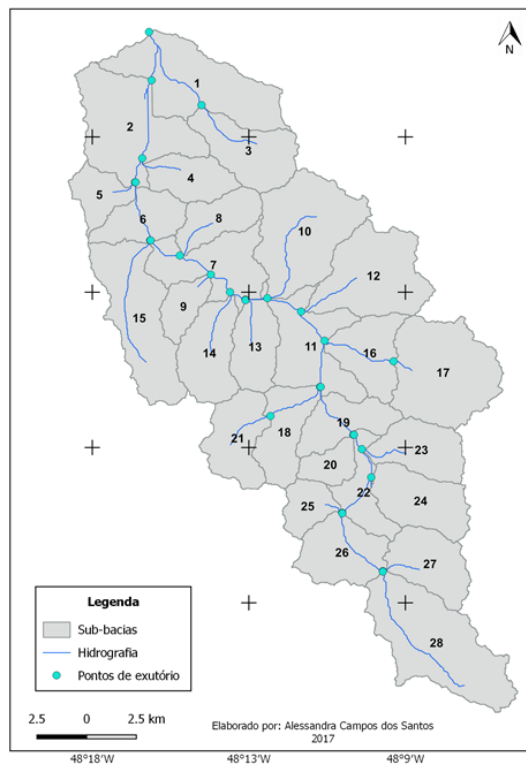
$$IA_k(\%) = \frac{(M_1 - M_k)}{M_1} \times 100 \quad (3)$$

Na qual, IA_k é o índice de abatimento, calculado em escala mensal, enquanto M_1 e M_k são, respectivamente, as massas de poluentes que aportam ao exutório da sub-bacia, no cenário atual (cenário 1) e em um cenário k qualquer.

3 RESULTADOS

O SWAT gerou a hidrografia e discretizou a sub-bacia do ribeirão Bom Jardim em 28 sub-bacias de contribuição, conforme mostrado na Fig. 6.

Figura 6 – Hidrografia e sub-bacias de contribuição na área da sub-bacia do ribeirão Bom Jardim, delineadas pelo SWAT



Fonte: Autor (2018)

Os componentes do ciclo hidrológico, percolação e escoamento superficial foram quantificados de acordo com o uso do solo atual da sub-bacia do

ribeirão Bom Jardim. Os valores, retratados pelas médias anuais do período entre 1984 a 2016, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Médias anuais da percolação e do escoamento superficial, por uso do solo, na sub-bacia do ribeirão Bom Jardim, 1984-2016 (cenário 1*)

| Uso do solo | Percolação (mm) | Escoamento superficial gerado (mm) |
|----------------------|-----------------|------------------------------------|
| Milho | 340,756 | 378,802 |
| Mata | 699,726 | 210,647 |
| Pastagem | 523,418 | 271,751 |
| Campos hidromórficos | 687,498 | 262,848 |
| Soja | 327,904 | 408,649 |
| Cana-de-açúcar | 433,030 | 434,369 |

*cenário 1: cenário de uso do solo referente ao ano de 2016

Fonte: Autor (2018)

Observando a Tabela 3, nota-se que o escoamento superficial gerado na sub-bacia, para os usos do solo com lavouras de cana-de-açúcar, soja e milho são os que apresentam os valores médios mais elevados. Por outro lado, estes são os usos do solo que possuem os menores valores de percolação. Quando o solo fica exposto, sem cobertura vegetal, pode acontecer a formação de uma crosta superficial, formada pelo rearranjo das partículas do solo, ocasionado pelo impacto da chuva. Essa crosta reduz a capacidade de infiltração do solo, podendo aumentar o escoamento superficial. Esse fenômeno ocorre, geralmente, em áreas de lavouras em que o plantio possui baixa ou nenhuma cobertura no solo. Outro problema é a compactação do solo, que pode derivar de três fatores: sobrepeso das máquinas agrícolas; realização de operações na lavoura quando o solo está com umidade elevada; e diminuição do teor de matéria orgânica no solo. Quando a compactação ocorre, a percolação da água no solo é dificultada, podendo também elevar os níveis de escoamento superficial e processos erosivos (BERTOL et al., 2016). Um estudo realizado por Volk (2006) constatou que em um solo que possui uma camada compactada, mesmo sob a prática de plantio direto (onde há cobertura e proteção do solo com palhas e restos vegetais), a infiltração da água pode diminuir em até 70%.

Os fertilizantes minerais e orgânicos que são aplicados nas lavouras, com o objetivo de as-

segurar uma boa produção agrícola, podem ser carregados até os cursos d'água através do escoamento superficial, comprometendo a qualidade da água. Como a maior parte da sub-bacia do Bom Jardim é constituída por latossolos, a adubação é indispensável, uma vez que este tipo de solo geralmente possui baixa fertilidade.

As áreas de pastagem apresentaram valores de escoamento superficial relativamente baixos, quando comparados com o milho, a soja e a cana-de-açúcar (Tabela 3). As gramíneas utilizadas nas pastagens cultivadas (um exemplo é a *brachiaria*) geralmente possuem sistema radicular denso, que favorece a agregação e a estabilidade das partículas do solo, aumentando sua resistência contra os processos erosivos e maior capacidade de infiltração (SALTON; TOMAZI, 2014).

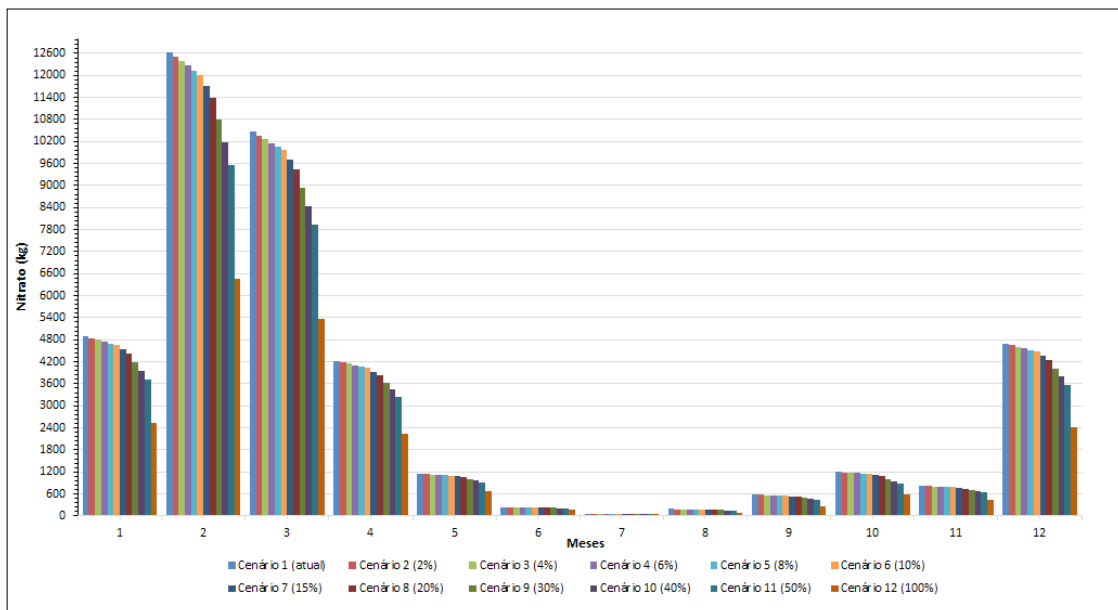
O cerrado, bioma predominante na sub-bacia do Bom Jardim, é a savana tropical com a maior diversidade do mundo, contando com 44% da sua fauna de espécies endêmicas (KLINK; MACHADO, 2005). Com a introdução de gramíneas para fins forrageiros em pastagens plantadas, essas espécies podem se tornar invasoras, ocupando as áreas de vegetação natural do cerrado, consequentemente diminuindo sua biodiversidade. Por isso, apesar das simulações terem apresentado valores médios relativamente baixos para o escoamento superficial e elevados para a percolação nas áreas de pastagem da referida sub-bacia, a expansão desse uso do solo pode comprometer suas áreas de mata e sua biodiversidade.

A mata é o uso do solo que menos gerou escoamento superficial, com uma média anual de 210,647 mm (Tabela 3). Esse fato pode ser explicado devido à maior quantidade de resíduos vegetais e matéria orgânica que cobrem o solo. A presença desses resíduos desempenha importante papel na porosidade do solo, uma vez que eles ajudam a manter os seus agregados, e consequentemente, favorecem a capacidade de

infiltração da água (BERTONI; LOMBARDI NETTO, 1990). Outro fator que influencia no menor escoamento superficial gerado nas áreas de mata é a retenção da água proveniente da precipitação no dossel das plantas, diminuindo a disponibilidade para gerar o escoamento.

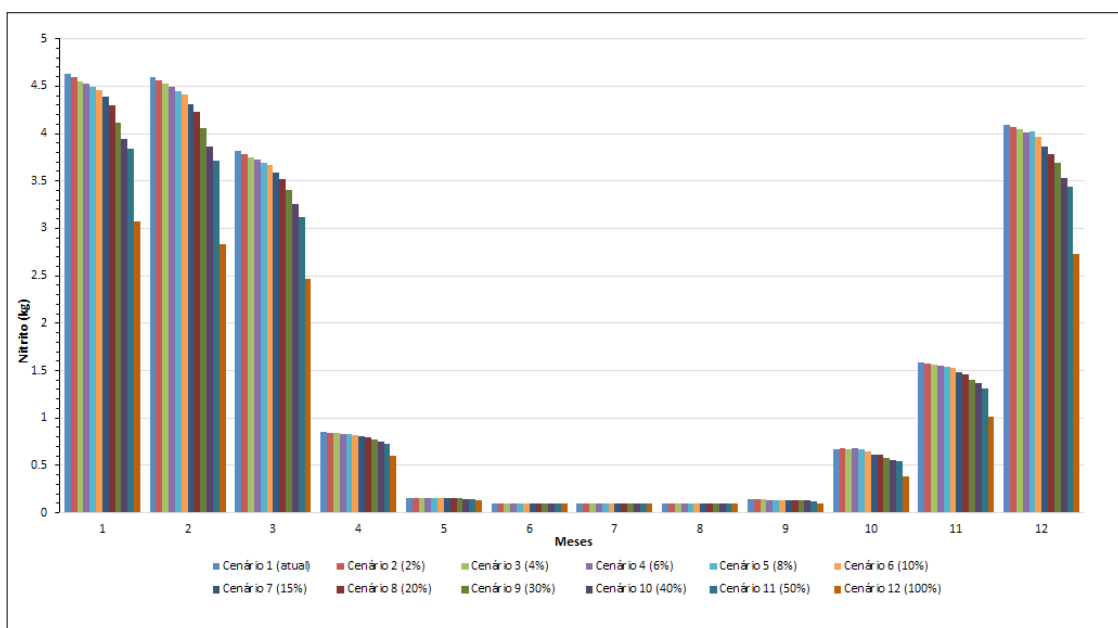
A quantidade de nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal e fósforo aportados para o exutório da sub-bacia do ribeirão Bom Jardim foi simulada para os 12 cenários de uso do solo, utilizando o modelo SWAT. Os resultados, representados em kg, são referentes às médias mensais, e podem ser visualizados nas Figs. 7, 8, 9 e 10.

Figura 7 – Média mensal do aporte de nitrato no exutório da sub-bacia do Bom Jardim



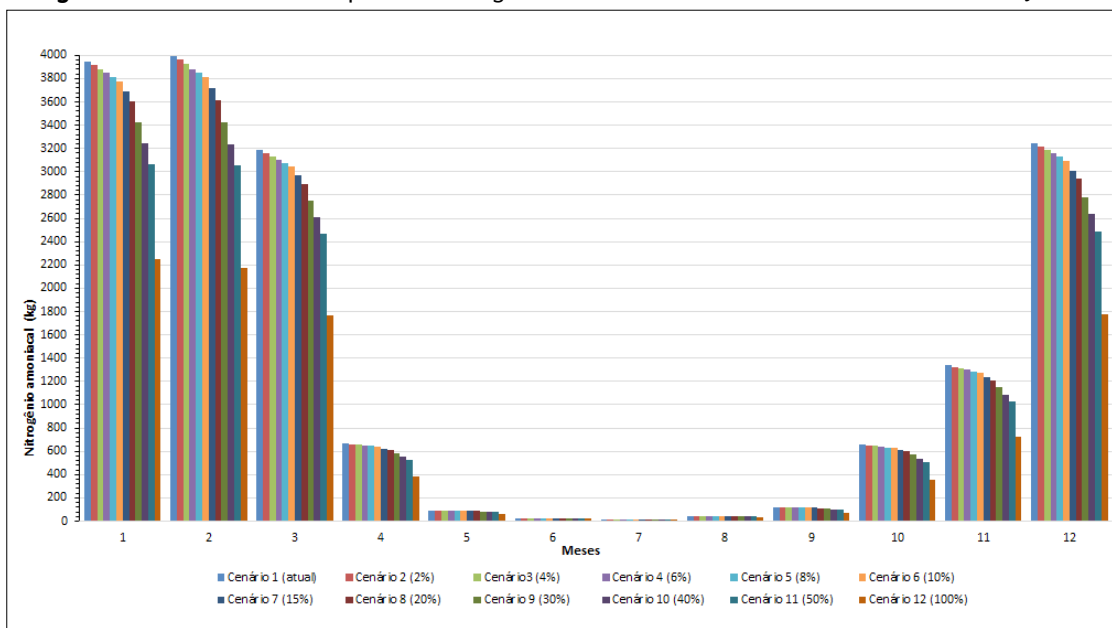
Fonte: Autor (2018)

Figura 8 – Média mensal do aporte de nitrito no exutório da sub-bacia do Bom Jardim



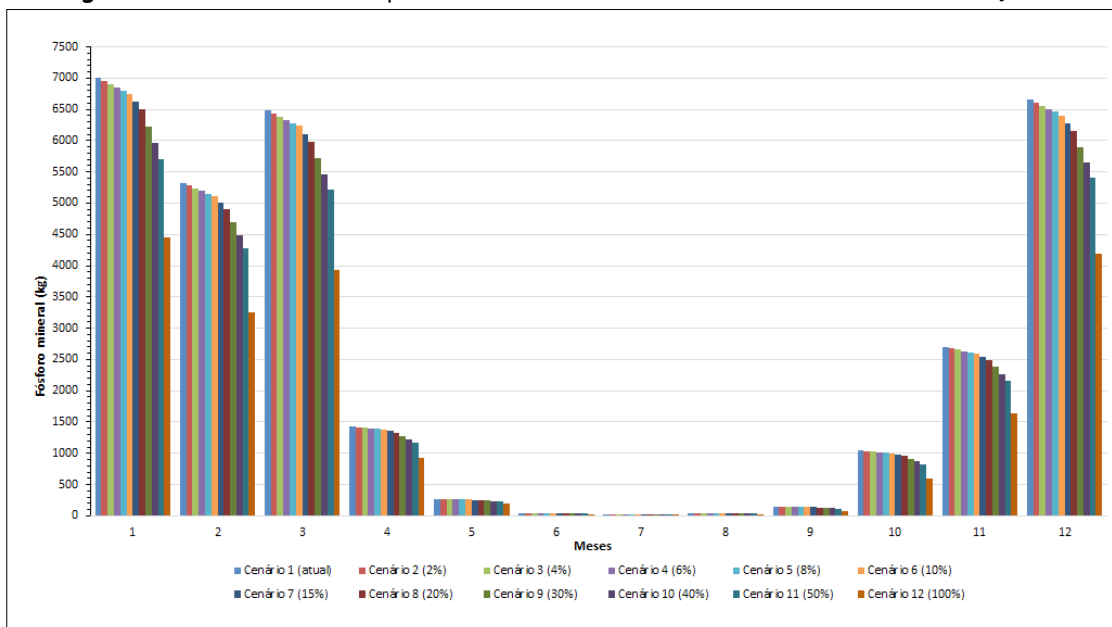
Fonte: Autor (2018)

Figura 9 – Média mensal do aporte de nitrogênio amoniacal no exutório da sub-bacia do Bom Jardim



Fonte: Autor (2018)

Figura 10 – Média mensal do aporte de fósforo mineral no exutório da sub-bacia do Bom Jardim



Fonte: Autor (2018)

Observando as Figs. 7, 8, 9 e 10, nota-se que as quantidades de nitrogênio amoniacal, nitrato, nitrito e fósforo mineral aportados ao exutório da sub-bacia do Bom Jardim possuem um comportamento semelhante, apresentando picos entre o período de dezembro e março. Esse

comportamento é consequência, principalmente, da precipitação e do escoamento superficial que são gerados em maior quantidade nessa época do ano na região estudada. Já os valores mais baixos são vistos entre os meses de maio e setembro, época de estiagem na região. A ocor-

rência de precipitação está diretamente ligada ao transporte de nutrientes, pois o escoamento superficial gerado é um dos principais responsáveis pelo carregamento desses nutrientes até os corpos d'água de uma bacia hidrográfica. As Fig. 7, 8, 9 e 10 também mostram o comportamento decrescente da quantidade de nitrito, nitrato, nitrogênio amoniacal e fósforo mineral aportados no exutório da sub-bacia do Bom Jardim, à medida que as áreas de agricultura são substituídas por áreas de mata. No cenário 1, onde o uso do solo da sub-bacia é predominantemente ocupado pela agricultura (64,40%), observam-se os valores mais elevados de nutrientes, o que pode ser explicado pelo fato de que as culturas requerem aplicação constante de fertilizantes e correção do solo usando insumos agrícolas ricos em compostos orgânico e mineral. Outra razão pela qual a simulação do cenário 1 atingiu altos níveis de nutrientes pode ser atribuída ao tipo de solo, já que a sub-bacia é ocupada, em sua maioria, por latossolos, que geralmente são pouco férteis, necessitando de adubações para fins agrícolas.

Panagopoulos, Makropoulos e Mimikou (2011) afirmam que o cultivo do solo, ou seja, a preparação da terra para fins agrícolas, atinge a mineralização do nitrogênio e a mobilização do fósforo, deixando esses nutrientes mais passíveis à erosão e à lixiviação, que consistem nos principais processos relacionados ao transporte de nitrogênio e fósforo. Isso acontece, geralmente, quando o solo apresenta condições de alta temperatura e umidade, como no verão, época em que a maioria das lavouras temporárias de milho e soja são cultivadas na região Sudeste do Brasil.

Compararam-se, também, as descargas do cenário 1 simuladas pelo modelo SWAT com as descargas medidas em campo, referentes à soma dos pontos 1, 2 e 3, que são os pontos que

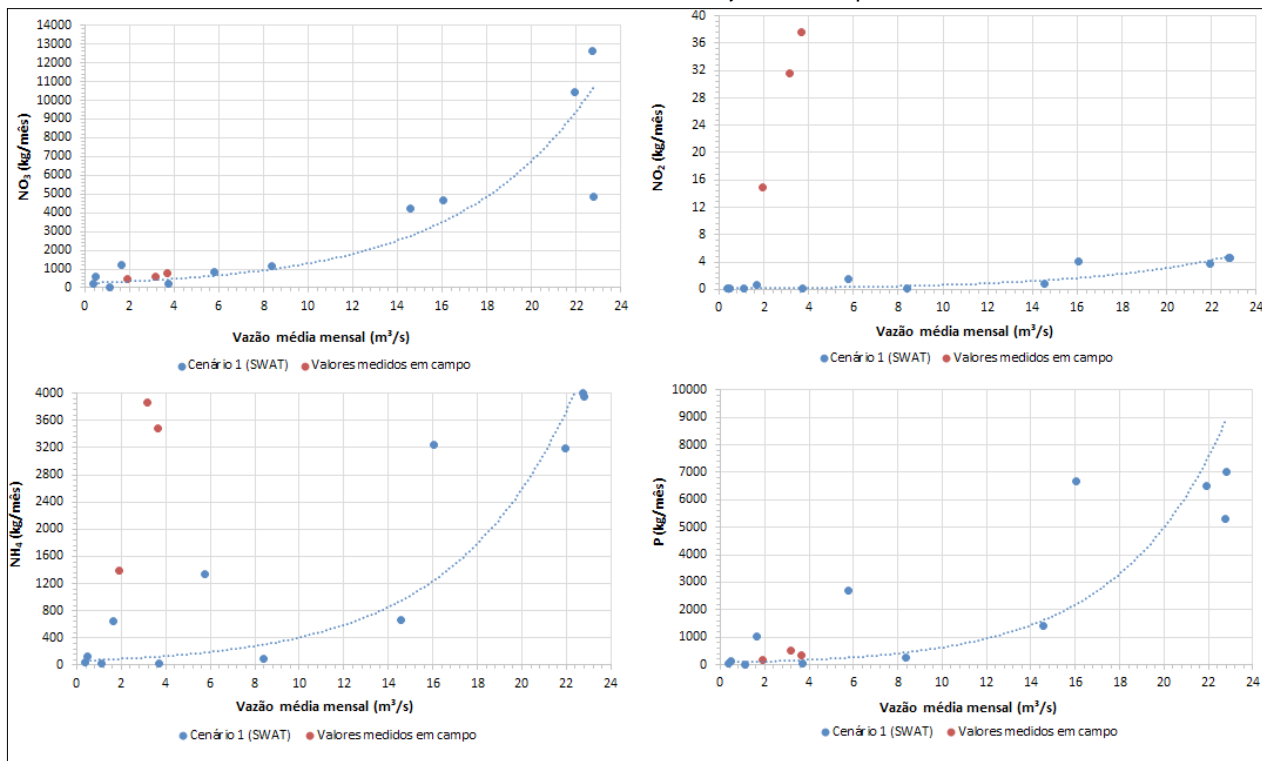
desaguam no reservatório, conforme apresentado na Fig. 11.

De acordo com a Fig. 11, os valores de descarga de nitrato medidos em campo, que constituem o somatório dos pontos 1, 2 e 3, das 3 campanhas realizadas, encontram-se próximos da curva dos valores simulados para o cenário 1 no SWAT. Os valores das descargas medidos foram baixos, pois a medição aconteceu nos meses de estiagem, com vazões menores. Já os resultados do nitrito e do nitrogênio amoniacal ficaram bem distantes dos resultados simulados pelo SWAT, apontando valores mais elevados.

Um fato que pode explicar a discrepância nos valores medidos de nitrito e nitrogênio amoniacal é que, no meio aquoso, o nitrogênio pode se apresentar em diversas formas, conforme seu grau de oxidação. O nitrogênio amoniacal se oxida formando o nitrito, que se oxida formando o nitrato (VON SPERLING, 2005). Assim, pode-se entender que quando um corpo d'água possui domínio de nitrogênio orgânico e amoniacal, trata-se de uma poluição mais recente. Por outro lado, quando predomina o nitrato, pode-se dizer que a poluição é mais antiga, já que este é o último estado de oxidação do nitrogênio. Como as medições foram feitas em um período onde não aconteceram muitos eventos de precipitação, acredita-se que os compostos de nitrogênio presentes na água já eram de carregamentos mais antigos.

Os valores das descargas de fósforo medidos em campo também apresentaram boa relação com os resultados obtidos com a simulação do SWAT. Os três valores encontram-se próximos à curva resultante da simulação. E, assim como os compostos nitrogenados, os valores das descargas de fósforo medidos foram baixos, pois as medições aconteceram nos meses de estiagem, com vazões menores.

Figura 11 – Comparação entre as descargas de nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal e fósforo simuladas pelo SWAT com os valores obtidos em medições de campo



Fonte: Autor (2018)

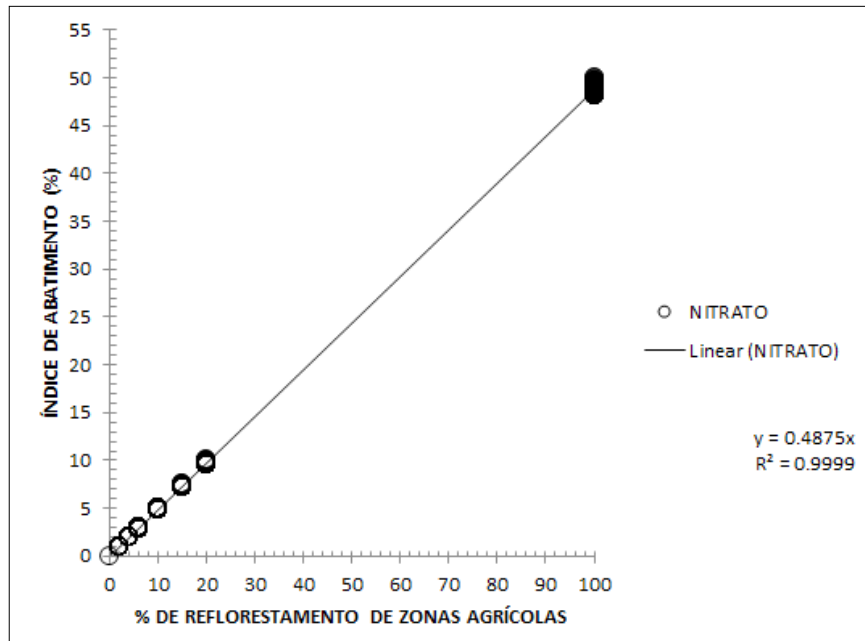
Os índices de abatimento dos nutrientes (nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal e fósforo mineral) que afluem até o exutório da sub-bacia do ribeirão Bom Jardim foram calculados em escala mensal. Esse índice pode ser entendido como a redução percentual do aporte de nutriente, em comparação com o cenário 1 (atual). Os índices de abatimento de nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal e fósforo mineral são apresentados nas Figs. 12, 13, 14 e 15.

Observando a Fig. 12, nota-se o coeficiente angular da reta referente ao nitrato igual a 0,4875, com R^2 de 0,9999. O índice de abatimento do nitrato é quase a metade da porcentagem de reflorestamento, ou seja, se houver o reflorestamento de 10% de uma área agrícola, haverá um abatimento de 4,875% do aporte de nitrato que aflui até o exutório da sub-bacia do Bom Jardim ao mês. Considerando uma distribuição normal padrão com nível de confiança de 95%, o coeficiente angular da reta para esse nutriente apresentou margem de erro de $\pm 0,00015$.

O coeficiente angular da reta referente ao nitrito é de 0,3624, com R^2 igual a 0,9981 (Fig. 13). Logo, se houver o reflorestamento de 10% de uma área de agricultura, haverá um abatimento de 3,624% ao mês no aporte de nitrito que aflui até o exutório da sub-bacia do Bom Jardim. Considerando uma distribuição normal padrão com nível de confiança de 95%, o coeficiente angular da reta para este nutriente apresentou margem de erro de $\pm 0,0020$.

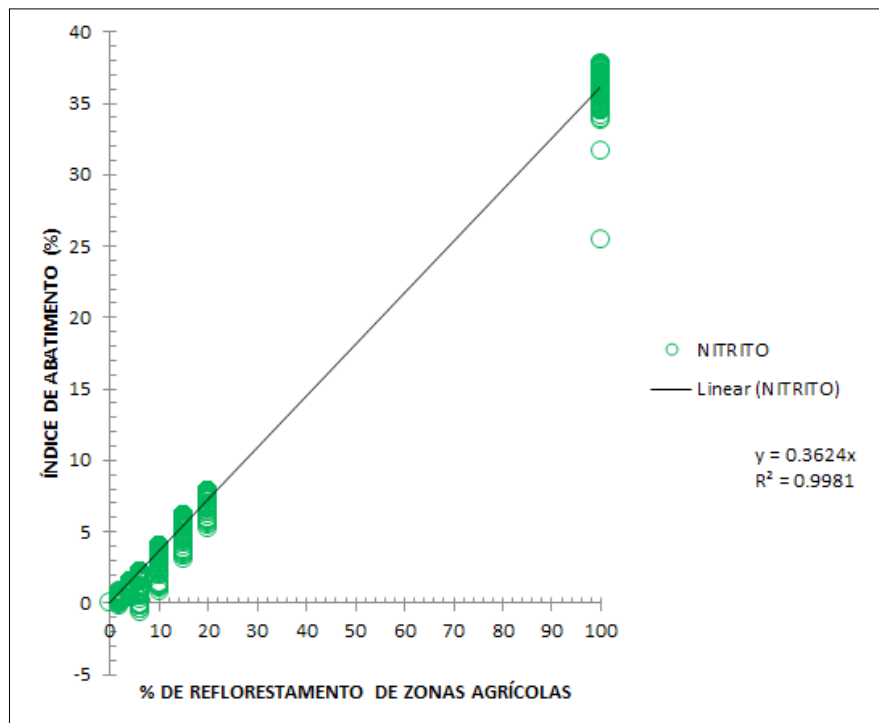
O nitrogênio amoniacal apresenta coeficiente angular da reta igual a 0,4403 e R^2 de 0,9996. (Fig. 14). Isso indica que, se houver o reflorestamento de 10% de uma área de agricultura, ocorrerá o abatimento de 4,403% ao mês do aporte de nitrogênio amoniacal para o exutório da sub-bacia do Bom Jardim. Considerando uma distribuição normal padrão com nível de confiança de 95%, o coeficiente angular da reta para este nutriente apresentou margem de erro de $\pm 0,00036$.

Figura 12 – Índice de abatimento de nitrato que aflui até o exutório da sub-bacia do ribeirão Bom Jardim (escala mensal)



Fonte: Autor (2018)

Figura 13 – Índice de abatimento de nitrito que aflui até o exutório da sub-bacia do ribeirão Bom Jardim (escala mensal)



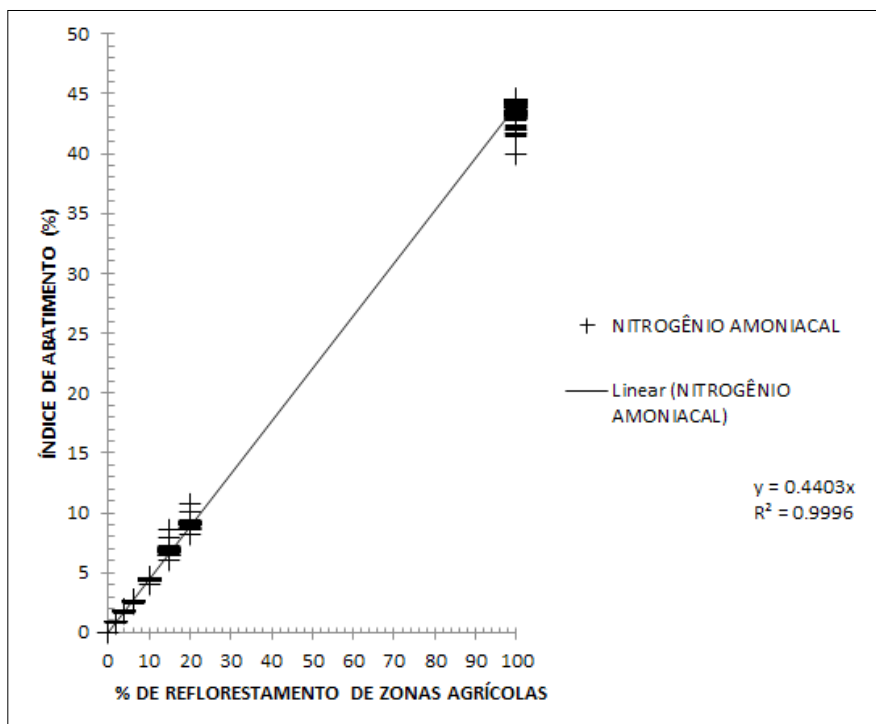
Fonte: Autor (2018)

O coeficiente angular da reta referente ao fósforo mineral é de 0,3744, com R^2 igual a 0,9987 (Fig. 15), indicando que, se ocorrer o reflorestamento de 10% de uma área agrícola, resultará em um abatimento de 3,744% ao mês no aporte de fósforo mineral que aflui para o exutório da sub-bacia do ribeirão Bom Jardim. Considerando uma distribuição normal padrão com nível de confiança de 95%, o coeficiente angular da reta para este nutriente apresentou margem de erro de $\pm 0,00043$.

Verificando as Figs. 12, 13, 14 e 15, nota-se que o nitrato mostrou-se o nutriente mais sensível a modificações, pois apresentou o maior coeficiente angular da reta, indicando que uma dada substituição por floresta consegue retribuir em uma maior atenuação deste nutriente.

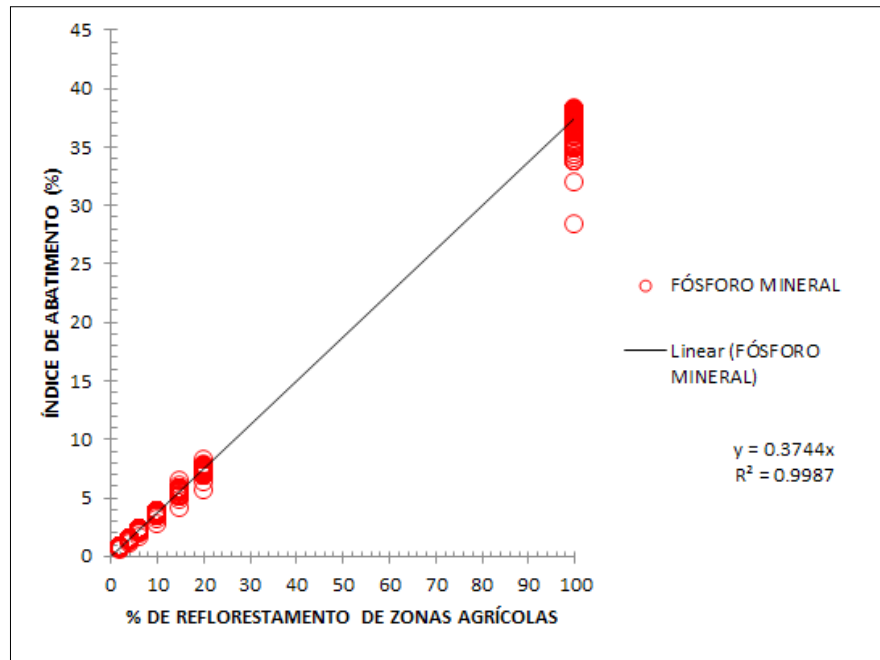
Esse indicador é especialmente interessante em termos práticos, uma vez que permite vislumbrar, de forma simples, a magnitude dos benefícios ambientais provocados pela aplicação de um ou mais cenários conservacionistas.

Figura 14 – Índice de abatimento de nitrogênio amoniacal que aflui até o exutório da sub-bacia do ribeirão Bom Jardim (escala mensal)



Fonte: Autor (2018)

Figura 15 – Índice de abatimento de fósforo mineral que aflui até o exutório da sub-bacia do ribeirão Bom Jardim (escala mensal)



Fonte: Autor (2018)

4 CONCLUSÕES

Os cenários alternativos de uso do solo propostos na metodologia mostraram-se positivos, visto que houve uma diminuição na quantidade de nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal e fósforo mineral aportados ao exutório da sub-bacia do Bom Jardim, à medida que as áreas de agricultura foram substituídas por áreas de mata.

O estudo mostrou que a agricultura é o uso do solo que mais contribuiu para a geração de escoamento superficial na sub-bacia do Bom Jardim. Além disso, os fertilizantes minerais e orgânicos que são aplicados nas lavouras, com o objetivo de assegurar uma boa produção agrícola, podem ser carregados até os cursos d'água através do escoamento superficial, comprometendo a qualidade da água.

Constatou-se que as quantidades de nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato e fósforo mineral aportados ao exutório da sub-bacia do Bom Jardim possuem um comportamento se-

melhante, apresentando picos entre o período de dezembro e março. Esse comportamento é consequência, principalmente, da precipitação e do escoamento superficial que são gerados em maior quantidade nessa época do ano na região estudada. Já os valores mais baixos são vistos entre os meses de maio e setembro, época de estiagem na região. A ocorrência de precipitação está diretamente ligada ao transporte de nutrientes, pois o escoamento superficial gerado é um dos principais responsáveis pelo carregamento desses nutrientes até os corpos d'água de uma bacia hidrográfica.

Quanto ao índice de abatimento de nutrientes, foi verificado que o nitrato mostrou-se como o nutriente mais sensível a modificações, pois apresentou o maior coeficiente angular da reta (0,4875), indicando que uma dada substituição por floresta consegue retribuir em uma maior atenuação deste nutriente.

Devido à falta de postos pluviométricos, fluviométricos e de dados de qualidade da água, o modelo SWAT não foi calibrado. Portanto, recomendam-se estudos mais detalhados da região, com o objetivo de formar um banco de dados pedológico, de uso e ocupação do solo, de parâmetros climáticos, meteorológicos, hidrosedimentológicos e de nutrientes, pois são parâmetros fundamentais para que as simulações realizadas com o SWAT, ou com outro modelo computacional, sejam confiáveis e apresentem resultados condizentes com a realidade.

5 AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (Capes) - Código de Financiamento 001 (Processo Capes 1633448).

Agradecemos também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) pelo apoio financeiro concedido ao projeto “Gestão de Reservatórios: incentivos aos serviços ambientais para a sustentabilidade dos regimes hidrossedimentológicos”, processo TEC-APQ-02097-14, edital Demanda Universal 01/2014.

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

7 REFERÊNCIAS

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J. SWAT: model use, calibration, and validation. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 55, n. 4, p. 1491-1508, 2012. <https://doi.org/10.13031/2013.42256>

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, n.1, p. 73-89, fev. 1998. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>

BERTOL, O. J. et al. **Série de Cadernos Técnicos da Agenda Parlamentar** - Manejo e conservação do solo e da água. Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Paraná (CREA-PR), 2016.

BERTONI, J; LOMBARDI NETTO, F. **Conservação do solo**. 3 ed. São Paulo, SP: Ícone, 1990. 355 p., il. ISBN: 8527401436.

BRITO, J. L. S. Os solos da bacia do ribeirão Bom Jardim e suas relações com relevos e os recursos hídricos, Uberlândia (MG). **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 3, n. 7, p. 20-40, 2002.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The Soil and Water Assessment Tool: development, applications, and future research directions. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 4, p. 1211-1250, 2007. <https://doi.org/10.13031/2013.23637>

HIDROWEB. **Pesquisar Estações**. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Acesso em: 10 out. 2016.

HUANG, J.; HUANG, Y.; PONTIUS JR. R. G.; ZHANG, Z. Geographically weighted regression to measure spatial variations in correlations between water pollution versus land use in a coastal Watershed. **Ocean & Coastal Management**, v. 103, p. 14-24, jan. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.10.007>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapas**. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 20 jan. 2017a.

..... **Produção agrícola** – lavoura temporária Uberaba 2015. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/v4/brasil/mg/uberaba/pesquisa/14/10193?ano=2015>>. Acesso em: 10 abr. 2017b.

..... **Produção agrícola** – lavoura temporária Uberlândia 2015. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/v4/brasil/mg/uberlandia/pesquisa/14/10193?ano=2015&indicador=10370>>. Acesso em: 10 abr. 2017c.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Divisão de Geração de Imagens (DGI)**: Catálogo de Imagens. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>>. Acesso em: 01 ago. 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **TOPODATA** – Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso em: 05 jan. 2017.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do Cerrado brasileiro. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 147-155, 2005.

MEIYAPPAN, P.; DALTON, M.; O’NEILL, B. C.; JAIN, A. K. Spatial modeling of agricultural land use change at global scale. **Ecological Modelling**, v. 291, p. 152-174, nov. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.07.027>

MOCKUS, V. **Estimation of total (and peak rates of) surface runoff for individual storms**. Exhibit A of Appendix B, Interim Survey Report, Grand (Neosho) River Watershed, United States Department of Agriculture – Soil Conservation Service, 1949.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS GRASSLAND, J. R. **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009**. Texas Water Resources Institute - Technical Report n. 406, set. 2011.

PANAGOPOULOS, Y.; MAKROPOULOS, C.; MIMIKOU, M. Diffuse Surface Water Pollution: Driving Factors for Different Geoclimatic Regions. **Water Resources Management**, v. 25, p. 3635-3660, jul. 2011. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9874-2>

SAJIKUMAR, N.; REMYA, R. S. Impact of land cover and land use change on runoff characteristics. **Journal of Environmental Management**, v. 161, p. 460-468, set. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.12.041>

SALTON, J. C.; TOMAZI, M. **Sistema radicular de plantas e qualidade do solo**. Comunicado Técnico 198, ISSN 1679-0472, Douros, MS, 2014.

TOPODATA. **Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil**. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - THE NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE (USDA-NRCS). **Part 630: Hydrology. Chapter 10: Estimation of direct runoff from storm rainfall**. In NRCS National Engineering Handbook. Washington, D.C., 2004.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - THE NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE (USDA-NRCS). **Part 630: Hydrology. Chapter 10: Estimation of direct runoff from storm rainfall**. In NRCS National Engineering Handbook. Washington, D.C., 2004.

VOLK, M.; BOSCH, D. SWAT: Agricultural water and nonpoint source pollution management at a watershed scale – Part II. **Agricultural Water Management**, v. 180, p. 191-193, jan. 2017.

VOLK, L. B. S. **Avaliação de condições físicas de superfície e sub-superfície do solo para fins de predição da erosão hídrica e indicação da qualidade da sua estrutura**. 149 f. 2006. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

VON SPERLING, M. **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, 2005. 452 p. Inclui índice. ISBN: 85-7041-114-6

ZAHABIYOUN, B.; GOODARZI, M. R.; MASSAH BAVANI, A. R.; AZAMATHULLA, H. M. Assessment of Climate Change Impact on the Ghareou River Basin Using SWAT Hydrological Model. **Clean - Soil, Air, Water**, v. 41, n. 6, p. 601-609, jun. 2013. <https://doi.org/10.1002/clen.201100652>