

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISES QUANTITATIVA E QUALITATIVA DAS
ÁGUAS SUPERFICIAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIBEIRÃO RODEADOR/DF PARA AVALIAÇÃO DAS
CARGAS DE POLUIÇÃO**

BARBARA MORETO FIM

ORIENTADOR: RICARDO TEZINI MINOTI

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS**

PUBLICAÇÃO: PTARH.DM 212/2018

BRASÍLIA/DF, AGOSTO - 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANÁLISES QUANTITATIVA E QUALITATIVA DAS ÁGUAS
SUPERFICIAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO
RODEADOR/DF PARA AVALIAÇÃO DAS CARGAS DE POLUIÇÃO

BARBARA MORETO FIM

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS.

APROVADA POR:



Prof. Ricardo Tezini Minoti, Doutor (ENC-UnB)
(Orientador)



Prof. Sérgio Koide, PhD (ENC-UnB)
(Examinador Interno)



Prof. Juliah Cardoso Eleutério, PhD (UFMG)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 27 DE AGOSTO DE 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

FIM, BARBARA MORETO

Análises quantitativa e qualitativa das águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador/DF para avaliação das cargas de poluição.

107p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2018).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Qualidade da Água

2. Monitoramento

3. Modelagem Hidrológica

4. SWAT

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FIM, B. M. (2018). *Análises quantitativa e qualitativa das águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador/DF para avaliação das cargas de poluição*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 107p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Barbara Moreto Fim

TÍTULO: Análises quantitativa e qualitativa das águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador/DF para avaliação das cargas de poluição

GRAU: Mestre

ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação de nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

Barbara Moreto Fim

barbaramoretolim@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Deus Pai e à Deusa Mãe, natureza de toda vida.

Agradeço ao meu pai, Darci, e à minha mãe, Graça, por me incentivarem a ser melhor, ao meu irmão, Bruno, por me fazer mais forte, e à toda minha família, que sempre me apoiou.

À minha tia Tete, ao meu tio João Rodrigues (*in memoriam*), e a todos os meus primos e primas que moram em Brasília e no meu coração.

Ao professor e orientador Ricardo Minoti, pela calma, gentileza, paciência e compreensão infinitas, e por me orientar e tranquilizar nos momentos de ansiedade e insegurança.

Ao professor Sérgio Koide, por me aconselhar com seus anos de experiência.

Ao pós-doutorando Paulino Bambi, por sempre estar disposto a me acompanhar a campo e conversar um pouco de tudo no caminho.

Ao meu irmão de coração, José Antônio, e à minha irmã de alma, Daiana Lira, por tudo que me ensinaram e dividiram comigo. Especialmente à Daiana, por me guiar no SWAT.

Às minhas amigas, Marília e Thays, por terem a coragem e a paciência de dividir uma casa comigo, e por fazerem dessa casa um porto seguro da nossa família fora dos padrões.

À Camila, por me lembrar da espiritualidade e por dividir o pão e a sopa de cada dia.

A todos os amigos-irmãos que o mestrado me deu a honra e o privilégio de conhecer e conviver: Alice, Ana Alcía, Andriane, Hélio, Rafa, Fagner e Vitória.

À Amanda, por me ouvir, analisar, aconselhar, inspirar e não me deixar pirar.

Às minhas amigas espalhadas pelas cinco regiões do Brasil e quatro cantos do mundo.

Às engenheiras Isadora Silva e Luisa Aguiar, por pavimentarem a base do meu trabalho.

À doutoranda Sara Ferrigo, por ceder o banco de dados tão bem elaborado.

Ao doutorando Gilliard Nunes, por dividir sua expertise no SWAT.

Aos doutorandos Andreia, Daniel, Édio, Elisa, Luiz e Osmar, pela gentileza e solicitude.

Às técnicas do Laboratório de Saneamento Ambiental, Carla Alves, Carla Vizzotto, Manuella, Marcilene e Sara Morais, por me instruir e auxiliar no laboratório.

Às profissionais da CAESB, Cristine Cavalcante e Eliane Rocha, pelos dados de qualidade e vazão, e a todos os funcionários da CAESB que compartilharam dados e experiências.

Aos funcionários da Geológica, Rômulo e Júnior, pela colaboração em campo.

Ao graduando Flávio, por ser tão prestativo e disposto a aprender.

À CAPES, pela bolsa concedida.

À FAP-DF e FINEP pelo apoio e financiamento de projetos e da infraestrutura.

A todos os professores, profissionais e amigos que de alguma maneira estiveram presentes e participaram dessa caminhada de aprendizado e crescimento. Muito obrigada!

RESUMO

ANÁLISES QUANTITATIVA E QUALITATIVA DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO RODEADOR/DF PARA AVALIAÇÃO DAS CARGAS DE POLUIÇÃO

A modelagem hidrológica é uma ferramenta utilizada para a simulação dos processos físicos e avaliação dos impactos nos recursos hídricos e no meio ambiente, principalmente os advindos de ações antrópicas. Quando associada ao monitoramento da qualidade da água, se tornam instrumento de melhoria da gestão e do gerenciamento de uma bacia hidrográfica. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi realizar uma análise dos aspectos quantitativos e qualitativos das águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador/DF baseada na intensificação dos dados de monitoramento da qualidade da água e na simulação hidrológica. Para tal fim, foi determinado um plano de monitoramento da qualidade da água com coletas semanais de julho de 2017 a fevereiro de 2018, além de eventos de amostragem contínua no período noturno, nas estações seca e chuvosa. Ademais, foi realizada a simulação mensal de vazão, nitrogênio total e fósforo total, com a aplicação do modelo SWAT, e posterior utilização do monitoramento histórico para calibração dos parâmetros de modelagem e verificação das simulações. Por fim, a simulação diária de vazão, nitrogênio total, nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal e fósforo total, no mesmo período das coletas semanais, permitiu a comparação dos dados gerados pelo monitoramento e pela modelagem hidrológica e de qualidade de água. Os resultados do monitoramento mostram que o Ribeirão Rodeador apresenta boa qualidade. As cargas de compostos de nitrogênio e fósforo são baixas, ainda assim, na maior parte das vezes, são subestimadas pelo monitoramento padrão realizado no Distrito Federal. Em relação à modelagem hidrológica, a calibração e a verificação apresentaram resultados satisfatórios para a vazão e insatisfatórios para nitrogênio e fósforo, porém as variáveis estatísticas apresentaram melhoria significativa em relação à modelagem sem calibração. A comparação das simulações diárias com os parâmetros analisados no monitoramento foi insatisfatória para a maioria dos parâmetros, mas mostrou correspondência aceitável para nitrogênio total e fósforo total.

PALAVRAS-CHAVE: Qualidade da Água; Monitoramento; Modelagem Hidrológica; SWAT.

ABSTRACT

QUANTITATIVE AND QUALITATIVE ANALYSIS OF THE SUPERFICIAL WATER FROM THE RIBEIRÃO RODEADOR HYDROGRAPHIC BASIN/DF TO EVALUATE POLLUTION LOADS

Hydrological modeling is a tool used for the simulation of physical processes and evaluation of impacts on water resources and on the environment, especially those resulting from anthropogenic actions. When associated to the monitoring of water quality, they become an instrument for improving the management of a river basin. Therefore, the objective of this work was to perform an analysis of the quantitative and qualitative aspects of the surface water of the ribeirão Rodeador hydrographic basin/DF based on the intensification of water quality monitoring data and hydrological simulation. Thus, a water quality monitoring plan was drawn up with weekly collections from July 2017 to February 2018, as well as continuous sampling at night, dry and rainy seasons. In addition, monthly flow, total nitrogen and total phosphorus simulation were performed with the SWAT model, as well as the use of historical monitoring for calibration of the modeling parameters and verification of the simulations. Finally, daily flow, total nitrogen, nitrate, nitrite, ammoniacal nitrogen and total phosphorus simulation, in the same period of the weekly collections, allowed the comparison of data generated by both monitoring and hydrological and water quality modeling. The results of the monitoring show that ribeirão Rodeador presents good water quality. The loads of nitrogen and phosphorus compounds are low, yet, in most cases, they are underestimated by the standard monitoring carried out in the Federal District. In relation to the hydrological modeling, calibration and verification presented satisfactory results for flow and unsatisfactory results for nitrogen and phosphorus, but the statistical variables showed a significant improvement over modeling without calibration. The comparison of the daily simulations with the parameters analyzed in the monitoring was unsatisfactory for most of the parameters, but showed an acceptable correspondence for total nitrogen and total phosphorus.

KEYWORDS: Water quality; Monitoring; Hydrological Modelling; SWAT.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 - INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 - OBJETIVOS | 4 |
| 2.1 - OBJETIVO GERAL | 4 |
| 2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 4 |
| 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 3.1 - GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL..... | 5 |
| 3.2 - FONTES NÃO-PONTUAIS DE POLUIÇÃO | 6 |
| 3.3 - MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA | 7 |
| 3.4 - UTILIZAÇÃO DO SWAT | 9 |
| 4 - METODOLOGIA | 18 |
| 4.1 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 18 |
| 4.1.1 - Clima | 20 |
| 4.1.2 - Relevo | 21 |
| 4.1.3 - Tipos de Solo..... | 22 |
| 4.1.4 - Uso e Ocupação do Solo..... | 23 |
| 4.1.5 - Uso da Água..... | 25 |
| 4.2 - BASE DE DADOS | 26 |
| 4.2.1 - Vazão | 28 |
| 4.2.2 - Qualidade da água | 30 |
| 4.3 - MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA | 34 |
| 4.3.1 - Planejamento de Amostragem | 34 |
| 4.3.2 - Análises em Laboratório | 37 |
| 4.4 - MODELAGEM DA BACIA DO RIBEIRÃO RODEADOR | 38 |
| 4.5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS | 46 |
| 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO | 48 |
| 5.1 - MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA | 48 |
| 5.1.1 - Análise Inicial..... | 48 |

| | |
|---|-----|
| 5.1.2 - Análise da Variação Temporal | 53 |
| 5.1.3 - Comparação dos dados monitorados com os dados da CAESB | 57 |
| 5.1.4 - Amostragem Contínua..... | 60 |
| 5.2 - MODELAGEM DA BACIA DO RIBEIRÃO RODEADOR | 67 |
| 5.2.1 - Modelagem Inicial..... | 67 |
| 5.2.2 - Análise de Sensibilidade | 70 |
| 5.2.3 - Calibração..... | 73 |
| 5.2.4 - Verificação | 80 |
| 5.2.5 - Simulação diária e comparação com dados monitorados | 88 |
| | |
| 6 - CONCLUSÕES | 93 |
| | |
| 7 - PERSPECTIVAS FUTURAS..... | 95 |
| | |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 96 |
| | |
| APÊNDICE A - OPERAÇÕES DE MANEJO AUTOIRRIGAÇÃO E AUTOFERTILIZAÇÃO E EXTRAÇÃO DE ÁGUA SUPERFICIAL PARA IRRIGAÇÃO | 103 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1 - Síntese dos trabalhos que aplicaram o SWAT no Distrito Federal. (Silva, 2016, modificado)..... | 16 |
| Tabela 3.1 - Síntese dos trabalhos que aplicaram o SWAT no Distrito Federal. (Silva, 2016, modificado)..... | 17 |
| Tabela 4.1 - Informações básicas das estações pluviométricas localizadas na região da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 20 |
| Tabela 4.2 - Distribuição da declividade na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. 21 | |
| Tabela 4.3 - Distribuição dos tipos de solo na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador. 22 | |
| Tabela 4.4 - Distribuição do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF (modificado de Silva, 2016)..... | 24 |
| Tabela 4.5 - Dados necessários à elaboração da base de dados. | 26 |
| Tabela 4.6 - Parâmetros e métodos utilizados na análise em laboratório..... | 38 |
| Tabela 4.7 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade da vazão. (Ferrigo, 2014). 41 | |
| Tabela 4.8 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade da carga de nutrientes. (Arnold, 2012; Nunes, 2016; Silva, 2016, modificado). | 43 |
| Tabela 4.9 - Critérios de desempenho do modelo. (Moriassi <i>et al.</i> , 2007). | 46 |
| Tabela 5.1 - Parâmetros analisados no monitoramento da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador..... | 49 |
| Tabela 5.2 - Resultados da avaliação de desempenho da modelagem inicial de vazão e qualidade da água com o modelo SWAT na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. 68 | |
| Tabela 5.3 - Análise de sensibilidade dos parâmetros relacionados à simulação de vazão no modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 71 |
| Tabela 5.4 - Parâmetros calibrados para a simulação da vazão no modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 73 |
| Tabela 5.5 - Desempenho da simulação da vazão com parâmetros calibrados para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 74 |
| Tabela 5.6 - Parâmetros calibrados para a simulação da carga de nitrogênio na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 76 |
| Tabela 5.7 - Desempenho da simulação da carga de nitrogênio com parâmetros calibrados para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 76 |

| | |
|---|----|
| Tabela 5.8 - Parâmetros calibrados para a simulação da carga de fósforo na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador..... | 78 |
| Tabela 5.9 - Desempenho da simulação da carga de fósforo com parâmetros calibrados para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 79 |
| Tabela 5.10 - Desempenho da simulação da vazão na verificação de 2012 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 80 |
| Tabela 5.11 - Desempenho da simulação da vazão na verificação de 2015 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 82 |
| Tabela 5.12 - Desempenho da simulação de nitrogênio na verificação de 2012 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 83 |
| Tabela 5.13 - Desempenho da simulação de nitrogênio na verificação de 2015 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 84 |
| Tabela 5.14 - Desempenho da simulação de fósforo na verificação de 2012 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 86 |
| Tabela 5.15 - Desempenho da simulação de fósforo na verificação de 2015 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 87 |
| Tabela 5.16 - Desempenho da simulação diária da vazão de jul-2017 a fev-2018 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 88 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3.1 - Processos dos compostos contendo nitrogênio do solo - SWAT. (Neitsch <i>et al.</i> , 2011, modificado por Silva, 2016). | 11 |
| Figura 3.2 - Processos dos compostos contendo nitrogênio no canal - SWAT. (Neitsch <i>et al.</i> , 2011, modificado por Silva, 2016). | 12 |
| Figura 3.3 - Processos dos compostos contendo fósforo no solo - SWAT. (Neitsch <i>et al.</i> , 2011, modificado por Silva, 2016). | 12 |
| Figura 4.1 - Fluxograma das etapas do trabalho..... | 18 |
| Figura 4.2 - Localização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador. | 19 |
| Figura 4.3 - Localização das estações pluviométricas e polígonos de Thiessen na região da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 21 |
| Figura 4.4 - Mapa de declividade da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. (Elaborado por Fim, 2018 com base nos dados de Ferrigo, 2014). | 22 |
| Figura 4.5 - Tipos de solo da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. (Elaborado por Fim, 2018 com base nos dados de Ferrigo, 2014). | 23 |
| Figura 4.6 - Mapa de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. (Elaborado por Fim, 2018 com base nos dados de Ferrigo, 2014). | 25 |
| Figura 4.7 - Localização dos pontos de captação de água superficial na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. (Elaborado por Fim, 2018 modificado de Silva, 2016). | 26 |
| Figura 4.8 - Disponibilidade de dados pluviométricos na região da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador. | 27 |
| Figura 4.9 - Disponibilidade de dados climatológicos e de vazão utilizados na simulação da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador. | 27 |
| Figura 4.10 - Registros mensais de vazão e precipitação de 1978 a 2018 na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. (Elaborado com dados da CAESB, 2018). | 28 |
| Figura 4.11 - Gráfico das vazões médias mensais de 1978 a 2018 no exutório da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. (Elaborado com dados da CAESB, 2018) | 29 |
| Figura 4.12 - Registros fotográficos do ponto de monitoramento próximo ao exutório da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador. (a) 18 de julho de 2017. (b) 09 de janeiro de 2018. | 29 |
| Figura 4.13 - Registros mensais da concentração de nitrogênio total na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. (Elaborado com dados da CAESB, 2018). | 31 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.14 - Registros mensais da concentração de fósforo total na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. (Elaborado com dados da CAESB, 2018)..... | 31 |
| Figura 4.15 - Registros mensais da concentração de nutrientes na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. (a) Fósforo Dissolvido (mg P/L). (b) Nitrato (mg N-NO ₃ /L). (c) Nitrito (mg N-NO ₂ /L). (d) Nitrogênio Amoniacal (mg N-NH ₃ /L). (Elaborados com dados da CAESB, 2018). | 32 |
| Figura 4.16 - Registros mensais de qualidade da água na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. (a) Demanda Química de Oxigênio (mg /L). (b) Oxigênio Dissolvido (mg /L). (c) pH. (d) Temperatura (°C). (e) Condutividade (µS/cm). Turbidez (NTU). (Elaborados com dados da CAESB, 2018)..... | 33 |
| Figura 4.17 - Localização dos pontos de monitoramento na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. (Elaborado por Fim, 2018) | 34 |
| Figura 4.18 - Registros fotográficos do monitoramento. (a) Estruturas da estação monitoramento da CAESB. (b) Linígrafo com <i>data logger</i> . (c) Manilha aberta. (Fonte: arquivo pessoal)..... | 35 |
| Figura 4.19 - Amostrador automático Teledyne ISCO 3700. (Fonte: Teledyne Isco, 2017). | 36 |
| Figura 5.1 - Hidrograma e Série de Nitrogênio no exutório da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador de julho de 2017 a fevereiro de 2018. (Elaborado com dados de vazão da CAESB, 2018). | 50 |
| Figura 5.2 - Hidrograma e Série de Fósforo no exutório da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF de julho de 2017 a fevereiro de 2018. (Elaborado com dados de vazão da CAESB, 2018). | 51 |
| Figura 5.3 – Hidrograma e Turbidez no exutório da bacia hidrográfica | 52 |
| Figura 5.4 - Hidrograma e Demanda Química de Oxigênio no exutório da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF de julho de 2017 a fevereiro de 2018. (Elaborado com dados de vazão da CAESB, 2018). | 52 |
| Figura 5.5 - Variação temporal da carga de nitrogênio inorgânico na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF de julho de 2017 a fevereiro de 2018. | 53 |
| Figura 5.6 - Carga acumulada de nitrogênio inorgânico na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF de julho de 2017 a fevereiro de 2018..... | 54 |
| Figura 5.7 - Variação temporal da carga de fósforo total na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF de julho de 2017 a fevereiro de 2018..... | 54 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.8 - Carga acumulada de fósforo total na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF de julho de 2017 a fevereiro de 2018..... | 55 |
| Figura 5.9 - Variação temporal da carga de demanda química de oxigênio na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF de julho de 2017 a fevereiro de 2018..... | 56 |
| Figura 5.10 - Carga acumulada de demanda química de oxigênio na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF de julho de 2017 a fevereiro de 2018. | 56 |
| Figura 5.11 - Registros semanais e médias mensais de concentração de nitrogênio inorgânico e nitrogênio total na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF comparados aos registros mensais da CAESB..... | 57 |
| Figura 5.12 - Registros semanais e médias mensais de concentração de fósforo total na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF comparados aos registros mensais da CAESB. | 58 |
| Figura 5.13 - Monitoramento semanal na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF comparado a registros mensais da CAESB. | 59 |
| Figura 5.14 - Monitoramento semanal na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF comparado a registros trimestrais da CAESB. | 60 |
| Figura 5.15 - Registros da amostragem contínua de fósforo total na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF no período seco..... | 61 |
| Figura 5.16 - Registros da amostragem contínua na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF no período seco. (a) Nitrito. (b) Nitrato. | 62 |
| Figura 5.17 - Registros da amostragem contínua de fósforo total na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF no período chuvoso. (a) 25 e 31 de janeiro de 2018. (b) 11 e 12 de fevereiro de 2018. | 63 |
| Figura 5.18 - Registros da amostragem contínua de fósforo total na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF no período chuvoso em 06 de fevereiro de 2018..... | 64 |
| Figura 5.19 - Registros da amostragem contínua de demanda química de oxigênio na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF no período chuvoso em 06 de fevereiro de 2018. ... | 64 |
| Figura 5.20 - Registros da amostragem contínua de demanda química de oxigênio na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF no período chuvoso. (a) 25 e 31 de janeiro de 2018. (b) 11 e 12 de fevereiro de 2018..... | 65 |
| Figura 5.21 - Registros da amostragem contínua no período chuvoso na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF em 11 e 12 de fevereiro de 2018. (a) Fósforo Reativo. (b) Nitrato. (c) Nitrogênio Amoniacal. (d) Nitrito. | 66 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.22- Sub-bacias e Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 67 |
| Figura 5.23 - Simulação inicial da vazão na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 69 |
| Figura 5.24 - Simulação inicial da carga mensal de nitrogênio total na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 69 |
| Figura 5.25 - Simulação inicial da carga mensal de fósforo total na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 70 |
| Figura 5.26 - Análise de sensibilidade dos parâmetros relacionados à simulação de vazão no modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 71 |
| Figura 5.27 - Análise de sensibilidade dos parâmetros relacionados à simulação das cargas de nutrientes do modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. (a) Nitrogênio. (b) Fósforo. | 72 |
| Figura 5.28 - Simulação mensal da vazão após a calibração dos parâmetros. | 75 |
| Figura 5.29 - Simulação mensal da carga de nitrogênio na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador após a calibração dos parâmetros. | 77 |
| Figura 5.30 - Simulação mensal da carga de fósforo na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF após a calibração dos parâmetros. | 79 |
| Figura 5.31 - Simulação mensal da vazão na verificação de 2012 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 81 |
| Figura 5.32 - Simulação mensal da vazão na verificação de 2015 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 82 |
| Figura 5.33 - Simulação mensal da carga de nitrogênio na verificação de 2012 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 83 |
| Figura 5.34 - Simulação mensal da carga de nitrogênio na verificação de 2015 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 85 |
| Figura 5.35 - Simulação mensal da carga de fósforo na verificação de 2012 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 86 |
| Figura 5.36 - Simulação mensal da carga de fósforo na verificação de 2015 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 87 |
| Figura 5.37 - Simulação diária da vazão de jul-2017 a fev-2018 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 89 |
| Figura 5.38 - Simulação diária da carga de fósforo total de jul-2017 a fev-2018 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 90 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.39 - Simulação diária da carga de nitrato de jul-2017 a fev-2018 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 90 |
| Figura 5.40 - Simulação diária da carga de nitrito de jul-2017 a fev-2018 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 91 |
| Figura 5.41 - Simulação diária da carga de nitrogênio amoniacal de jul-2017 a fev-2018 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. | 92 |

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

| | |
|----------------------------------|--|
| $\mu\text{S/cm}$ | Micro-Siemens por centímetro. |
| γ^{obs} | Valor observado. |
| γ^{sim} | Valor simulado. |
| $\overline{\gamma^{\text{obs}}}$ | Média dos valores observados. |
| $\overline{\gamma^{\text{sim}}}$ | Média dos valores simulados. |
| ADASA | Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. |
| ANA | Agência Nacional de Águas. |
| APHA | <i>American Public Health Association</i> - Associação Americana de Saúde Pública. |
| BHLD | Bacia Hidrográfica do Lago Descoberto. |
| BHRR | Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador. |
| CAESB | Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. |
| CETESB | Companhia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. |
| CX | Cambissolo Háplico. |
| °C | Graus Celsius. |
| DEM | <i>Digital Elevation Model</i> - Modelo Digital de Elevação |
| DF | Distrito Federal. |
| DQO | Demanda Química de Oxigênio. |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. |
| FAP-DF | Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal |
| FINEP | Financiadora de Estudos e Projetos |
| FX | Plintossolo Háplico. |
| GX | Gleissolo Háplico. |
| hr | Hora. |
| HRU | <i>Hydrologic Response Unit</i> - Unidade de Resposta Hidrológica. |
| INCRA | Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. |
| INMET | Instituto Nacional de Meteorologia. |
| kg/dia | Quilograma por dia. |
| kg/mês | Quilograma por mês. |
| Km | Quilômetro. |

| | |
|-------------------------------|--|
| LV | Latossolo Vermelho. |
| LVA | Latossolo Vermelho-Amarelo. |
| N-NH ₃ | Nitrogênio na forma de Amônia e Amônio. |
| N-NO ₂ | Nitrogênio na forma de Nitrito. |
| N-NO ₃ | Nitrogênio na forma de Nitrato. |
| m | Metros. |
| m ³ /s | Metros cúbicos por segundo. |
| mg/L | Miligramas por litro. |
| MUSLE | <i>Modified Universal Soil Loss Equation</i> - Equação Modificada de Perda de Solo. |
| NSE | Coefficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe. |
| N | Nitrogênio. |
| OD | Oxigênio Dissolvido. |
| P | Fósforo. |
| PBIAS | Percentual de tendência. |
| pH | Potencial Hidrogeniônico. |
| PNRH | Política Nacional de Recursos Hídricos. |
| PO ₄ ³⁻ | Fósforo Reativo ou Ortofosfato. |
| R ² | Coefficiente de determinação. |
| RQ | Neossolo Quartzênico. |
| RSR | Desvio padrão das observações. |
| SUFI | <i>Sequential Uncertainty Fitting</i> - Programa de Adequação Sequencial de Incertezas. |
| SWAT | <i>Soil and Water Assessment Tool</i> - Ferramenta de Avaliação do Solo e da Água |
| SWAT-CUP | <i>SWAT-Calibration and Uncertainty Programs</i> - Programas de Calibração e Incertezas. |
| TERRACAP | Companhia Imobiliária de Brasília. |
| UNT | Unidade Nefelométrica de Turbidez. |
| USGS | <i>United States Geological Survey</i> - Pesquisa Geológica dos Estados Unidos. |

1 - INTRODUÇÃO

A água é um elemento essencial para a manter e preservar a vida na Terra. O uso sustentável dos recursos hídricos é um desafio, pois requer a efetividade de instrumentos de gestão que associem o crescimento econômico e populacional à preservação ambiental.

No passado, a água era considerada um bem infinito e acreditava-se que os corpos hídricos possuíam capacidade interminável de depuração. Entretanto, há algumas décadas, o rápido aumento populacional e o desenvolvimento industrial e agrícola levaram à preocupação com a disponibilidade dos recursos hídricos devido ao uso excessivo e à degradação dos mananciais (Marques *et al.*, 2011).

Nesse sentido, é necessário promover a manutenção dos recursos hídricos de modo a propiciar a sua utilização e evitar a depleção da disponibilidade hídrica, tanto em aspecto quantitativo quanto em aspecto qualitativo, pois estes são fundamentais na minimização de conflitos relacionados à água.

Sobretudo a partir de 2013, iniciou-se uma sequência de situações de escassez hídrica em diversos estados brasileiros, resultando em impactos ambientais nas regiões próximas aos mananciais, e em prejuízos ao abastecimento público e demais setores, como agricultura e geração de energia. A compreensão da crise hídrica, a valorização do recurso hídrico como bem público e finito, e a conscientização da necessidade de um uso mais racional e sustentável da água são essenciais para que se tenha maior garantia da oferta de água aos usos múltiplos.

O Distrito Federal foi construído em meio ao Planalto Central, onde coexistem as nascentes de afluentes da bacia do Paraná, do São Francisco, e do Tocantins/Araguaia, três grandes regiões hidrográficas brasileiras. É uma região com abundância de águas superficiais e subterrâneas, mas que foi explorada até quase seu limite pelo desenvolvimento crescente e exponencial do seu território.

Ao longo dos últimos três anos, o Distrito Federal enfrentou um período de crise hídrica, associada, principalmente, ao Lago Descoberto, que compõe o maior sistema de

distribuição de água do DF. Atualmente esse sistema é responsável por aproximadamente 60% do abastecimento de água tratada do DF. Essa porcentagem diminuiu após a adoção de medidas de racionamento de janeiro de 2017 a junho de 2018, e do início do uso do Lago Paranoá como reservatório de abastecimento, em outubro de 2017 (CAESB, 2018).

A Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador (BHRR) é uma das principais bacias que contribuem com o lago. Sua área de 113.46 km² compõe cerca de 25% da Bacia Hidrográfica do Lago Descoberto. A BHRR é predominantemente agrícola, com algumas áreas de preservação do cerrado e urbanização de baixa densidade. A bacia vem sendo submetida à poluição difusa, comum de atividades agrícolas, e a uma elevada retirada de água superficial e subterrânea para consumo humano, criação de animais e irrigação de áreas de cultivo.

A Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador (BHRR) conta com monitoramento mensal histórico de qualidade da água realizado pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB). De acordo com os dados monitorados, observa-se variação nos valores de parâmetros de qualidade da água. O aporte de nutrientes oriundo de fontes difusas nas bacias afluentes ao lago, principalmente provenientes de áreas ocupadas pela atividade agropecuária, pode ser uma das causas do aumento da disponibilidade de nutrientes, podendo contribuir com o processo de eutrofização do lago Descoberto. Em função desse monitoramento ocorrer com um espaçamento de 30 dias, torna-se necessária uma avaliação mais precisa da totalidade das cargas de nutrientes que aportam no Lago Descoberto provenientes dessa bacia.

Nesse contexto, o monitoramento dos corpos aquáticos associados à modelagem hidrológica de bacias hidrográficas pode economizar tempo e reduzir custos no processamento das informações associadas à gestão por causa da possibilidade de realização de simulações e previsões a médio e longo prazos dos efeitos das possíveis alterações nos usos antrópicos desses sistemas hídricos (Moriassi *et al.*, 2007).

O monitoramento da qualidade da água deve ser visto como um processo essencial à implementação dos instrumentos de gestão das águas, já que permite a obtenção de informações estratégicas, o acompanhamento das condições dos corpos d'água, e a criação e atualização de bases de dados, imprescindíveis à execução de simulações preditivas por

modelos computacionais, os quais são valiosas ferramentas de gestão e uma das formas mais eficazes de enfrentar o problema de escassez de água, estresse hídrico e deterioração da qualidade da água (Tundisi, 2008).

Dentre os modelos hidrológicos, o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) tem ganhado destaque devido a sua ampla utilização (Gassman *et al.*, 2007). Suas possibilidades de utilização incluem a aplicação em bacias hidrográficas de uso predominantemente agrícola, com estudos voltados à simulação de vazão, produção de sedimentos, qualidade da água, variações nas perdas de nutrientes com mudanças de uso do solo e manejo agrícola, entre outros que envolvam o ciclo hidrológico e seu balanço hídrico.

Ainda assim, existem lacunas em pesquisas associadas à análise dos dados disponíveis de monitoramento hidrológico e de qualidade da água, e da relação com a aplicação satisfatória de modelos em bacias hidrográficas. As complexas condições de bioma, clima e outros aspectos naturais apresentam desafios na adoção difundida de modelos no Brasil. Essas realidades apontam para diversas necessidades em pesquisas e testes na simulação hidrológica e de qualidade da água na utilização de modelos. A ampliação da utilização do SWAT no Brasil pode melhorar as simulações executadas em bacias brasileiras, fornecer orientações e dar suporte aos tomadores de decisão inseridos nas políticas públicas (Bressiani *et al.*, 2015).

Expostos todos esses fatores, o presente trabalho tem por objetivo analisar aspectos quantitativos e qualitativos das águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador/DF baseada na intensificação dos dados de monitoramento da qualidade da água e simulação hidrológica e de qualidade da água na bacia.

Propõe-se atualizar a base de dados monitorados, com a indicação da melhor frequência de amostragem, e aprimorar a disponibilidade de informações relacionadas à Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador, que faz parte de um dos principais sistemas de abastecimento de água do DF. A simulação hidrológica quantitativa e qualitativa com dados provenientes de monitoramento intensificado pode fornecer resultados mais adequados à realidade da bacia, e conseqüentemente, à gestão e ao gerenciamento da bacia do ribeirão Rodeador e do lago Descoberto.

2 - OBJETIVOS

2.1 - OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho foi realizar uma análise dos aspectos quantitativos e qualitativos das águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador/DF baseada na intensificação dos dados de monitoramento da qualidade da água e simulação hidrológica e de qualidade da água na bacia.

2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a qualidade da água superficial da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador/DF utilizando um plano de monitoramento intensivo nos períodos seco e chuvoso.
- Aprimorar a utilização do modelo SWAT na simulação da qualidade da água na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador/DF, em diferentes escalas temporais, a partir de dados monitorados e secundários.
- Analisar os resultados do monitoramento padrão em comparação com o monitoramento intensivo de qualidade da água na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador/DF.
- Avaliar se o monitoramento intensivo de qualidade da água, associado aos dados de monitoramento mensal realizados pela CAESB e à modelagem hidrológica da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador/DF poderão contribuir para o aprimoramento da análise e do entendimento da geração de cargas de nutrientes.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

A crise da água no século XXI é resultado de um conjunto de problemas ambientais agravados por outras questões relacionadas ao gerenciamento, à economia e ao desenvolvimento social. A gravidade e complexidade dessa crise decorrem de questões de disponibilidade e aumento da demanda de água, dentro de um processo de gestão ainda sem integração, atitude preditiva e abordagem sistêmica (Tundisi, 2008).

Até a década de 80, a gestão dos recursos hídricos no Brasil era realizada de forma setorial. Neste período existiam algumas forças preponderantes na negociação da legislação: o setor de energia que pela sua organização e recursos sempre dominou o desenvolvimento dos recursos hídricos, o meio ambiente que contrapunha os potenciais impactos e desejava participar da gestão do processo, a irrigação por circunstâncias da época e pelo grande consumo de água. O setor de água e saneamento, apesar da sua importância na articulação estadual, manteve-se distante das discussões a nível federal (Tucci e Mendes, 2006).

O modelo atual, instituído pela Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) (Brasil, 1997) e pelas Políticas Estaduais, preconiza a gestão integrada dos usos múltiplos da água, tendo por base a bacia hidrográfica. Propõe-se um modelo descentralizado e participativo, baseado na criação de comitês de bacia compostos por representantes de órgãos dos diferentes níveis de governo (federal, estadual e municipal), dos usuários da água e das entidades não-governamentais da sociedade civil. Tais comitês são colegiados com determinadas funções deliberativas e funcionam como Parlamento das Águas de uma bacia. Partindo da premissa de que as águas são usadas por muitos agentes com diferentes interesses, é necessário que todos participem do sistema de gestão das águas, com negociações e decisões coletivas (Malheiros *et al.*, 2013).

A PNRH se baseia nos princípios: (a) a água é um bem de domínio público; (b) a água é um recurso limitado, dotado de valor econômico; (c) a prioridade da água, quanto ao uso, é para o consumo humano; (d) prioriza o uso múltiplo dos recursos hídricos; (e) a bacia hidrográfica é a unidade de planejamento; (f) gestão descentralizada (Brasil, 1997).

Entre os instrumentos de gestão de recursos hídricos, destacam-se os da Política Nacional, comuns a várias políticas estaduais, que são: 1) Plano de Recursos Hídricos; 2) Cobrança pelo uso da água; 3) Enquadramento dos corpos d'água em classes de uso preponderante; 4) Outorga de direito de uso dos recursos hídricos; e 5) Construção e disponibilização do Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos (Brasil, 1997).

Alguns desafios para a efetivação da PNRH são a disponibilidade de recursos orçamentários e a adequada aplicação desses recursos; o desenvolvimento da visão integrada nos diferentes setores; a ampliação do processo de descentralização de ação da gestão de recursos hídricos através da gestão de bacias; a melhoria do sistema de informações hidrológicas e ambientais para a gestão sustentável das bacias hidrográficas; e a manutenção da política de investimento em ciência e tecnologia com participação dos agentes de governo, comunidade científica e empresas (Tucci e Mendes, 2006).

3.2 - FONTES NÃO-PONTUAIS DE POLUIÇÃO

É reconhecida a dificuldade de se realizar estudos e controle em relação a poluição difusa, ou poluição de fontes não-pontuais, principalmente por causa da heterogeneidade dos processos hidrológicos afetados pelo clima, pela topografia, pelos diferentes tipos e usos do solo (Shi *et al.*, 2017).

A agricultura é considerada uma das principais fontes de poluição por nitrogênio e fósforo, através da emissão difusa de nitrato (NO_3) em águas superficiais e subterrâneas, e fosfato (PO_4) nos sedimentos. Os nutrientes presentes no solo estão sujeitos a diversas transformações que influenciam sua biodisponibilidade para as plantas (Cameira e Mota, 2017). As perdas de nitrogênio e fósforo por causa de erosão do solo e escoamento superficial em bacias agrícolas são uma importante contribuição para os níveis de poluição dos corpos d'água (Chen *et al.*, 2016).

A gestão da poluição difusa é complexa e requer análise detalhada e entendimento de diversos processos. Apesar de alguns avanços terem levado à redução de nitrogênio em corpos d'água, a poluição difusa com origem na agricultura ainda é um risco. Existem tecnologias e medidas para reduzir essas emissões, mas a diversidade de sistemas de

plantio e a complexidade do trajeto do nitrogênio na poluição difusa resultaram em marcos regulatórios que não são igualmente eficientes para os diferentes tipos de sistemas de produção (Cameira e Mota, 2017).

A produção de vegetais requer uso intensivo de recursos como água e fertilizantes, em tempo e espaço concentrados. Em geral, o plantio de vegetais tem raízes menos profundas e eficiência de uso de nitrogênio de menos de 50%, além de serem colhidos em um estágio de seu desenvolvimento no qual deixam um excesso de N mineral no solo, passível de ser carregado para corpos d'água (Cameira e Mota, 2017; Goulding, 2006).

Na maior parte dos locais, os mais altos níveis de cargas de poluentes acontecem quando os eventos de chuva aumentam o escoamento superficial e levam consigo os fertilizantes aplicados nos plantios e os resíduos da criação de animais. A concentração de poluentes é logarítmica, e começa a aumentar exponencialmente a partir do momento em que cerca de 40% da bacia é ocupado por agricultura e pecuária (Novotny, 2007).

3.3 - MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA

Há várias razões pelas quais se justifica o interesse pelo monitoramento da qualidade da água em bacias hidrográficas. Dentre elas, a identificação de padrões de qualidade da água, a determinação de fontes de cargas de poluentes, a avaliação da efetividade de programas de recuperação da qualidade da água em rios e o acompanhamento dos níveis de poluentes em determinado corpo hídrico (Lima, 2004; Schneider, 2016).

O plano de monitoramento é definido em função do objetivo do projeto. Assim, a primeira etapa do programa de amostragem é a definição clara dos objetivos. Em seguida, deve ser realizada a seleção de parâmetros e locais de amostragem, do número de amostras e tempo de amostragem, dos métodos analíticos, dos equipamentos e dos métodos de coleta e preservação das amostras. Posteriormente, pode ser elaborado o plano de amostragem, seguido da reavaliação da metodologia e interpretação dos dados (São Paulo, 2011).

Nesse sentido, é muito importante a definição da frequência de amostragem. A frequência fixa, por vezes adotada, pode levar a erros de avaliação por retratar condições em instantes pré-determinados, sem considerar as flutuações de vazões ou de qualidade da água. O

incremento na frequência amostral na ocorrência de eventos é válido para o conhecimento da influência destes na qualidade da água (Lima, 2004).

Robertson e Roerish (1999) realizaram estudo comparativo entre as estratégias de amostragem para determinar a influência da frequência na quantificação de fósforo e sólidos suspensos. Foram escolhidos métodos somente com frequências fixas, e métodos que combinavam essas com amostragens adicionais em diferentes períodos de eventos de cheias. Os autores mostraram que a estratégia mais eficaz foi a de frequência mensal com maior frequência de amostragem em época de cheias.

Essa maior frequência na época de cheias é importante para determinar as mudanças na qualidade da água do corpo hídrico com a passagem de maior vazão. Enquanto que em alguns locais a estação chuvosa representa uma melhora na qualidade da água por causa da diluição de poluentes (Passig *et al.*, 2015), em outros, a ação de carreamento de compostos associados ao solo causada pela chuva gera poluição considerável nos corpos hídricos (Kaufmann *et al.*, 2014; Santos e Hernandez, 2012).

Vidal e Neto (2013) chegaram a resultados que apontam para um processo de degradação ambiental potencializado durante o período chuvoso, quando o aporte de nutrientes aumenta consideravelmente devido ao carreamento pelas chuvas. Nessas condições, é observado aumento nas concentrações de nutrientes, sobretudo em reservatórios. O principal afluente do reservatório monitorado nesse estudo é fonte contínua de carreamento de poluentes.

Nesse contexto, Jones *et al.* (2017) e Taylor *et al.* (2016) mostram que uma frequência maior na coleta de dados contínuos é benéfica para a compreensão dos processos que ocorrem no corpo d'água, assim como importante para a geração de dados com maior qualidade e mais possibilidades de uso, principalmente na construção de bases de dados para a aplicação na modelagem em simulações diárias e sub-diárias.

Quando existe a necessidade de comparar dados de monitoramentos históricos com dados de monitoramento de projetos específicos, além do uso na modelagem quantitativa e qualitativa, é comum recorrer a dados secundários. No entanto, Sprague *et al.* (2017) enfatizam que o uso de dados secundários pode causar incongruências quando não são

adequados ao formato necessário de uso, particularmente no caso de nutrientes, para os quais existem diferentes formas químicas e físicas presentes na água.

Em mananciais onde a concentração de nutrientes se encontra acima do necessário para causar eutrofização, o crescimento populacional inexoravelmente conduz ao aumento da pressão sobre o uso do mesmo. Assim, somente a mobilização dos diferentes setores envolvidos para a correta gestão do aporte de nutrientes, aliado a um acompanhamento científico criterioso e dirigido, pode resultar no controle e na manutenção dos níveis de nutrientes aceitáveis a médio e longo prazo (Rathunde et al, 2013).

3.4 - UTILIZAÇÃO DO SWAT

O modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é um modelo matemático capaz de realizar simulações de um variado conjunto de processos que acontecem em uma bacia hidrográfica. Foi desenvolvido com o objetivo de diagnosticar e prever os impactos de mudanças no uso do solo de uma bacia sobre o escoamento superficial e subterrâneo, além de simular as condições de qualidade da água e da dinâmica de sedimentos e agroquímicos em bacias hidrográficas complexas. Dentre os principais componentes do modelo estão hidrologia, clima, sedimentação, temperatura do solo, crescimento vegetal, nutrientes, pesticidas e manejo agrícola (Arnold *et al.*, 2012; Neitsch *et al.*, 2011).

O SWAT pode ser considerado um modelo determinístico, semiconceitual, contínuo, semidistribuído e dinâmico. O modelo é considerado semiconceitual porque possui base física robusta, mas alguns processos ainda são simulados de maneira empírica. É considerado semidistribuído por é distribuído no âmbito da bacia, mas concentrado quanto à Unidade de Resposta Hidrológica (Moriassi *et al.*, 2007).

No modelo SWAT a bacia hidrográfica pode ser discretizada em sub-bacias ou em Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs - *Hydrologic Response Units*). A sub-bacia é o primeiro nível de divisão da bacia. As sub-bacias definidas em uma bacia hidrográfica estão relacionadas entre si. No entanto, as HRUs correspondem a uma combinação única de tipo de solo, uso e cobertura do solo e declividade dentro da bacia. Não existe interação entre as HRUs em uma sub-bacia, dessa maneira, se a interação entre duas áreas diferentes

é importante, ao invés de adotar as áreas como HRUs, melhor defini-las como sub-bacias (Dechmi *et al.*, 2012).

O cálculo de cargas do escoamento superficial, incluindo sedimentos, nutrientes, entre outros que são transportados pelo escoamento de cada HRU é realizado separadamente e depois somado aos demais para determinar o total de cargas de uma sub-bacia. O principal benefício de utilizar as HRUs para a discretização no modelo é aumentar a precisão da previsão de cargas da sub-bacia (Arnold *et al.*, 2012).

A simulação da bacia hidrográfica é separada em fase terra, que controla a quantidade de água, e cargas de sedimentos, nutrientes e pesticidas que pode ser conduzida ao canal principal em cada sub-bacia; e fase aquática, que é o movimento da água, sedimentos, nutrientes, entre outros, através da rede de canais até o exutório (Neitsch *et al.*, 2011).

O ciclo hidrológico é impulsionado pelos dados de clima que incluem precipitação diária, temperaturas máxima e mínima, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar. O modelo SWAT tem acesso a essas informações por meio de arquivos inseridos ou pode ele mesmo gerar essas informações utilizando um gerador de clima com base nos valores mensais observados (Arnold *et al.*, 2012).

O SWAT possui um único módulo de crescimento vegetal para simular todos os tipos de cobertura do solo e diferencia o tipo de vegetação em plantas anuais e perenes. As plantas anuais crescem a partir do momento do plantio até sua colheita. As plantas perenes mantêm seus sistemas de raízes no decorrer do ano, e são dormentes nos meses de inverno.

Segundo Salles *et al.* (2015) é importante a definição de parâmetros que representem características típicas dos solos da região do cerrado, antes da inserção dos mapas de tipos de solo e de uso do solo, pois os solos da região diferem da base de dados padrão do modelo.

A previsão das cargas de sedimentos gerada na bacia é realizada através da Equação Universal da Perda de Solo Modificada (MUSLE – Modified Universal SoilLossEquation). Além disso, o SWAT é capaz de modelar o movimento e o transporte de várias formas de nitrogênio e fósforo ao longo da bacia (Dechmi, 2012).

O ciclo do nitrogênio é um sistema dinâmico e inclui água, atmosfera e solo. As plantas necessitam de nitrogênio mais do que qualquer outro elemento essencial, excluindo o carbono, oxigênio e hidrogênio.

O nitrogênio é modelado no modelo SWAT no perfil do solo e no aquífero superficial. As três principais formas de nitrogênio em solos minerais são nitrogênio orgânico associado com húmus, formas minerais de nitrogênio presas por coloides do solo e formas minerais de nitrogênio em solução (Neitsch *et al.*, 2011).

O SWAT monitora cinco formas de nitrogênio (N) no solo: as duas primeiras são formas inorgânicas de nitrogênio, os íons amônio (NH_4ly) e nitrato (NO_3ly), enquanto as outras três são formas orgânicas de nitrogênio. O nitrogênio orgânico fresco ($\text{orgN}_{\text{frsh,ly}}$) está associado com resíduos e biomassa microbiana, enquanto as formas N orgânico estável ($\text{orgN}_{\text{sta,ly}}$) e N orgânico ativo ($\text{orgN}_{\text{act,ly}}$) estão presentes na parcela húmica do solo (Neitsch *et al.*, 2011).

As etapas de simulação do fluxo do nitrogênio no SWAT correspondem à inicialização do nitrogênio do solo, decomposição e mineralização, nitrificação e volatilização da amônia, desnitrificação, fixação, nitrito nos aquíferos, como expostos na Figura 3.1. Nos canais de escoamento as transformações entre as formas de nitrogênio são parecidas com as da fase solo, conforme mostrado na Figura 3.2 (Neitsch *et al.*, 2011; Silva, 2016).

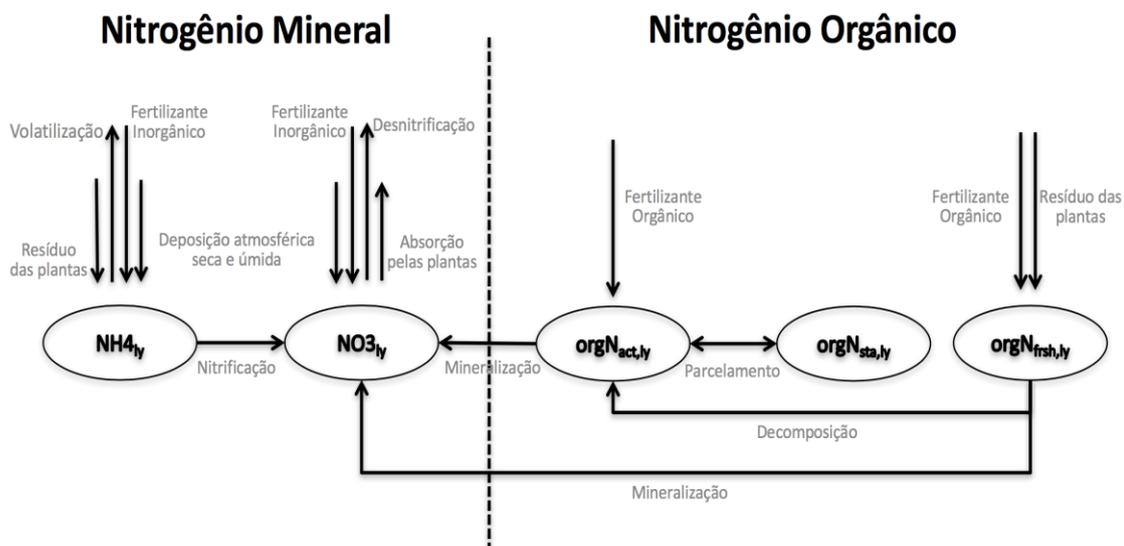


Figura 3.1 - Processos dos compostos contendo nitrogênio do solo - SWAT. (Neitsch *et al.*, 2011, modificado por Silva, 2016).

balanço hídrico para reservatórios inclui as vazões de entrada, saída, a chuva no espelho d'água, evaporação, infiltração e desvios (Nunes, 2016).

A etapa seguinte envolve a calibração e validação do modelo. A calibração é o processo de estimar os parâmetros do modelo pela comparação das previsões do modelo para um dado conjunto de supostas condições com os dados observados para essas mesmas condições. A validação do modelo envolve a simulação utilizando os parâmetros de entrada mensurados ou determinados na calibração. São realizadas em geral dividindo a série de dados disponíveis em dois conjuntos, um para calibração e outro para validação. Os dados devem ser divididos de maneira que os dois conjuntos de dados sejam comparáveis, ambos englobando anos secos e chuvosos (Moriassi *et al.* 2007).

O processo de calibração é realizado através da alteração sistemática dos parâmetros do modelo. Logo após o modelo executar a simulação e fornecer os resultados, estes devem ser analisados e comparados com os dados observados. De maneira geral, a calibração pode ser realizada manualmente, contudo, quando o número de parâmetros a serem calibrados é muito grande, a calibração manual torna-se um processo trabalhoso e neste caso é preferencial a calibração automática (Dechmi *et al.*, 2012).

O primeiro passo do processo de calibração e validação no SWAT é a determinação dos parâmetros mais sensíveis para uma bacia hidrográfica. O usuário determina quais variáveis ajustar baseado na opinião de especialistas ou na análise de sensibilidade (Arnold *et al.*, 2012).

Ferrigo (2014) ressalta que existem dois tipos de parâmetros: físicos e de processo. Os parâmetros físicos representam as propriedades físicas da bacia hidrográfica que costumam ser mensuráveis, e os parâmetros de processo representam as características da bacia que usualmente não são mensuradas (Soroshian e Gupta, 1995 apud Ferrigo, 2014). Existem, ainda, alguns parâmetros físicos que são mensuráveis em teoria, mas de difícil medição na prática, e por isso tendem a ser calibrados (Pechlivanidis *et al.*, 2011 apud Ferrigo, 2014).

Arnold *et al.* (2012), ao revisar 64 estudos representativos da utilização mundial do SWAT, verificou que determinados parâmetros costumam ser mais sensíveis aos processos modelados pelo SWAT e, portanto, mais utilizados no processo de calibração.

Moriasi *et al.* (2007) recomendam que uma combinação de técnicas deve ser utilizada para a avaliação das etapas de calibração e validação como métodos gráficos, coeficientes adimensionais e índices de erros. Para o uso de métodos estatísticos os autores orientam que a escolha dos mesmos deve ser realizada de acordo com a robustez em termos de aplicabilidade para vários constituintes, modelos e condições climáticas; uso comum, aceitabilidade e recomendações na literatura técnica; e pontos fortes identificados na avaliação do modelo.

Outro fator que têm significativa influência na calibração dos parâmetros de vazão é a separação do fluxo de base e do escoamento superficial. Arnold e Allen (1999) compararam cálculos de um filtro digital de fluxo de base com os resultados do balanço hídrico de seis locais e puderam chegar a resultados satisfatórios que auxiliam na separação da vazão total em fluxo de base e escoamento superficial.

Segundo Neitsch *et al.* (2011), a partir do modelo calibrado por vazão, é possível fazer a calibração dos parâmetros de qualidade da água, acompanhada da análise de sensibilidade global. A escolha dos parâmetros levaria em conta os processos de geração, transformação, transporte e remoção de nutrientes que ocorrem no solo e na água, assim como os processos de produção de sedimentos da bacia, considerando que estes afetam o carreamento de nutrientes, principalmente do fósforo. Nesse contexto, ao realizar a calibração para a qualidade da água na bacia do lago Paranoá, Nunes (2016) selecionou parâmetros relacionados à geração de sedimentos e à produção de fósforo que podem ser utilizados na calibração dos parâmetros ligados à qualidade do modelo para a bacia do ribeirão Rodeador.

Nunes (2016) relatou dificuldades na calibração do modelo SWAT por qualidade no lago, enquanto que Silva (2016) nota que o período de modelagem e a execução de apenas um ano de aquecimento podem ter aumentado a influência dos parâmetros ligados às concentrações iniciais de nutrientes no aporte desses na bacia. Bressiani *et al.* (2015) ressaltam que análises de sensibilidade podem ser usadas em algumas bacias para determinar a duração adequada do período de aquecimento.

A utilização do SWAT para a simulação de qualidade da água tem se ampliado no Brasil e no mundo. Lubitz *et al.* (2013) avaliaram a aplicação do modelo à bacia do ribeirão

Concórdia, em Santa Catarina, com a comparação de séries observadas e simuladas de vazão e de concentração de sedimentos, nitrito, nitrato, fósforo total e ortofosfato. Os resultados mostraram um ajuste muito bom da simulação mensal de vazão e sedimentos, mas a simulação diária dessas variáveis, e de nutrientes foram insatisfatórias.

No mesmo ano, Shen *et al.* (2013) aplicaram o SWAT para identificar cargas de nitrogênio e fósforo provenientes de fontes não-pontuais de poluição em diferentes tipos de solo e cobertura do solo na região do reservatório de Três Gargantas, China. Os autores utilizaram dados de vazão, sedimentos, fósforo total, nitrato e nitrogênio amoniacal de sete estações ao longo das quatro bacias na região. No geral, os resultados da calibração e verificação foram de satisfatórios a muito bons.

Um estudo mais recente da mesma região feito por Shi *et al.* (2017) para avaliar os processos hidrológicos e da qualidade da água na bacia do rio Pengxi, um dos principais afluentes do rio Yangtze, onde está o reservatório de três Gargantas, utilizou duas estações para calibrar e verificar o modelo, atingindo resultados satisfatórios para vazão e muito bons para nitrogênio total e fósforo total.

Também na China, no distrito irrigado de Hetao, Wu *et al.* (2017) simularam em passo mensal vazão, nitrogênio total e fósforo total, para avaliar as cargas de nutrientes, as fontes de poluentes e os processos hidrológicos. Os resultados da vazão foram muito bons na calibração e verificação, a calibração de nitrogênio total e fósforo total tiveram desempenho satisfatório, porém as simulações de verificação de nitrogênio e fósforo foram insatisfatórias.

Nos Estados Unidos, Sullivan e Gao (2016) focaram nas fontes de geração de nitrogênio. Os autores avaliaram duas bacias no Texas, Cibolo e Dry Comal, com calibração e verificação da vazão em ambas, e calibração e verificação da carga de nitrato na bacia de Dry Comal. Os resultados foram satisfatórios para vazão nas duas bacias, e muito bons para nitrato.

No Distrito Federal, o primeiro trabalho aplicando o SWAT foi publicado em 2010, por Carvalho. Nos anos seguintes, foram realizados diversos estudos da aplicação do modelo às bacias do DF. Uma síntese desses trabalhos é exposta na Tabela 3.1.

Na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador, os primeiros trabalhos a apresentar calibração específica à bacia foram os de Silva (2016) e Aguiar (2016). Ambas as autoras calibraram e verificaram a vazão com resultados aceitáveis, porém identificaram condições que impossibilitaram a calibração de nitrogênio total e fósforo total.

Tabela 3.1 - Síntese dos trabalhos que aplicaram o SWAT no Distrito Federal.
(Silva, 2016, modificado)

(continua)

| Autores | Região de estudo | Análise realizada | Resultados obtidos |
|------------------------------|---|--|--|
| Carvalho (2010) | Ribeirão Rodeador | Produção de sedimentos, sem calibração. | Insatisfatórios. |
| Ferrigo <i>et al.</i> (2011) | Córrego Capão Comprido | Produção de sedimentos, com calibração. | Satisfatórios. |
| Minoti <i>et al.</i> (2011) | Ribeirão Bananal e Ribeirão Gama | Transporte de sedimentos, nitrogênio e fósforo, sem calibração. | Insatisfatórios. |
| Salles (2012) | Ribeirão Pípiripau | Vazão, com análise de sensibilidade e calibração manual. | Satisfatórios. |
| Strauch <i>et al.</i> (2012) | Ribeirão Pípiripau | Efeitos de diferentes dados de entrada na vazão simulada, com calibração. | Satisfatórios para todos os dados de entrada. |
| Strauch <i>et al.</i> (2013) | Ribeirão Pípiripau | Efeitos da aplicação de BMPs na produção de sedimentos e na vazão, com calibração. | Satisfatórios. |
| Castro (2013) | Alto Rio Jardim | Vazão, com calibração e parametrização do solo com levantamento de dados na área. | Satisfatórios. |
| Ferrigo (2014) | Bacia do Lago Descoberto | Vazão, com calibração automática para uma das sub-bacias analisadas. | Satisfatórios. |
| Lima <i>et al.</i> (2014a) | Bacia do Lago Descoberto, Alto Rio Jardim | Hidrologia comparativa para identificação dos parâmetros mais sensíveis, com calibração. | Parâmetros CN2 e SOL_K como aqueles que mais se relacionam às características físicas. |
| Lima <i>et al.</i> (2014b) | Alto Rio Jardim | Levantamento de dados em campo para construção de base de dados de solo do DF. | Valores médios e intervalos para parâmetros relativos a sete tipos de solo. |
| Salles <i>et al.</i> (2015) | Ribeirão Pípiripau | Efeitos de diferentes dados de entrada de solos na vazão simulada, sem calibração. | Insatisfatórios. |

Tabela 3.2 - Síntese dos trabalhos que aplicaram o SWAT no Distrito Federal.
(Silva, 2016, modificado)

(conclusão)

| Autores | Região de estudo | Análise realizada | Resultados obtidos |
|-------------------------------|---------------------------|---|--|
| Nunes (2016) | Bacia do Lago Paranoá | Vazão e cargas de fósforo e nitrogênio, com calibração automática e verificação. | Satisfatórios para vazão, insatisfatórios para cargas de nutrientes. |
| Aguiar (2016) | Ribeirão Rodeador | Vazão, com calibração automática, e cargas de fósforo e nitrogênio sem calibração. | Satisfatórios para a vazão, insatisfatórios para cargas de nutrientes. |
| Silva (2016) | Ribeirão Rodeador | Vazão, com calibração automática, e cargas de fósforo e nitrogênio sem calibração. | Satisfatórios para a vazão, insatisfatórios para cargas de nutrientes. |
| Ferreira <i>et al.</i> (2017) | Riacho Fundo | Vazão, calibração e simulação de cenários (1) atual e (2) com adensamento populacional. | Satisfatório na calibração. Cenário 2 gera vazão menor. |
| Monteiro e Ferrigo (2018) | Bacias do Alto Descoberto | Vazão, com calibração para todas as bacias e análise de cenários. | Satisfatórios para vazão em todas as bacias. |

4 - METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho foi composta por monitoramento de qualidade da água em campo; atualização da base de dados; simulação, calibração e verificação do modelo SWAT para a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador (BHRR) e avaliação das cargas de nutrientes geradas. A Figura 4.1 apresenta um fluxograma com as etapas do trabalho.

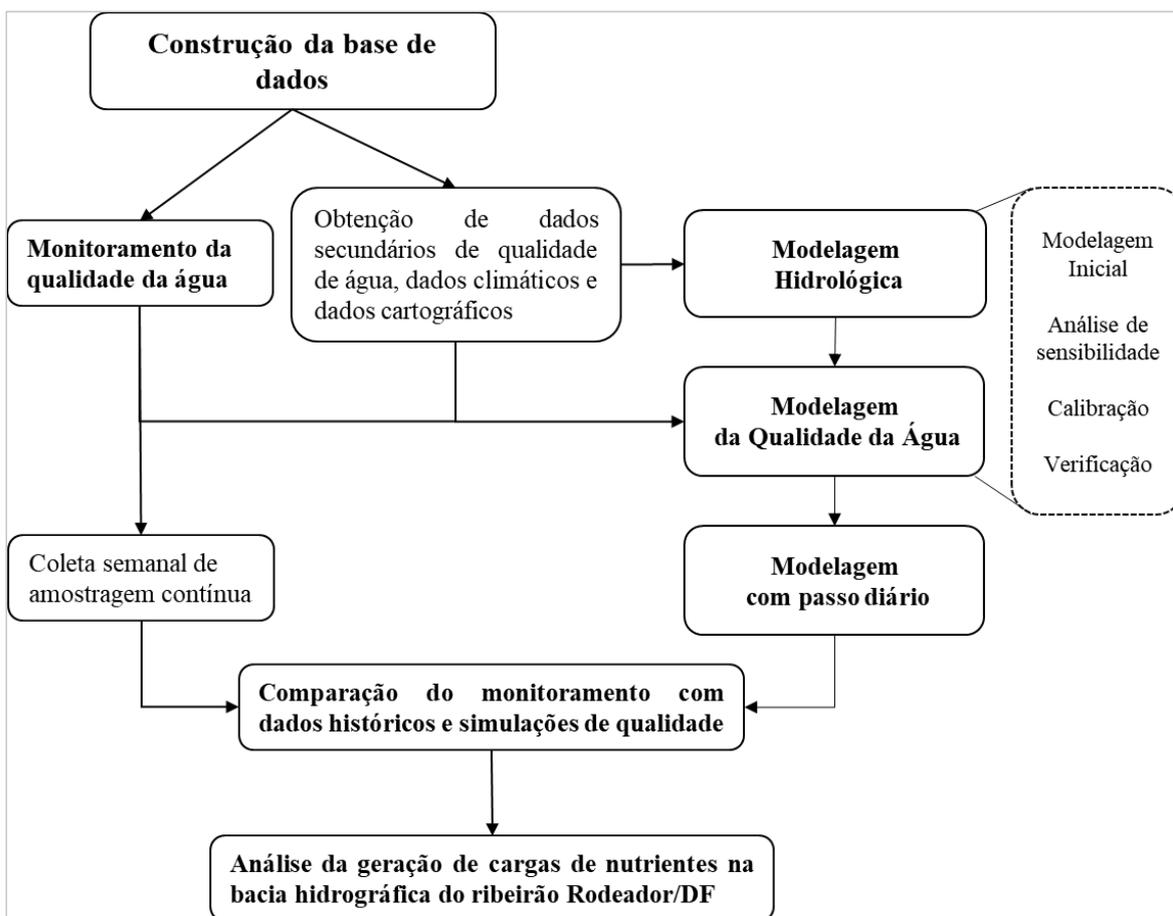


Figura 4.1 - Fluxograma das etapas do trabalho

4.1 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica do Lago Descoberto (BHLD) está inserida na grande região hidrográfica do Paraná, na região do Planalto Central Brasileiro. Seu território de 452 km² é dividido entre o estado de Goiás, com aproximadamente 30% da área, e o Distrito Federal, com os 70% restantes (Lima *et al.*, 2013).

A Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador (BHRR), apresentada na Figura 4.2, é uma sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Lago Descoberto (BHLD), localizada na margem nordeste do lago, com uma área de 113,46 km², cerca de 25% do total da área da BHLD.

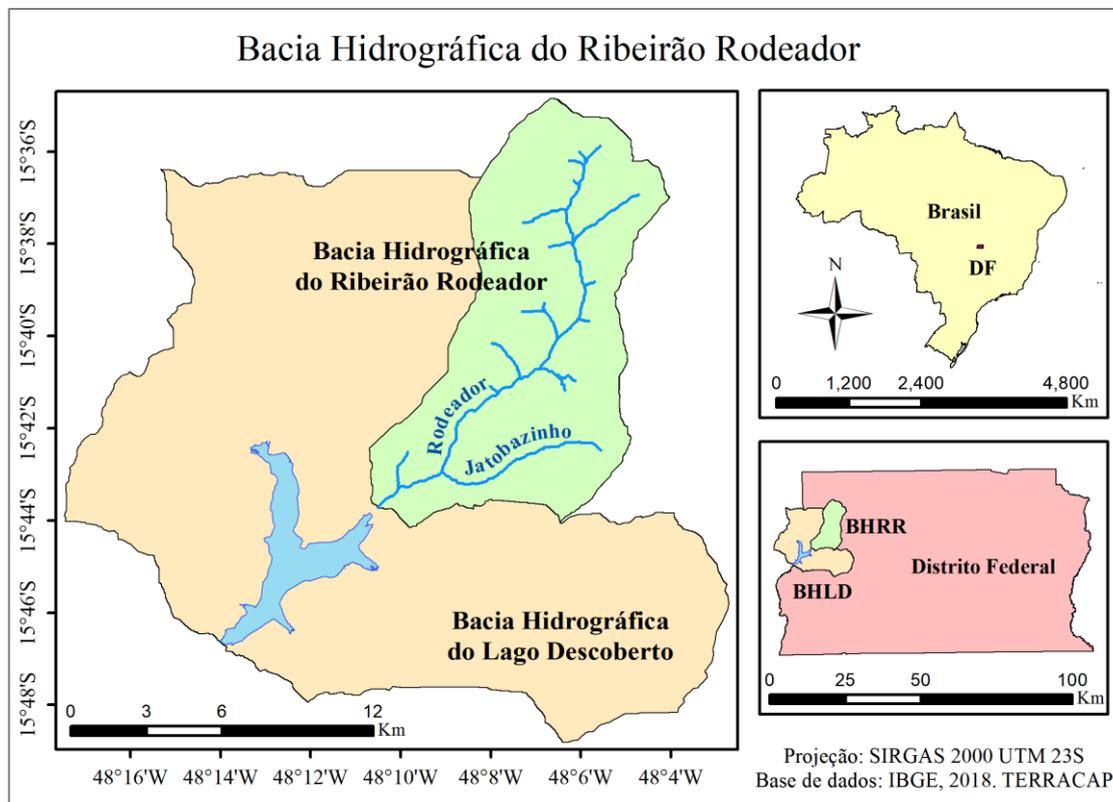


Figura 4.2 - Localização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador. (Elaborado por Fim, 2018).

O Ribeirão Rodeador é um dos principais afluentes do Lago Descoberto, que abastece aproximadamente 60% da população do Distrito Federal. Devido a períodos de seca mais severa, em outubro de 2016 o nível desse reservatório atingiu valores inferiores a 20% da sua capacidade de armazenamento. Houve a adoção de rodízio de abastecimento de água nas regiões do sistema Descoberto de janeiro de 2017 a junho de 2018 (CAESB, 2018).

A situação tende a se agravar com o aumento da população, cujas consequências são a maior demanda por água e impermeabilização do solo, diminuindo a infiltração e a recarga dos aquíferos que alimentam o lago e seus afluentes. O Ribeirão Rodeador foi enquadrado como classe II (CRH-DF, 2014) e sua bacia é predominantemente agrícola, assim vem sendo submetida a poluição difusa e a uma elevada retirada de água superficial e subterrânea para irrigação de áreas agrícolas.

A Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador (BHRR) foi escolhida para a realização do presente trabalho por haver a suspeita de lançamentos de cargas pontuais de nutrientes provenientes das atividades agropecuárias na bacia. Associa-se a isso a necessidade de realização de estudos relacionados à intensificação do monitoramento mensal realizado pela CAESB. Em função desse monitoramento histórico, a escolha mais apropriada foi a de um ponto de amostragem que coincidissem com a estação de monitoramento da CAESB.

4.1.1 - Clima

De acordo com a classificação de Köppen o clima da região é CwA, tropical típico de savana, caracterizada por inverno seco. A umidade relativa média do ar é 67%, mas pode ocorrer grande variação, podendo chegar a 15% no período de seca. As temperaturas médias anuais ficam entre 19°C e 23°C (Lima *et al.*, 2014).

A precipitação média anual é aproximadamente 1400 mm. A estação seca, de maio a setembro, é bastante rigorosa, chegando a registrar de 5 a 6 meses sem chuva em anos mais secos. A estação chuvosa vai de outubro a abril, sendo que 80% do total anual de chuvas ocorre no verão, de dezembro a março.

A bacia do Rodeador conta com apenas uma estação pluviométrica, próxima à nascente do rio Jatobazinho, operada pela CAESB. Os dados de chuva foram especializados com mais quatro estações cujas áreas de influência abrangem a BHRR. Essas são expostas na Figura 4.3, que apresenta a localização das estações e os polígonos de Thiessen traçados para o cálculo da precipitação média ponderada. A Tabela 4.1 expõe as informações básicas das estações e a área de influência de cada uma delas na BHRR.

Tabela 4.1 - Informações básicas das estações pluviométricas localizadas na região da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

| Código | Nome da estação | Latitude | Longitude | Altitude (m) | Área de influência (km²) |
|---------------|------------------------|-----------------|------------------|---------------------|--|
| 1548000 | Brazlândia quadra 18 | 15° 40' 16" | 48° 13' 19" | 1106 | 9,20 |
| 1548007 | ETA Brazlândia | 15° 41' 13" | 48° 12' 27" | 1098 | 14,42 |
| 1548009 | Jatobazinho | 15° 42' 43" | 48° 05' 33" | 1205 | 59,60 |
| 1548013 | Fazenda Santa Elisa | 15° 35' 48" | 48° 02' 35" | 1205 | 30,24 |

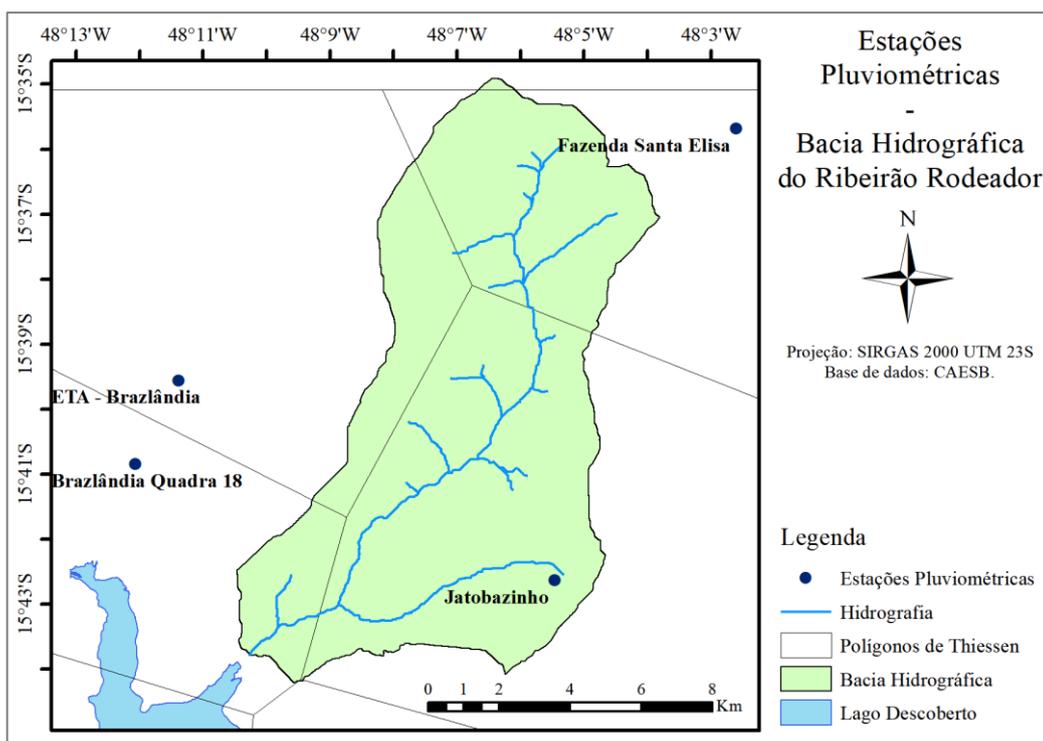


Figura 4.3 - Localização das estações pluviométricas e polígonos de Thiessen na região da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. (Elaborado por Fim, 2018 com base nos dados de Ferrigo, 2014).

4.1.2 - Relevo

O Modelo Digital de Elevação (DEM) da região foi preparado por Ferrigo (2014) a partir de curvas de nível espaçadas em 5 metros disponibilizadas pela Companhia Imobiliária de Brasília (TERRACAP). Utilizando o DEM foi feita a classificação do relevo segundo as classes definidas por Uberti *et al.* (1991 apud Ferrigo, 2014): (1) de 0 a 8%, relevo plano e suavemente ondulado; (2) de 8 a 20%, relevo ondulado; e (3) acima de 20%, relevo ondulado, fortemente ondulado, montanhoso e escarpado, como visto na Figura 4.4. O relevo da BHRR é predominantemente plano e suavemente ondulado, sendo que 76% da bacia apresenta declividades inferiores a 8%. Menos que 4% da região apresentam declividades superiores a 20%, conforme é possível observar na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Distribuição da declividade na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

| Declividade | Tipo de relevo | Área (km ²) | Porcentagem |
|-------------|---|-------------------------|-------------|
| < 8% | Plano e suavemente ondulado | 85,82 | 75,64% |
| 8 - 20% | Ondulado | 23,29 | 20,52% |
| > 20% | Fortemente ondulado, montanhoso e escarpado | 4,35 | 3,83 |

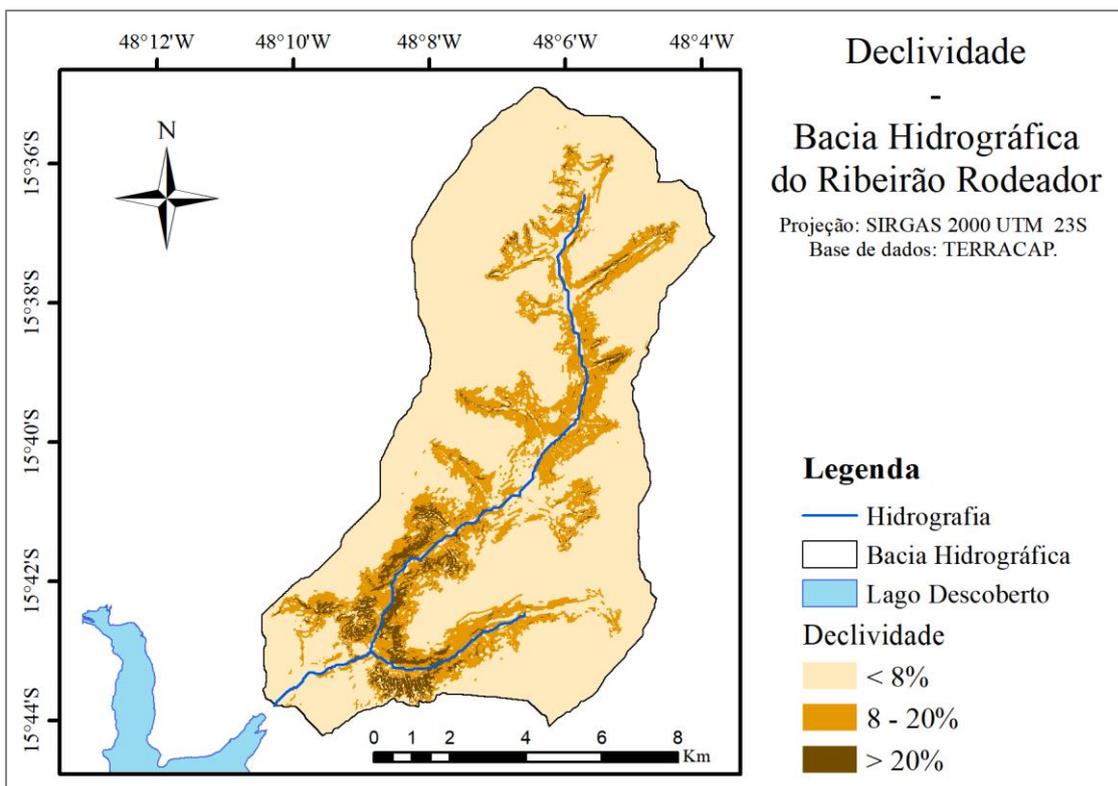


Figura 4.4 - Mapa de declividade da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. (Elaborado por Fim, 2018 com base nos dados de Ferrigo, 2014).

4.1.3 - Tipos de Solo

O mapa de tipos de solo, mostrado na Figura 4.5, também foi obtido pela base de dados elaborada por Ferrigo (2014), originalmente construído por Reatto *et al.* (2003). Os tipos de solo presentes na região da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador, em ordem de predominância, são Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Cambissolo Háplico (CX), Plintossolo Háplico (FX), Neossolo Quartzênico (RQ) e Gleissolo Háplico (GX), como pode ser verificado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Distribuição dos tipos de solo na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador.

| Tipo de solo | Área (km ²) | Porcentagem |
|----------------------------------|-------------------------|-------------|
| Plintossolo Háplico (FX) | 3,71 | 3,3% |
| Cambissolo Háplico (CX) | 22,10 | 19,5% |
| Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) | 38,90 | 34,2% |
| Latossolo Vermelho (LV) | 46,30 | 40,8% |
| Neossolo Quartzênico (RQ) | 2,00 | 1,8% |
| Gleissolo Háplico (GX) | 0,45 | 0,4% |

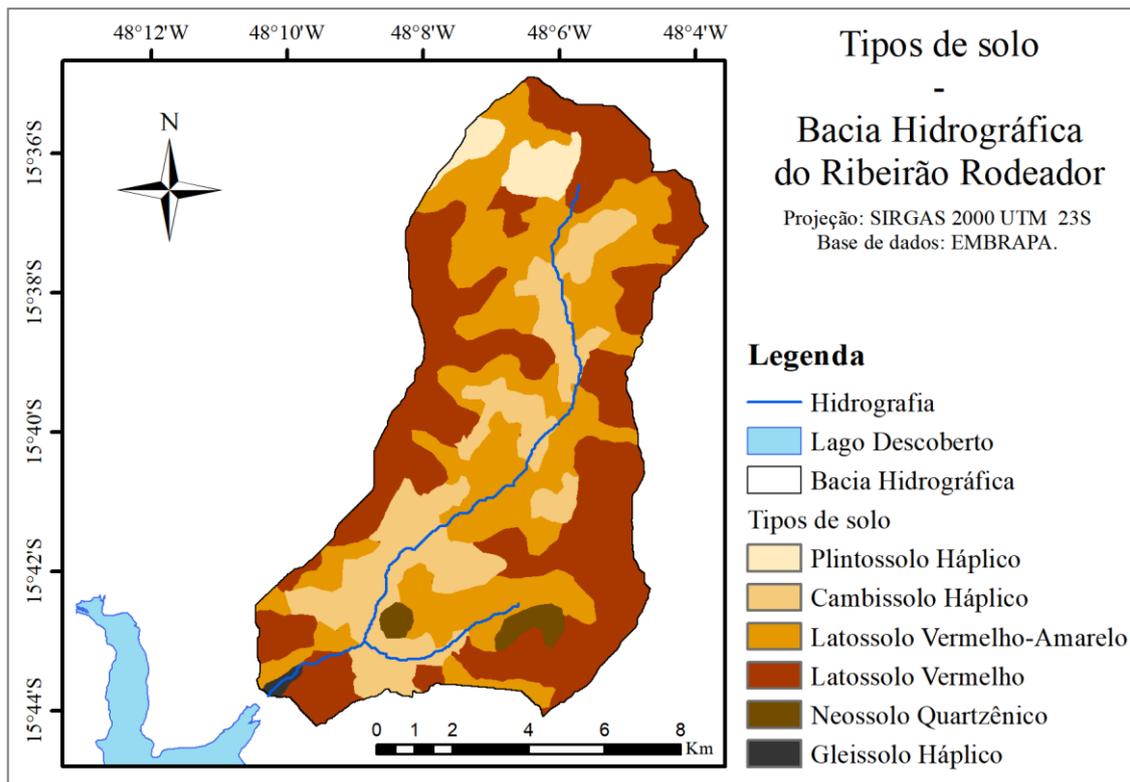


Figura 4.5 - Tipos de solo da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. (Elaborado por Fim, 2018 com base nos dados de Ferrigo, 2014).

Os Latossolos são solos com boa drenagem e bem estruturados, mas têm alto potencial erosivo quando ocorre a remoção da cobertura vegetal (EMBRAPA, 2006). O Cambissolo Háplico ocupa porções mais elevadas da paisagem, geralmente apresenta minerais primários facilmente intemperizáveis, teores mais elevados de silte e um horizonte subsuperficial submetido a pouca alteração física e química, porém suficiente para ter cor e estrutura (Ferrigo, 2014). O Gleissolo Háplico caracteriza-se por ser hidromórfico, geralmente presente nas depressões sujeitas a inundações (Reatto *et al.*, 2003).

4.1.4 - Uso e Ocupação do Solo

A bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador caracteriza-se principalmente por atividades de agricultura e pecuária em pequenas propriedades rurais que formam pontos de urbanização de baixa densidade. A produção de hortifrutigranjeiros foi originada pelo Projeto Integrado de Colonização Alexandre Gusmão, que foi implantado pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) na década de 1960, com os objetivos de fixar a mão-de-obra não absorvida pela construção civil e instalar um cinturão verde nas proximidades das cidades satélites (Teza, 2008).

O mapa de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Lago Descoberto foi elaborado por Ferrigo (2014) na escala 1:3000 a partir da ortofoto de resolução de 24 cm disponibilizada pela Terracap em abril de 2013. Silva (2016) atualizou o mapa de uso e ocupação do solo para a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador, visto na Figura 4.6.

Dessa maneira, predominam áreas de cerrado preservado, horticultura e campo limpo, que perfazem cerca de 75% da área da bacia. Outros usos expressivos são mata de galeria, reflorestamento de pinus e eucalipto, pomares, áreas vegetadas e áreas urbanas de baixa densidade, que somados correspondem a quase 20% da área da bacia, como pode ser verificado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Distribuição do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF (modificado de Silva, 2016).

| Uso e ocupação do solo | Área (km²) | Porcentagem |
|-----------------------------------|------------------------------|--------------------|
| Áreas alagáveis | 0,710 | 0,626% |
| Água | 0,156 | 0,137% |
| Urbanização Baixa/Média Densidade | 0,542 | 0,478% |
| Urbanização Média/Alta Densidade | 0,228 | 0,201% |
| Urbanização Baixa Densidade | 3,182 | 2,805% |
| Urbanização Alta Densidade | 0,099 | 0,087% |
| Cerrado Preservado | 36,382 | 32,067% |
| Reflorestamento Pinus | 5,424 | 4,781% |
| Pastagem | 0,754 | 0,665% |
| Mata de Galeria | 6,163 | 5,432% |
| Área Vegetada | 1,466 | 1,292% |
| Reflorestamento Eucalipto | 3,807 | 3,355% |
| Vias Não-Pavimentadas | 3,045 | 2,684% |
| Área Degradada | 0,005 | 0,004% |
| Campo Limpo | 19,376 | 17,078% |
| Solo Exposto | 0,038 | 0,033% |
| Vias Pavimentadas | 0,490 | 0,432% |
| Horticultura | 29,214 | 25,749% |
| Pomar | 2,377 | 2,095% |

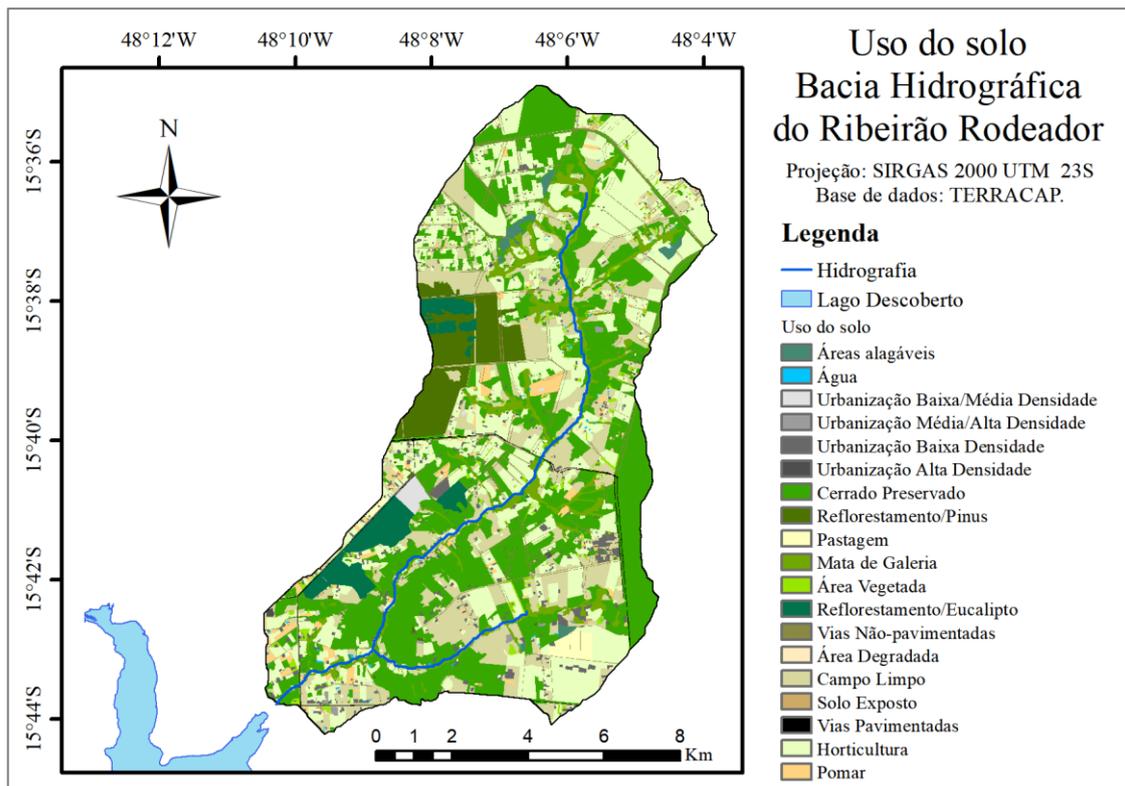


Figura 4.6 - Mapa de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

(Elaborado por Fim, 2018 com base nos dados de Ferrigo, 2014).

4.1.5 - Uso da Água

Segundo os dados compilados por Silva (2016), existem doze pontos de captação de água superficial outorgados pela ADASA na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador (BHRR), no entanto, são realizadas retiradas significativas em apenas dois, cuja localização é apresentada na Figura 4.7. A captação “Rodeador” possui outorga de captação superficial mensal constante de 34.560 m³/dia e a captação outorgada em “Jatobazinho” varia mensalmente, mínima de 7.776 m³/dia e máxima de 18.144 m³/dia (Silva, 2016).

O cadastro de poços disponibilizados pela ADASA, levantados por Araújo (2018) lista um total de 238 locais de captação subterrânea na BHRR, 134 poços classificados como manuais e 104 como tubulares. Como as finalidades são declaratórias, na bacia são observados os usos irrigação, abastecimento humano e criação de animais, sendo que na maioria dos casos, dois dos três usos se acumulam. As vazões outorgadas para esses poços são bastante variáveis. Nos poços tubulares a vazão mínima é 0,22 m³/dia, associada ao abastecimento humano, e a vazão máxima é 187,50 m³/dia, associada à criação de animais.

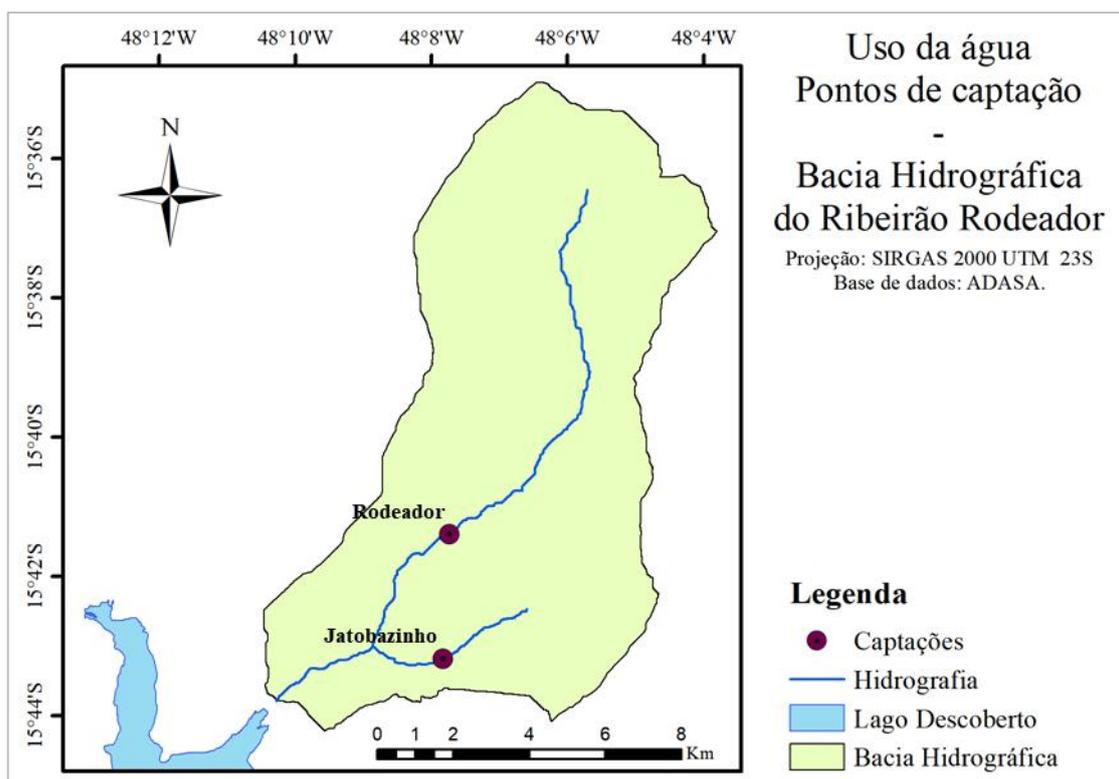


Figura 4.7 - Localização dos pontos de captação de água superficial na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. (Elaborado por Fim, 2018 modificado de Silva, 2016).

4.2 - BASE DE DADOS

A base de dados utilizada no presente trabalho foi elaborada com as informações geradas pela caracterização da BHRR e pela requisição e obtenção de dados diários de vazão e dados mensais e trimestrais de qualidade da água junto à CAESB. A Tabela 4.5 resume as fontes dos dados utilizados.

Tabela 4.5 - Dados necessários à elaboração da base de dados.

| Dado | Fonte | Detalhes |
|--|--------------------------------------|--|
| Pluviométrico | CAESB/ANA | Período: 1971 a 2018 |
| Climatológico (Vento, Radiação Solar, Temperaturas e Umidade Relativa) | INMET | Período: 1971 a 2018 |
| Modelo Digital de Elevação | Ferrigo (2014) | Curvas de nível 5m |
| Mapa de Tipos de Solo | Ferrigo (2014); Reatto et al. (2003) | Escala 1:100000 |
| Mapa de Uso e Ocupação do Solo | Ferrigo (2014) | Escala 1:3000 |
| Vazão | CAESB | Período: 1978 a 2018 |
| Qualidade da Água | CAESB | Período: 1984 a 2018 |
| Captação Superficial e Subterrânea | ADASA; Silva (2016) | Vazões outorgadas e pontos de captação |

O clima da BHRR foi descrito no item 4.1.1, juntamente com a localização das estações pluviométricas na região da bacia. A Figura 4.8 traz a disponibilidade de dados de chuva para as estações pluviométricas na região da BHRR.

Observa-se que as estações Brazlândia Quadra 18, Jatobazinho e Fazenda Santa Elisa só apresentam dados até os primeiros meses de 2009. A estação ETA Brazlândia tem dados, de janeiro de 1971 até fevereiro de 2018. Dessa maneira, a partir de 2009, quando as outras não têm dados, a estação ETA Brazlândia foi utilizada para representar a chuva na bacia.

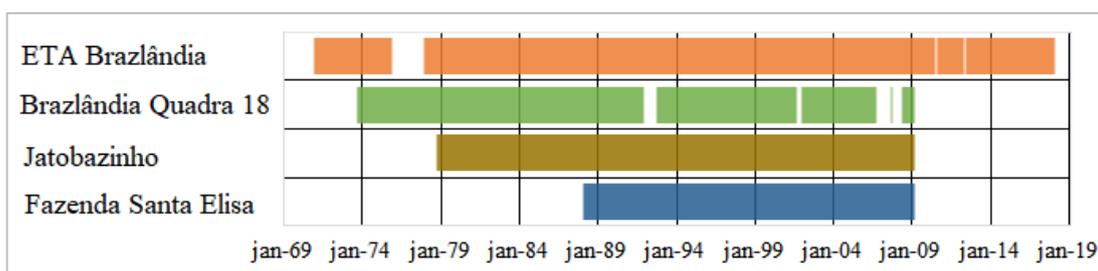


Figura 4.8 - Disponibilidade de dados pluviométricos na região da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador.

Os dados climatológicos são usados como dados de entrada para a modelagem da bacia com o SWAT, por isso a importância que estejam disponíveis para todo o período de simulação. Os dados de vento, radiação solar, temperatura e umidade relativa foram obtidos sem falhas de janeiro de 1971 até fevereiro de 2018.

A disponibilidade de dados de vazão no exutório da bacia é essencial para a calibração e verificação das simulações com o SWAT. Os dados de vazão foram fornecidos de junho de 1978 a fevereiro de 2018. Os dados já haviam sido consistidos até 2013. As falhas em dados diários foram preenchidas com dados de dias próximos.

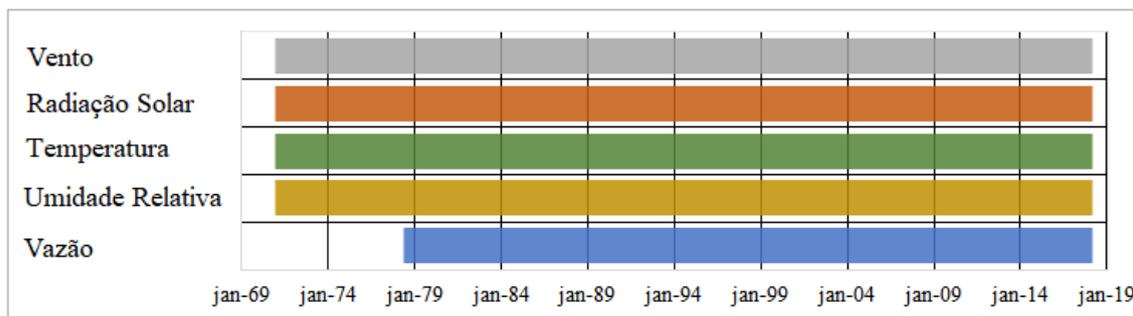


Figura 4.9 - Disponibilidade de dados climatológicos e de vazão utilizados na simulação da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador.

4.2.1 - Vazão

O monitoramento dos dados de nível é realizado pela CAESB diariamente em um ponto localizado próximo ao exutório da BHRR, a estação fluviométrica Rodeador, cujo código é 60435250. A localização dessa estação foi apresentada na Figura 4.8, na Metodologia, com a identificação “Exutório”. O nível é medido com um linígrafo acoplado a um *data logger*, e posteriormente transformado em vazão com a utilização da curva chave calculada para o ribeirão Rodeador. No dia da coleta dos dados é realizada a leitura das réguas de nível e a medição de outras variáveis físicas.

A série histórica de dados de vazão conta com dados de 1º de junho de 1978 até os dias atuais, sem falhas, provavelmente devido ao preenchimento de falhas realizada nos dados. Avaliando a vazão média para cada mês, na Figura 4.10, de junho de 1978 a fevereiro de 2018, juntamente com a chuva acumulada, é possível perceber um comportamento relativamente constante dos dados de vazão, com mínimas nos meses secos e máximas nos meses chuvosos. Porém, vale ressaltar que em anos mais recentes os registros mais altos de chuva não mais se convertem em vazões mais altas.

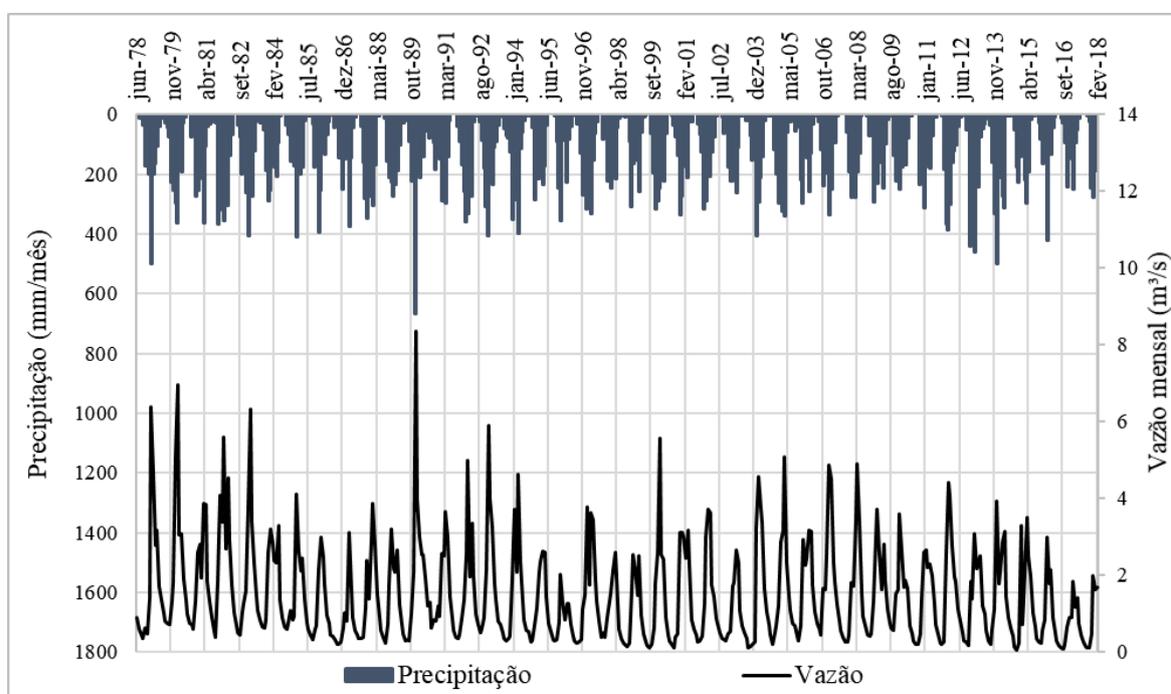


Figura 4.10 - Registros mensais de vazão e precipitação de 1978 a 2018 na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. (Elaborado com dados da CAESB, 2018).

O gráfico da Figura 4.11 foi elaborado a média dos valores mensais para cada mês do ano, provenientes da série de dados de 1978 a 2018. Percebe-se que há um padrão de comportamento das vazões ao longo do ano, com as mínimas ocorrendo geralmente entre julho e setembro, e as máximas entre janeiro e março. Confirma-se esse fato ao verificar a diferença de nível do ribeirão Rodeador na Figura 4.12, na qual (a) foi registrada em 18 de julho e (b) em 09 de janeiro de 2018.

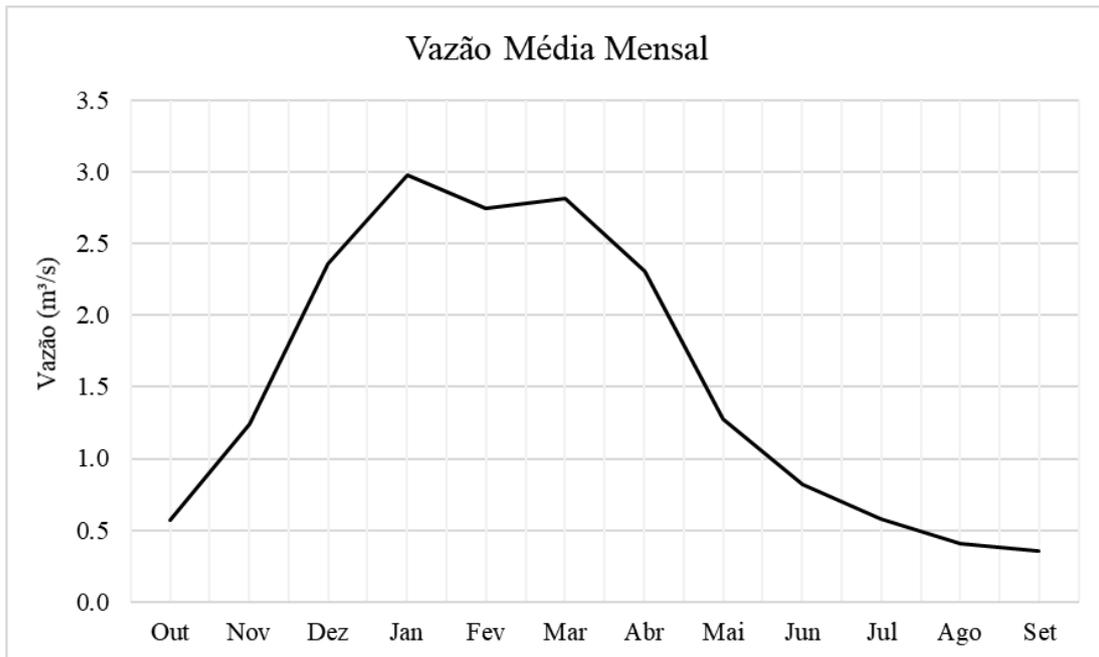


Figura 4.11 - Gráfico das vazões médias mensais de 1978 a 2018 no exutório da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. (Elaborado com dados da CAESB, 2018)



Figura 4.12 - Registros fotográficos do ponto de monitoramento próximo ao exutório da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador. (a) 18 de julho de 2017. (b) 09 de janeiro de 2018.

4.2.2 - Qualidade da água

O monitoramento da qualidade da água superficial do ribeirão Rodeador é feito no mesmo ponto de medição da vazão. Atualmente a CAESB realiza coletas mensais, com análises trimestrais e semestrais de alguns parâmetros, e a ADASA faz coletas trimestrais, como parte do acompanhamento e controle da qualidade da água nos corpos hídricos distritais.

A CAESB realiza monitoramento desde janeiro de 1984. Mensalmente são analisadas amostras para coliformes totais (NMP/100mL), *E. coli* (NMP/100mL), fósforo total (mg P/L), nitrogênio total (mg N/L), oxigênio dissolvido (mg/L) pH e temperatura (°C). As amostras trimestrais são analisadas para cloreto (mg/L), condutividade (μ S/cm), cor aparente (uH), demanda bioquímica de oxigênio (mg/L), ferro dissolvido (mg/L), ferro total (mg/L), nitrato (mg N-NO₃/L), nitrogênio amoniacal (mg N-NH₃/L) e turbidez (NTU). Os parâmetros nitrito (mg N-NO₂/L), sólidos suspensos (mg/L), sólidos totais (mg/L) e sulfato (mg SO₄/L) são analisados a cada seis meses.

O monitoramento da ADASA foi iniciado em fevereiro de 2013 e realiza análises de temperatura ambiente (°C), temperatura da amostra (°C), condutividade (μ S/cm), turbidez (NTU), demanda bioquímica de oxigênio de 5 dias (mg O₂/L), demanda química de oxigênio (mg O₂/L), nitrato (mg N-NO₃/L), nitrito (mg N-NO₂/L), nitrogênio amoniacal (mg N-NH₃/L), nitrogênio total (mg N/L), oxigênio dissolvido (mg O₂/L), pH, fósforo total (mg P/L), fosfato (mg PO₄/L), sólidos dissolvidos (mg/L), sólidos totais (mg/L), coliformes totais (NMP/100mL) e coliformes termotolerantes (NMP/100mL). Além disso, é calculado o Índice de Qualidade da Água (IQA).

Visando a compatibilidade entre os monitoramentos realizados pela ADASA e CAESB e o monitoramento do presente trabalho, foram selecionados alguns parâmetros para a análise dos dados e posterior comparação com as análises realizadas nas coletas semanais.

Assim, analisando a Figura 4.13, percebe-se que a série de medições da concentração de Nitrogênio Total tem pouquíssimas falhas, principalmente nos anos iniciais. Além disso, os valores variam bastante, com máximas podendo chegar a mais que 2,5 mg/L e mínimas em 0,1 mg/L. Observa-se também que essas grandes variações costumam ser bruscas, o que indica que há eventos de maior descarga ou carreamento de nitrogênio ao corpo hídrico.

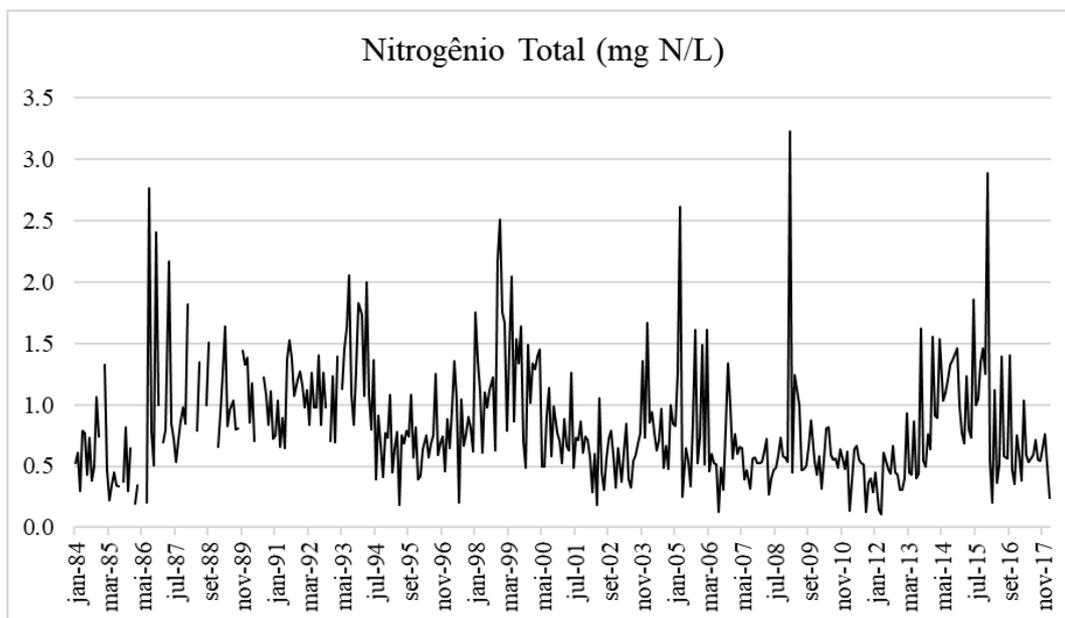


Figura 4.13 - Registros mensais da concentração de nitrogênio total na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. (Elaborado com dados da CAESB, 2018).

No caso da série de concentração de fósforo total, na Figura 4.14, geralmente a variação está entre 0,005 e 0,20 mg/L. Porém, nos últimos anos, foram registrados valores comparativamente altos. Em 2013 e 2014 esses valores ocorreram em agosto, quando costuma chover no DF, podendo ter ocorrido o carreamento de compostos fosfatados ao curso d'água.

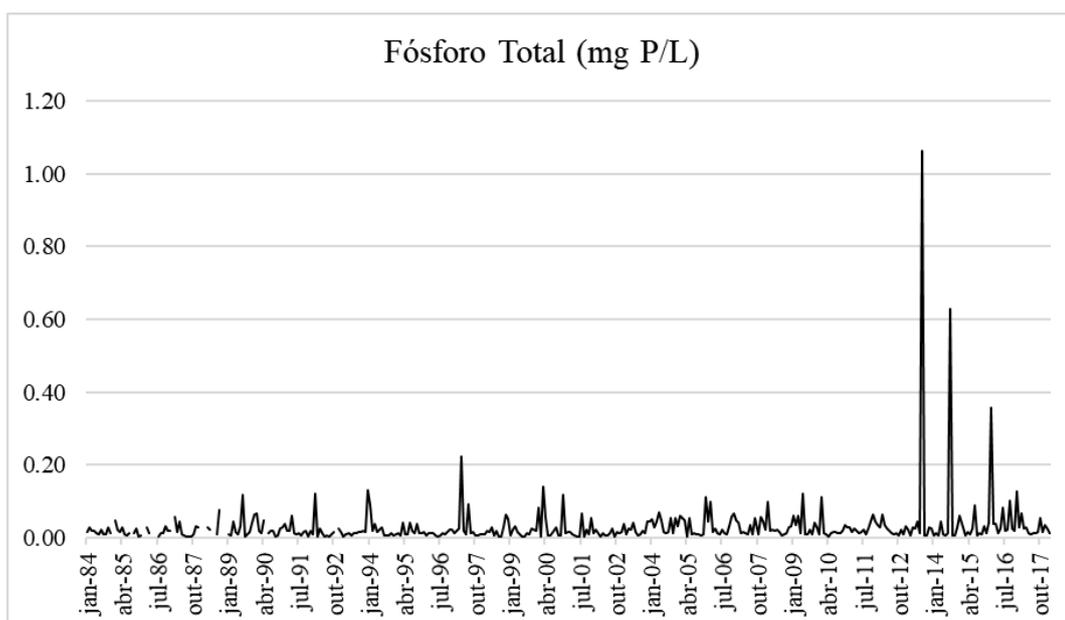


Figura 4.14 - Registros mensais da concentração de fósforo total na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. (Elaborado com dados da CAESB, 2018).

A Figura 4.15 mostra as séries da concentração de fósforo dissolvido (a), nitrato (b), nitrito (c) e nitrogênio amoniacal (d). Apesar de todas elas se iniciarem em 1984, a maioria teve a série interrompida, a de fósforo dissolvido em 2002, a de nitrato em 2003, e a de nitrito em 1984. Houve outras medições posteriores nessas séries, porém foram muito espaçadas e insuficientes para continuar a curva.

Os valores de fósforo dissolvido, assim como os de nitrito, costumam ser bastante baixos, raramente passando de 0,015 mg/L. Esses valores podem ser baixos porque, no caso do fósforo, esse geralmente está associado a sedimentos, apresentando valores menores quando dissolvido, e no caso do nitrogênio porque é facilmente oxidado a nitrato, em função da disponibilidade de oxigênio dissolvido no ribeirão Rodeador, conforme foi observado nos dados históricos e nos dados obtidos pelo presente trabalho. Em consequência, o nitrato está comparativamente mais alto, passando de 0,5 mg/L nas máximas. A série de nitrogênio amoniacal também apresentar bastante falhas e passou a ser feita a cada três meses em 2013. Os valores de nitrogênio amoniacal apresentam uma variação maior que os outros compostos nitrogenados, indo de 0,0 a 1,0 mg/L.

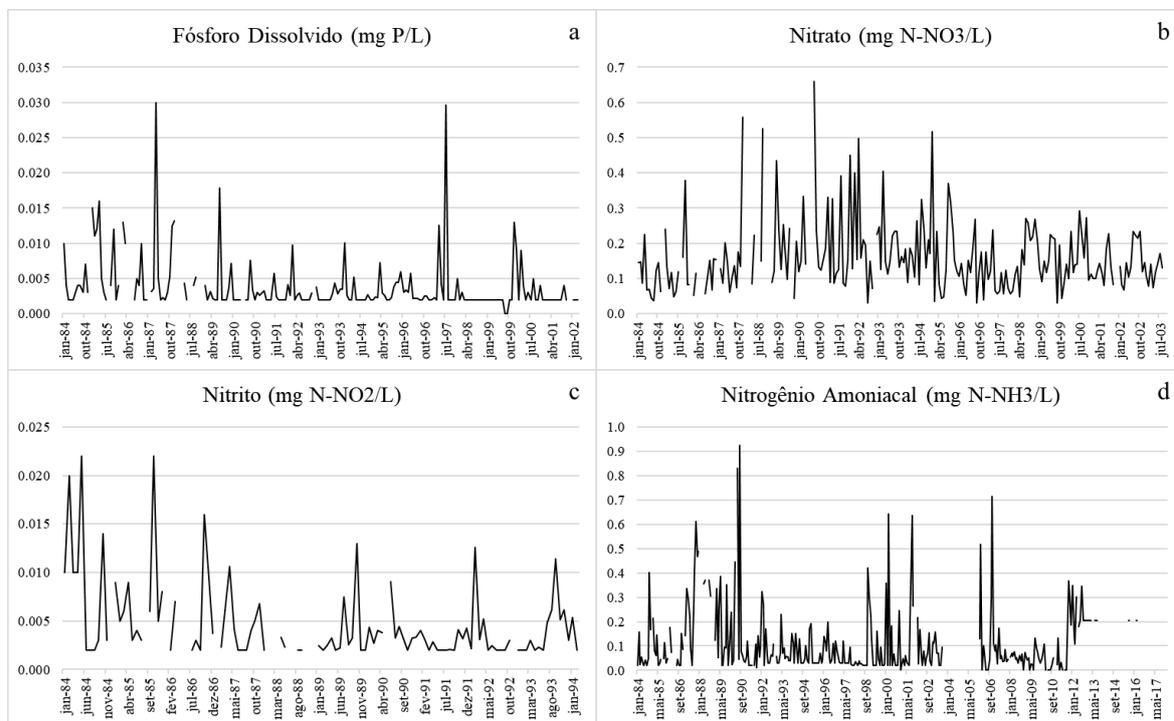


Figura 4.15 - Registros mensais da concentração de nutrientes na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

- (a) Fósforo Dissolvido (mg P/L). (b) Nitrato (mg N-NO₃/L). (c) Nitrito (mg N-NO₂/L).
 (d) Nitrogênio Amoniacal (mg N-NH₃/L).
 (Elaborados com dados da CAESB, 2018).

A Figura 4.16 expõe as séries da concentração de demanda química de oxigênio (a), oxigênio dissolvido (b), e dos valores de pH (c), temperatura (d), condutividade (e) e turbidez (f). As séries de DQO, OD e temperatura apresentam extensas falhas por volta de 2002 a 2005, sendo que DQO parou de ser medida em 2013.

Temperatura, pH e OD apresentam valores mais estáveis, dentro do preconizado pela resolução CONAMA nº 357/05 para um corpo hídrico de água doce classe II (Brasil, 2005). Já DQO, condutividade e turbidez tiveram alguns valores extremamente altos. A turbidez chegou a valores quase três vezes mais altos do que é aconselhado para um corpo hídrico de água doce classe II (Brasil, 2005).

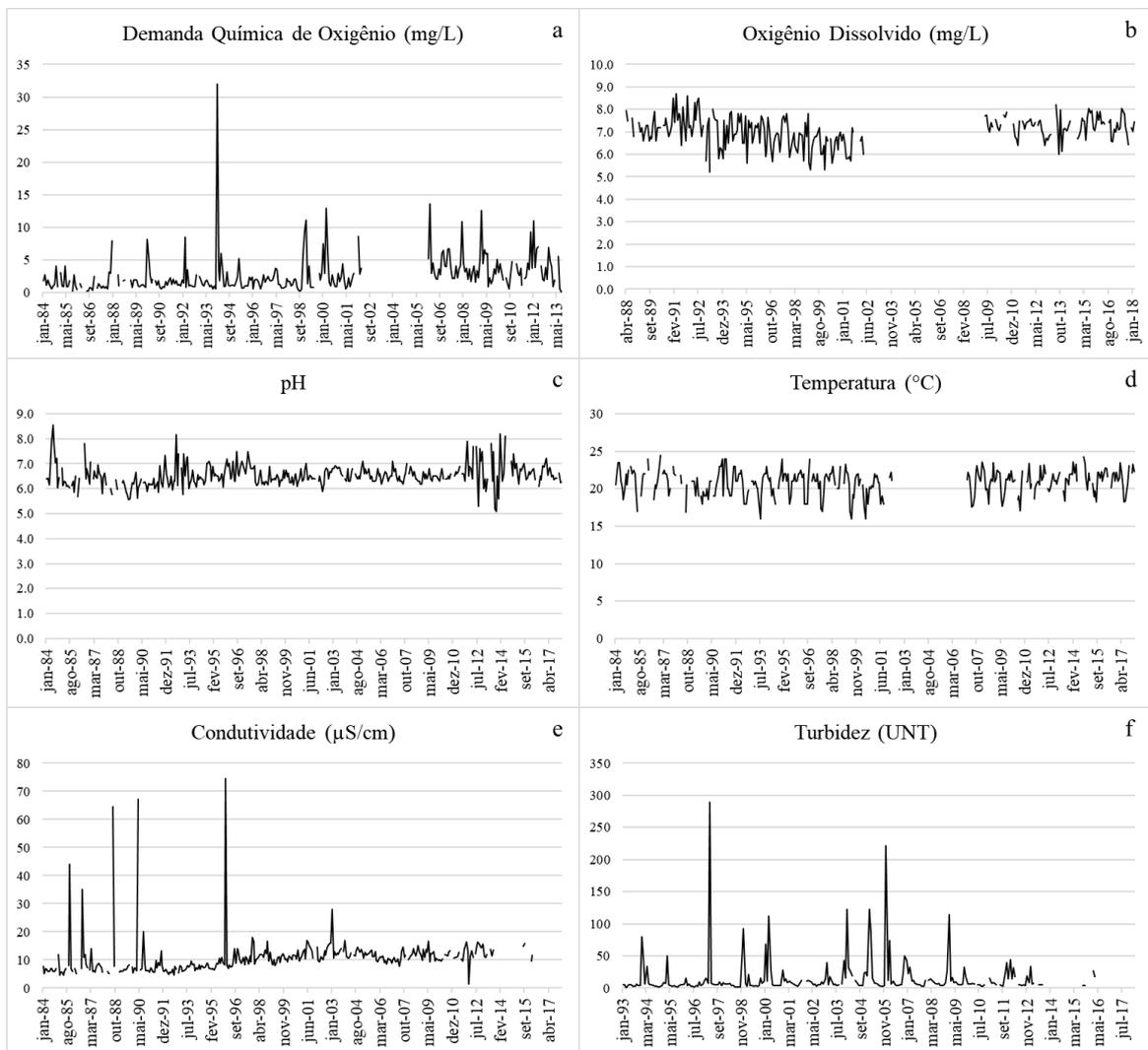


Figura 4.16 - Registros mensais de qualidade da água na
bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

(a) Demanda Química de Oxigênio (mg /L). (b) Oxigênio Dissolvido (mg /L). (c) pH.
(d) Temperatura (°C). (e) Condutividade (µS/cm). Turbidez (NTU).

(Elaborados com dados da CAESB, 2018).

4.3 - MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA

O objetivo do monitoramento foi obter dados de qualidade da água para a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador em uma frequência maior do que o monitoramento atual, realizado pela CAESB, além de poder usá-los para a comparação com resultados do modelo SWAT. Com base nesse objetivo foi elaborado o planejamento de amostragem e escolhidos os parâmetros a serem analisados em laboratório.

4.3.1 - Planejamento de Amostragem

O monitoramento da qualidade da água do Ribeirão Rodeador foi realizado próximo ao exutório da bacia, no ponto de monitoramento da CAESB. Foi realizado contato institucional com a CAESB para obter autorização para o uso das instalações da estação de monitoramento da companhia, além de solicitação de dados de monitoramento histórico. O ponto de monitoramento é exposto na Figura 4.17.

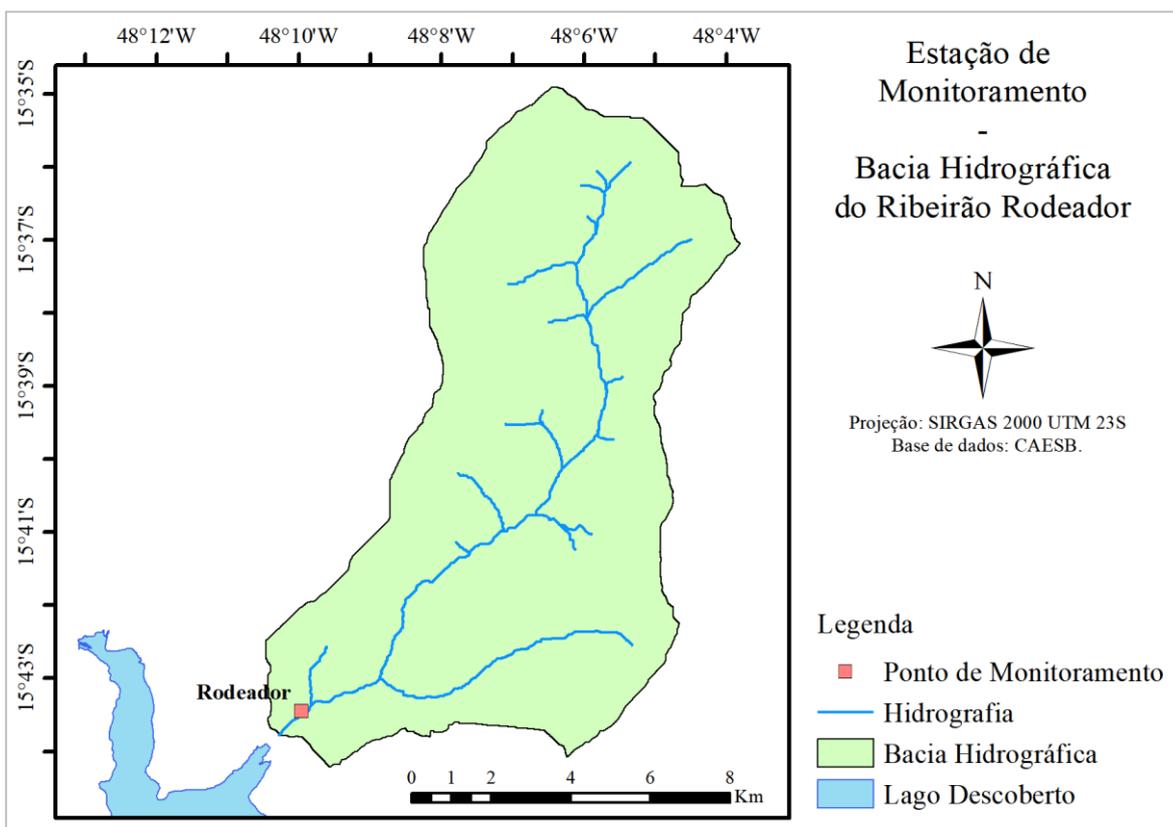


Figura 4.17 - Localização dos pontos de monitoramento na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. (Elaborado por Fim, 2018)

A CAESB dispõe de um linígrafo acoplado a um data logger instalado na estação de monitoramento localizada no exutório da bacia hidrográfica. Na estação já existia uma manilha e tubos de PVC instalados pela CAESB. Os tubos fazem a conexão entre a manilha e o corpo hídrico. No dia do registro fotográfico das Figura 4.18, os funcionários da equipe da Geológica, empresa terceirizada pela CAESB responsável pelo monitoramento hidrológico, abriram a manilha para limpeza e desobstrução do tubo que a conecta ao corpo d'água.



Figura 4.18 - Registros fotográficos do monitoramento. (a) Estruturas da estação monitoramento da CAESB. (b) Linígrafo com *data logger*. (c) Manilha aberta. (Fonte: arquivo pessoal).

A amostragem discreta foi realizada semanalmente, do dia 18 de julho de 2017 ao dia 12 de fevereiro de 2018, totalizando 31 semanas de amostragem em campo. Era necessário que a amostragem discreta do presente trabalho fosse mais frequente do que a amostragem do monitoramento padrão realizado pela CAESB. Na impossibilidade de ir a campo diariamente, devido a restrições de tempo e recursos, foi escolhida a frequência semanal.

Nos dias de campo era coletada uma amostra de água superficial do ribeirão Rodeador em uma garrafa de um litro, a qual era armazenada em caixa de isopor contendo barras rígidas de gelo reutilizáveis (Gelox) para a manutenção da temperatura. Além disso, em cada visita de campo foi realizada análise *in situ* com uma sonda multiparamétrica da marca YSI modelo 6920 V2 para medição de temperatura, pH, turbidez, condutividade e oxigênio dissolvido.

A amostragem contínua foi realizada com um amostrador automático do modelo Teledyne ISCO 3700 *Portable Sampler*, mostrado nas Figuras 4.19. Esse equipamento consiste de um sistema de bombeamento de água e um carrossel com 24 frascos de amostras e pode ser programado para coletar amostras com volumes variáveis de 1 mililitro a 1 litro, a intervalos de 1 minuto a 99 horas e 59 minutos, com incremento de 1 minuto, sendo que esses intervalos não precisam ser necessariamente uniformes (Teledyne Isco, 2017).



Figura 4.19 - Amostrador automático Teledyne ISCO 3700. (Fonte: Teledyne Isco, 2017).

A amostragem contínua foi realizada durante a noite por dois motivos. Primeiramente, houve uma suspeita da polícia ambiental em relação a cargas de poluentes ocorrendo durante a noite e no início da manhã, identificadas principalmente pelo odor. Além disso, é comum que amostragens discretas sejam realizadas pela manhã, e não havia nenhum dado contínuo da evolução da qualidade da água do ribeirão Rodeador durante a noite, período no qual alguma carga de poluente poderia passar despercebida mais facilmente.

No período de estiagem, o amostrador automático foi programado para coletar amostras de 500 mL a intervalos de 30 minutos, das 20:00 horas de um dia até às 07:00 horas do dia seguinte. Essas coletas foram realizadas nos dias 16, 17, 21, 22, 28 e 29 de setembro de 2017 totalizando 24 amostras em cada coleta. Nos dias 17 e 29 de setembro somente 15 amostras foram analisadas devido à falta de reagentes no laboratório, motivada pelo atraso, por parte da empresa fornecedora de reagentes, na entrega dos itens adquiridos meses antes do início do monitoramento.

No período chuvoso, a programação do amostrador também foi para coletar 500 mL a cada 30 minutos, das 22:00 horas de um dia até às 09:30 horas do dia seguinte. Essas coletas foram realizadas nos dias 24-25 e 30-31 de janeiro e 5-6 de fevereiro de 2018, totalizando 24 amostras cada uma. Amostragem análoga foi realizada nos dias 11 e 12 de fevereiro, porém com coletas das 05:00 às 09:00 horas, com o intuito de investigar melhor as cargas matutinas. No dia 11 foram analisadas 5 amostras e no dia 12 foram analisadas 9 amostras.

O amostrador automático permite a utilização de gelox em seu interior para auxiliar na conservação das amostras ao longo das horas de coleta. Nos dias de retirada do equipamento com as amostras, os frascos eram tampados para evitar contaminação durante o trajeto até o laboratório onde elas seriam analisadas.

4.3.2 - Análises em Laboratório

Sabe-se que a CAESB realiza monitoramento diário do nível do Ribeirão Rodeador, mas a frequência dos dados de qualidade é mensal e, para alguns parâmetros, trimestral e até mesmo semestral. Dessa maneira, a seleção dos parâmetros analisados levou em conta o monitoramento realizado pela CAESB, os outputs gerados pelo modelo SWAT, os custos associados às análises de qualidade da água e os recursos disponíveis no Laboratório de Saneamento Ambiental, na Universidade de Brasília.

As análises laboratoriais abrangeram os seguintes compostos: nitrogênio na forma de nitrato (N-NO₃) e nitrito (N-NO₂), nitrogênio amoniacal (N-NH₃), fósforo total (P) e fósforo reativo, na forma de ortofosfato (PO₄³⁻), além de demanda química de oxigênio (DQO). Os métodos de cada parâmetro, baseados no *Standard Methods* (APHA, 2012) são expostos na Tabela 4.6.

Devido ao atraso na entrega de reagentes, conforme mencionado anteriormente, não foi possível realizar a análise de nitrogênio total. Apesar de não ter sido realizada a análise de nitrogênio total, é usual utilizar as análises de nitrato, nitrito e nitrogênio amoniacal para calcular o total de nitrogênio inorgânico. A análise de *E. coli* e coliformes totais só foi possível em uma amostra que, dessa forma, não foi computada.

Tabela 4.6 - Parâmetros e métodos utilizados na análise em laboratório.

| Parâmetro | Método | Identificação |
|-----------------------------|-------------------------------|----------------------|
| Nitrato | Redução com Cádmio | 8171 |
| Nitrito | Diazotização | 8507 |
| Nitrogênio Amoniacal | Nessler | 8038 |
| Fósforo Reativo | Ácido Ascórbico | 8048 |
| Fósforo Total | Digestão com Ácido Persulfato | 8190 |
| Demanda Química de Oxigênio | Colorimétrico | 8000 |

4.4 - MODELAGEM DA BACIA DO RIBEIRÃO RODEADOR

As etapas da modelagem incluem a aquisição e preparação de dados, a entrada desses dados no modelo, a execução, calibração e verificação do modelo. A simulação inicial foi feita em passo mensal de 2000 a 2011, com os anos de 1997-1999 para aquecimento. Esse mesmo período foi utilizado para a calibração dos parâmetros. Nessas simulações foram observadas as variáveis vazão (m³/s), nitrogênio total (kg/mês) e fósforo total (kg/mês). A verificação foi realizada para dois períodos, de 2012 a 2017 e de 2015 a 2017.

A simulação diária foi realizada para as variáveis vazão (m³/s), nitrogênio total (kg/dia), nitrato (kg/dia), nitrito (kg/dia), nitrogênio amoniacal (kg/dia) e fósforo total (kg/dia) do dia 1º de julho de 2017 ao dia 28 de fevereiro de 2018. Foram usados dados gerados no monitoramento semanal para a comparação com as simulações diárias.

No que se refere aos dados cartográficos, o Modelo Digital de Elevação (DEM) contém as informações necessárias para a definição da bacia e da rede de drenagem, divisão da bacia em sub-bacias, e geração do mapa de declividade. A extensão *Spatial Analyst* do ArcGIS

define a declividade, a direção do fluxo de drenagem, a rede de drenagem, a definição dos limites da bacia, as sub-bacias e seus exutórios.

A etapa seguinte é a definição das Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) em cada uma das sub-bacias definidas para a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador. As HRUs foram geradas a partir da sobreposição dos mapas de declividade, tipos de solo e uso e cobertura do solo. Se o total de HRUs for muito alto, podem ser definidos limites com combinações dominantes de declividade, tipos e uso do solo para diminuir a quantidade de unidades.

Após a definição das HRUs, foi realizada a inserção de dados climáticos, tais como precipitação diária, temperaturas máxima e mínima, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento. Esses dados podem ser simulados pelo programa ou carregados de estações meteorológicas e pluviométricas. No presente trabalho, foram coletados dados da estação climática de Brasília, além de dados de estações pluviométricas que cobrissem a área e o entorno da bacia.

Por fim, foi possível adicionar ou editar dados no banco de dados do SWAT para inserir características específicas da área de estudo em relação a tipos de solo, uso e cobertura do solo, fertilizantes, preparação e manejo do solo, áreas urbanas, entre outros. No presente trabalho foi utilizada uma base de dados preparada por Ferrigo (2014) que já continha características específicas para a BHLA, e conseqüentemente adaptadas à BHRR por ser uma bacia afluente ao lago e na mesma região.

Além disso, foram adicionadas as operações manejo auto irrigação e autofertilização, essa última com fertilizantes para hortaliças e pomar, previamente usadas por Silva (2016), e a operação de extração superficial de água no curso principal do ribeirão Rodeador que foi redirecionada para uso de irrigação nos usos do solo de pomar e hortaliça em todas as bacias do projeto. Essas operações são descritas no Apêndice A.

O primeiro passo do processo de calibração e validação no SWAT é a determinação dos parâmetros mais sensíveis para a bacia hidrográfica, determinados segundo a opinião de especialistas ou a análise de sensibilidade (Arnold *et al.*, 2012).

É aconselhável que a calibração se inicie pela vazão, seguida pelo aporte de sedimentos e a qualidade de água. Na falta de disponibilidade de dados de sedimentos, o presente trabalho se propôs a calibrar vazão, carga de nitrogênio total e carga de fósforo total. Os valores obtidos em cada etapa da calibração são mantidos nas etapas seguintes (Chapra, 2005).

A análise de sensibilidade e a calibração automática foram realizadas com o *software* SWAT-CUP (SWAT *Calibration and Uncertainty Programs*). O programa permite escolher o algoritmo que será utilizado para todas as etapas da calibração. Assim, foi escolhido o *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI-2) devido à sua ampla utilização em trabalhos realizados na região e consolidação do método para as bacias do DF.

Foram selecionados parâmetros para calibrar a vazão com base em estudos sobre a influência no escoamento superficial e no fluxo de base (Arnold *et al.*, 2012; Pechlivanidis *et al.*, 2011) e em trabalhos realizados na região (Ferrigo, 2014; Nunes, 2016).

Após a seleção dos parâmetros a serem utilizados, esses foram inseridos no SWAT-CUP com os valores padrão de intervalos de variação sugeridos pelo manual do SWAT e foram realizadas 900 rodadas de simulação para a análise de sensibilidade global e em cada iteração da calibração da vazão. A Tabela 4.7 lista os parâmetros utilizados na calibração da vazão, suas descrições, unidades e intervalos de variação.

Após a análise de sensibilidade dos parâmetros para a simulação de vazão, alguns parâmetros foram calibrados manualmente. Assim, foram retirados da lista de calibração automática os parâmetros GW_REVAP, ESCO e EPCO. Além disso, o parâmetro ALPHA_BF pode ser calculado para a série de dados de vazão usando o programa *BFlow - Baseflow Filter Program*, desenvolvido por Arnold e Allen (1999), e indicado e disponibilizado pelo site do SWAT (*SWAT-Baseflow Filter Program*, 2018).

A análise de sensibilidade para a carga de nitrogênio e fósforo foi executada de maneira análoga, com 900 iterações para sensibilidade global. Os parâmetros a serem calibrados para ajustar as simulações de nitrogênio e fósforo foram selecionados a partir da literatura e de trabalhos previamente realizados na região que contaram com simulação de nutrientes e calibração dos parâmetros (Arnold *et al.*, 2012; Nunes, 2016; Silva, 2016). Na Tabela 4.8 são listados todos os parâmetros ajustáveis para nitrogênio e fósforo, além de suas descrições, unidades e intervalos de variação.

Tabela 4.7 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade da vazão. (Ferrigo, 2014).
(continua)

| Parâmetro | Descrição/Função | Unidade | Intervalo possível de variação | |
|-----------|---|---------|--------------------------------|------|
| | | | Mín | Máx |
| CN2 | Curva número na condição II. Parâmetro importante no cálculo do escoamento superficial quando utilizado o método SCS <i>Curve Number</i> para seu cálculo. O CN é um número adimensional e é obtido em função da permeabilidade, do tipo de solo, do uso e da condição antecedente de umidade no solo. | adim | 35 | 98 |
| ALPHA_BF | Constante de recessão do fluxo de base: é um indicador direto da resposta do fluxo subterrâneo para as mudanças na recarga. Quanto maior o valor desse parâmetro maior será a recarga do aquífero e menor o fluxo de base. | adim | 0,0 | 1,0 |
| GW_DELAY | Intervalo de tempo para a recarga do aquífero. Esse parâmetro é importante no cálculo da recarga do aquífero e é dependente da formação geológica. O GW_DELAY é inversamente proporcional a recarga. | dias | 0,0 | 500 |
| GWQMN | Profundidade limite de água no aquífero raso necessária para o fluxo de retorno ocorrer. Quanto maior o valor desse parâmetro uma porção maior do fluxo de base é retardada. Ou seja, para valores baixos desse parâmetro é produzido mais fluxo de base e um alto fluxo fluvial. O fluxo das águas subterrâneas para o canal é permitido somente se a profundidade da água no aquífero raso for igual ou maior do que o GWQMN. | mm | 0,0 | 5000 |
| GWHT | Altura inicial de água subterrânea. O escoamento estacionário da água subterrânea e a altura do leito de água são linearmente proporcionais, portanto as equações usadas para calcular mudanças na altura de água subterrânea a partir de mudanças no escoamento são incluídas no SWAT. | m | 0,0 | 25 |
| GW_REVAP | Coefficiente de ascensão da água à zona não saturada. Constante de proporcionalidade para o cálculo da quantidade máxima de água que se move no solo em resposta à falta de água. | adim | 0,02 | 0,2 |
| RCHRG_DP | Fração de percolação da água no aquífero profundo. Fração da percolação na zona de raiz que recarrega o aquífero profundo. | adim | 0,0 | 1,0 |

Tabela 4.7 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade da vazão. (Ferrigo, 2014).
(conclusão)

| Parâmetro | Descrição/Função | Unidade | Intervalo possível de variação | |
|------------|---|--|--------------------------------|------|
| | | | Mín | Máx |
| REVAPMN | Profundidade limite da água no solo para a ocorrência da ascensão da água à zona não saturada. É utilizado no cálculo da estimativa da quantidade máxima de água que será removida do aquífero num dado dia. Ou seja, o movimento da água do aquífero raso para a zona insaturada é permitido somente se o volume de água no aquífero raso for igual ou maior do que o REVAPMN. | mm | 0,0 | 500 |
| SHALLST | Profundidade inicial no aquífero raso. | mm | 0,0 | 5000 |
| DEEPST | Profundidade inicial no aquífero profundo | mm | 0,0 | 5000 |
| ESCO | Fator de compensação de evaporação do solo. Representa um percentual aplicado à evaporação da camada superior do solo, de modo que percentuais elevados significam maior evaporação na camada superior do solo. | adim | 0,0 | 1,0 |
| EPCO | Fator de compensação de evaporação da vegetação. A quantidade de retirada de água é função da quantidade de água necessária à planta para a transpiração, Et, e a quantidade de água disponível no solo, SW. | adim | 0,0 | 1,0 |
| SOL_AWC | Capacidade de água disponível no solo: Esse parâmetro é importante no processo de movimentação da água no solo e é utilizado para calcular o conteúdo de água no solo disponível para a vegetação. É dado pela diferença entre a capacidade de campo e o ponto de murcha. | adim | 0,0 | 1,0 |
| SOL_K | Condutividade hidráulica saturada do solo: É um parâmetro influente no processo de movimentação da água no solo e é necessário para calcular o tempo de percolação da água numa dada camada do solo. O fluxo de base aumenta quando esse parâmetro está entre baixo e médio, e diminui quando o parâmetro está entre médio e alto. | mm/h | 0,0 | 2000 |
| SOL_BD | Densidade aparente do solo: A densidade do solo expressa a relação entre a massa das partículas sólidas e o volume total do solo. A densidade do solo é inversamente relacionada a porosidade do mesmo solo, ou seja, maior porosidade quanto menor o valor da densidade do solo. | mg/m ³ ou g/m ³ | 0,9 | 2,5 |
| ANION_EXCL | Fração de porosidade (espaços vazios). | adim | 0,01 | 1,0 |

Tabela 4.8 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade da carga de nutrientes.
(Arnold, 2012; Nunes, 2016; Silva, 2016, modificado).

(continua)

| Parâmetro | Descrição/Função | Unidade | Intervalo possível de variação | |
|-------------|---|--------------------|--------------------------------|-------|
| | | | Mín | Máx |
| ADJ_PKR.bsn | Fator de ajuste de taxa de pico para o direcionamento de sedimentos na sub-bacia. | adim | 0,5 | 2,0 |
| RCN.bsn | Concentração de nitrogênio na chuva. | mg N/L | 0,0 | 15 |
| CMN.bsn | Taxa de mineralização do húmus para nutrientes orgânicos ativos. | adim | 0,001 | 0,003 |
| CDN.bsn | Coefficiente da taxa exponencial de desnitrificação. | adim | 0,0 | 3,0 |
| SDNCO.bsn | Limite de quantidade de água na desnitrificação. | adim | 0,0 | 1,0 |
| N_UPDIS.bsn | Parâmetro de distribuição do nitrogênio. | % | 0,0 | 100 |
| P_UPDIS.bsn | Parâmetro de distribuição do fósforo. | % | 0,0 | 100 |
| NPERCO.bsn | Coefficiente de percolação do nitrato. | adim | 0,0 | 1,0 |
| PPERCO.bsn | Coefficiente de percolação do fósforo. | adim | 10,0 | 17,5 |
| PHOSKD.bsn | Coefficiente de particionamento do fósforo no solo. | m ³ /Mg | 100 | 200 |
| PSP.bsn | Índice de disponibilidade do fósforo. | adim | 0,01 | 0,7 |
| RSDCO.bsn | Coefficiente de decomposição do resíduo. | adim | 0,02 | 0,1 |
| SPEXP.bsn | Parâmetro exponencial para o cálculo de sedimentos reconduzidos ao canal. | adim | 1,0 | 1,5 |
| SPCON.bsn | Parâmetro linear para o cálculo da quantidade máxima de sedimento que pode ser contido durante o roteamento de sedimentos no canal. | adim | 0,0001 | 0,01 |
| FIXCO.bsn | Coefficiente de fixação do nitrogênio. | adim | 0,0 | 1,0 |
| NFIXMX.bsn | Fixação diária máxima de nitrogênio. | kg/ha | 1,0 | 20 |

Tabela 4.8 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade da carga de nutrientes.
(Arnold, 2012; Nunes, 2016; Silva, 2016, modificado).

(continuação)

| Parâmetro | Descrição/Função | Unidade | Intervalo possível de variação | |
|-------------------|---|---------------|--------------------------------|------|
| | | | Mín | Máx |
| CH_ONCO_BSN.bsn | Concentração de nitrogênio orgânico no canal da bacia. | ppm | 0,0 | 100 |
| CH_OPCO_BSN.bsn | Concentração de fósforo orgânico no canal da bacia. | adim | 0,0 | 100 |
| HLIFE_NGW_BSN.bsn | Meia-vida do nitrogênio na água subterrânea. | dias | 0,0 | 500 |
| SHALLST_N.gw | Concentração inicial de nitrato no aquífero raso. | mg N/L ou ppm | 0,0 | 1000 |
| HLIFE_NGW.gw | Meia-vida do nitrato no aquífero raso. | dias | 0,0 | 200 |
| GWSOLP.gw | Concentração de fósforo solúvel na contribuição da água subterrânea para o escoamento superficial da sub-bacia. | mg P/L ou ppm | 0,0 | 1000 |
| LAT_ORGN.gw | Nitrogênio orgânico no escoamento de base. | mg/L | 0,0 | 200 |
| LAT_ORGP.gw | Fósforo orgânico no escoamento de base. | mg/L | 0,0 | 200 |
| LAT_SED.hru | Concentração de sedimentos nos fluxos lateral e subterrâneo. | mg/L | 0,0 | 5000 |
| ERORGN.hru | Fator de enriquecimento do nitrogênio orgânico na carga de sedimento. | adim | 0,0 | 5,0 |
| ERORGP.hru | Fator de enriquecimento do fósforo na carga com sedimento. | adim | 0,0 | 5,0 |
| USLE_P.mgt | Fator de práticas conservacionistas da USLE. | adim | 0,0 | 1,0 |
| BIOMIX.mgt | Eficiência da mistura biológica. | adim | 0,0 | 1,0 |
| CH_ONCO.rte | Concentração de nitrogênio orgânico no canal. | ppm | 0,0 | 100 |
| CH_OPCO.rte | Concentração de fósforo orgânico no canal. | ppm | 0,0 | 100 |
| CH_COV1.rte | Fator de erodibilidade do canal. | adim | -0,05 | 0,6 |
| CH_COV2.rte | Fator de cobertura do canal. | adim | -0,001 | 1,0 |
| AI1.wwq | Fração de nitrogênio na biomassa algal. | mg N/mg alga | 0,07 | 0,09 |
| AI2.wwq | Fração de fósforo na biomassa algal. | mg P/mg alga | 0,01 | 0,02 |

Tabela 4.8 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade da carga de nutrientes.
(Arnold, 2012; Nunes, 2016; Silva, 2016, modificado).

(conclusão)

| Parâmetro | Descrição/Função | Unidade | Intervalo possível de variação | |
|-----------|---|---|--------------------------------|------|
| | | | Mín | Máx |
| RS2.swq | Taxa de fonte bentônica de fósforo dissolvido no canal a 20°C. | mg P/ (m ² /dia) | 0,001 | 0,1 |
| RS3.swq | Taxa de fonte bentônica de NH ₄ -N no canal a 20°C. | mg NH ₄ - N/(m ² .dia) | 0,0 | 1,0 |
| RS4.swq | Taxa de nitrogênio orgânico que sedimenta no canal a 20°C. | dia ⁻¹ | 0,001 | 0,1 |
| RS5.swq | Taxa de fósforo orgânico que sedimenta no canal a 20°C. | dia ⁻¹ | 0,001 | 0,1 |
| BC1.swq | Constante de oxidação biológica de NH ₄ a NO ₂ no canal a 20°C. | dia ⁻¹ | 0,1 | 1,0 |
| BC2.swq | Constante de oxidação biológica de NO ₂ a NO ₃ no canal a 20°C. | dia ⁻¹ | 0,2 | 2,0 |
| BC3.swq | Constante de hidrólise de N orgânico a NH ₄ no canal a 20°C. | dia ⁻¹ | 0,2 | 0,4 |
| BC4.swq | Constante de mineralização de fósforo orgânico a fósforo dissolvido no canal a 20°C. | dia ⁻¹ | 0,01 | 0,70 |

A avaliação do desempenho das simulações de vazão, carga de nitrogênio e carga de fósforo serão realizadas com as variáveis estatísticas sugeridas por Moriasi *et al.* (2007): o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), Equação 4.1, o desvio padrão das observações (RSR), Equação 4.2, e o percentual de tendência (PBIAS), Equação 4.3, e o R² (Equação 4.4). Nessas equações Y^{obs} é a variável observada, Y^{sim} é o valor simulado, $\overline{Y^{obs}}$ é a média dos valores observados e $\overline{Y^{sim}}$ é a média dos valores simulados.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \overline{Y^{obs}})^2} \right] \quad (\text{Equação 4.1})$$

$$RSR = \left[\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \overline{Y^{obs}})^2}} \right] \quad (\text{Equação 4.2})$$

$$\text{PBIAS} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}} - Y_i^{\text{sim}}) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}})} \right] \quad (\text{Equação 4.3})$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n [(Y_i^{\text{obs}} - \bar{Y}^{\text{obs}})(Y_i^{\text{sim}} - \bar{Y}^{\text{sim}})]^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}} - \bar{Y}^{\text{obs}})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{sim}} - \bar{Y}^{\text{sim}})^2} \right] \quad (\text{Equação 4.4})$$

A calibração realizada para simulações mensais será avaliada quanto ao desempenho segundo os intervalos expostos na Tabela 4.9, propostos por Moriasi *et al.* (2007). Os autores também descrevem o uso de R^2 , para o qual são consideradas satisfatórias simulações com valores superiores a 0,5.

Tabela 4.9 - Critérios de desempenho do modelo. (Moriasi *et al.*, 2007).

| Performance | RSR | NSE | PBIAS | |
|----------------|----------------------------------|-------------------------------|--|--|
| | | | Vazão | N e P |
| Muito boa | $0,00 \leq \text{RSR} \leq 0,50$ | $0,75 < \text{NSE} \leq 1,00$ | $\text{PBIAS} < \pm 10$ | $\text{PBIAS} < \pm 25$ |
| Boa | $0,50 < \text{RSR} \leq 0,60$ | $0,65 < \text{NSE} \leq 0,75$ | $\pm 10 \leq \text{PBIAS} \leq \pm 15$ | $\pm 25 \leq \text{PBIAS} \leq \pm 40$ |
| Satisfatória | $0,60 < \text{RSR} \leq 0,70$ | $0,50 < \text{NSE} \leq 0,65$ | $\pm 15 \leq \text{PBIAS} \leq \pm 25$ | $\pm 40 \leq \text{PBIAS} \leq \pm 70$ |
| Insatisfatória | $\text{RSR} > 0,70$ | $\text{NSE} \leq 0,50$ | $\text{PBIAS} \geq \pm 25$ | $\text{PBIAS} \geq \pm 70$ |

4.5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

A calibração e a verificação do modelo, citados no item anterior, foram realizadas com dados da CAESB. A calibração dos parâmetros para a simulação mensal foi realizada com dados de 2000 a 2011. A verificação das simulações mensais foi realizada para dois períodos, 2012 a 2017 e 2015 a 2017.

Os dados de qualidade da água gerados durante o monitoramento em campo do presente trabalho foram utilizados para a comparação com a simulação diária do modelo para o período de julho de 2017 a fevereiro de 2018.

Além dessas análises, os dados horários, semanais, quinzenais e mensais gerados pelo monitoramento do presente trabalho foram analisados entre si, para a geração de curvas de tendência para cada tipo de dado e comparação da representatividade dos dados em diferentes escalas temporais.

Esses dados também foram utilizados para comparar os resultados do monitoramento semanal com o monitoramento mensal realizado pela CAESB. Foi possível comparar os parâmetros fósforo total, oxigênio dissolvido, temperatura, pH, nitrato, nitrogênio amoniacal, turbidez e condutividade. O nitrogênio total analisado pela CAESB foi comparado ao valor de nitrogênio inorgânico total, pois o presente trabalho não gerou dados de nitrogênio total.

Os resultados foram apresentados em forma de tabelas, gráficos, figuras, ou espacializados em mapas, fornecendo melhor compreensão e visualização.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados do trabalho e a discussão de acordo com a literatura específica atual. Assim, são expostas a análise do monitoramento da qualidade da água e a avaliação das simulações geradas pela modelagem hidrológica e das cargas de nutrientes na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador.

5.1 - MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA

O monitoramento da qualidade da água realizado para o presente trabalho teve início no dia 18 de julho de 2017 e foi encerrado no dia 12 de fevereiro de 2018. As coletas foram feitas em frequência semanal, em visitas de campo específicas para esse fim. A amostragem contínua, feita com amostrador automático a intervalos de 30 min, foi realizada nos meses de setembro de 2017, e janeiro e fevereiro de 2018. Além disso, em setembro e novembro de 2017, e em janeiro e fevereiro de 2018 foi monitorado um ponto mais a montante do ponto de monitoramento do Ribeirão Rodeador.

5.1.1 - Análise Inicial

O principal resultado gerado pelo monitoramento intensivo foram os valores semanais dos parâmetros analisados. A Tabela 5.1 mostra os valores de média, máxima, mínima e desvio padrão para cada um dos parâmetros analisados.

O nitrogênio inorgânico total, o nitrato e o fósforo total apresentam uma variação considerável em ordem de grandeza, indo de 10^{-2} a 10^{-1} , sendo que nitrogênio e nitrato chegam a valores próximos de 10^0 . Os parâmetros com valores mais baixos são o fósforo reativo, com ordem de grandeza de 10^{-2} , e o nitrito, com ordem de grandeza de 10^{-3} .

Turbidez e demanda química de oxigênio são os parâmetros que apresentam as maiores diferenças entre máximas e mínimas, característica que reflete em desvios padrão mais altos. No caso da turbidez essa variação ocorre porque no período seco o ribeirão fica com a água mais transparente, enquanto que no período chuvoso ocorre carreamento de sólidos para o ribeirão, deixando a água bastante turva.

Tabela 5.1 - Parâmetros analisados no monitoramento da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador.

| Parâmetro | Média | Máxima | Mínima | Desvio Padrão |
|-----------------------------|--------------|---------------|---------------|----------------------|
| Nitrogênio Inorgânico Total | 0,3595 | 0,7297 | 0,042 | 0,1601 |
| Nitrato | 0,257 | 0,70 | 0,010 | 0,1761 |
| Nitrito | 0,0028 | 0,0080 | 0,0 | 0,0015 |
| Nitrogênio Amoniacal | 0,100 | 0,248 | 0,0 | 0,0744 |
| Fósforo Reativo | 0,0091 | 0,046 | 0,0 | 0,0090 |
| Fósforo Total | 0,0597 | 0,2140 | 0,018 | 0,0407 |
| Demanda Química de Oxigênio | 5,8554 | 18,60 | 0,0 | 4,8487 |
| Oxigênio Dissolvido | 6,9735 | 7,810 | 6,020 | 0,4286 |
| Condutividade | 11 | 14 | 9 | 1,4409 |
| Turbidez | 6,2788 | 30,20 | 0,10 | 7,5062 |
| pH | 6,5945 | 7,68 | 6,10 | 0,3368 |
| Temperatura | 20,0883 | 22,31 | 15,81 | 1,8115 |

A presença de compostos nitrogenados em corpos hídricos se dá principalmente pela dissolução destes na água que escoam pelos solos em direção a rios e lagos. O nitrogênio está presente no solo devido a ação de bactérias nitrificantes que fixam o nitrogênio da atmosfera e devido a adição de fertilizantes nitrogenados.

Apesar da relação da poluição não pontual com a presença de compostos nitrogenados em corpos hídricos, a variação da concentração de nitrato e nitrito não acompanha o aumento da vazão, como verificado na Figura 5.1. Na realidade os valores desses parâmetros diminuíram em novembro, oscilaram em dezembro, e diminuíram novamente em janeiro e fevereiro. Principalmente o nitrato, que apresentou os valores mais baixos em dias de ocorrência de chuva. Passig *et al.* (2015) observaram que no período chuvoso alguns parâmetros indicam uma melhora na qualidade do corpo d'água devido a diluição causada pelo aumento da vazão.

No caso do nitrogênio amoniacal, variação foi mais oscilatória durante os meses de agosto e setembro, e apresentaram valores mais plausíveis a partir de outubro. A concentração de

nitrogênio amoniacal aumentou levemente após as primeiras chuvas, em novembro, e só voltou a diminuir consideravelmente em fevereiro de 2018. Os valores foram mais altos quando nitrato e nitrito estavam mais reduzidos. Supõe-se que as chuvas tenham lavado o solo no qual pode haver ocorrido acúmulo de resíduos de humanos e animais que contenham amônia.

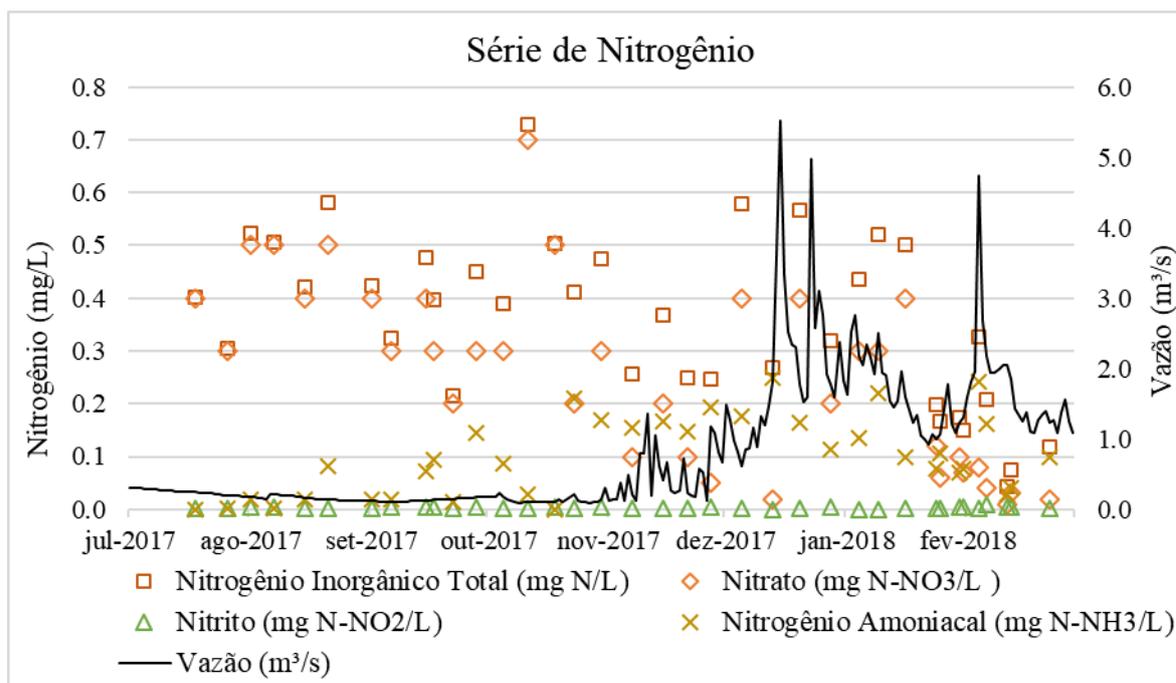


Figura 5.1 - Hidrograma e Série de Nitrogênio no exutório da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador de julho de 2017 a fevereiro de 2018. (Elaborado com dados de vazão da CAESB, 2018).

Algumas variáveis de qualidade da água apresentam forte relação com a vazão do rio. A concentração delas cresce com o aumento da vazão, e decresce mais lentamente ao diminuir a vazão. Isso é verificado nas variáveis sólidos suspensos, turbidez, fósforo, entre outros relacionados ao sedimento (Lima, 2004).

Na Figura 5.2 é possível observar que, apesar de pouco expressivo, houve um aumento nos valores de fósforo total e fósforo reativo a partir de novembro e novamente em fevereiro, quando houve ocorrências de chuvas, que podem ter carregado compostos fosfatados ao ribeirão Rodeador. No entanto, as altas vazões de dezembro e janeiro, causadas por fortes chuvas, parecem não estar associados a um aumento significativo da concentração de fósforo no ribeirão.

Ao contrário do observado no período chuvoso, parece incomum ter valores tão altos de Fósforo Total em julho e agosto, quando foram registradas vazões tão baixas. Nesse caso, pode ser levantada a hipótese de contaminação das amostras, principalmente porque nas primeiras análises ainda não havia prática e domínio dos métodos. Além disso, com exceção dos dois primeiros registros que são realmente discrepantes, as concentrações observadas em agosto podem estar relacionadas a despejos pontuais provenientes da produção agropecuária.

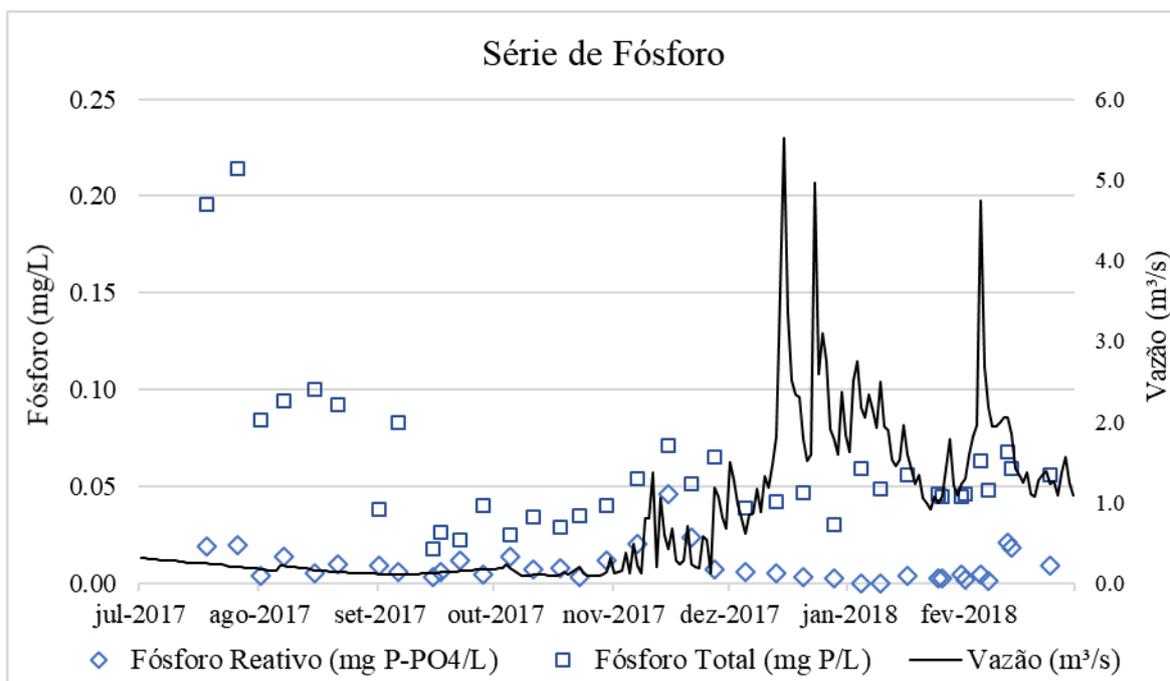


Figura 5.2 - Hidrograma e Série de Fósforo no exutório da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF de julho de 2017 a fevereiro de 2018. (Elaborado com dados de vazão da CAESB, 2018).

Como dito anteriormente, a Turbidez é um parâmetro associado ao carreamento de sedimentos pela chuva, consequentemente deve aumentar na ocorrência de vazões mais altas. Percebe-se, na análise da Figura 5.3, que esse é o comportamento dos valores de Turbidez no ribeirão Rodeador.

Posteriormente às primeiras chuvas, em novembro, houve um pequeno aumento da Turbidez. Já em dezembro e janeiro esse aumento foi mais significativo, chegando a alcançar valores trinta vezes mais elevados frente ao registrado no período de seca. Após novas chuvas e aumento da vazão em fevereiro, esse fato volta a ser observado.

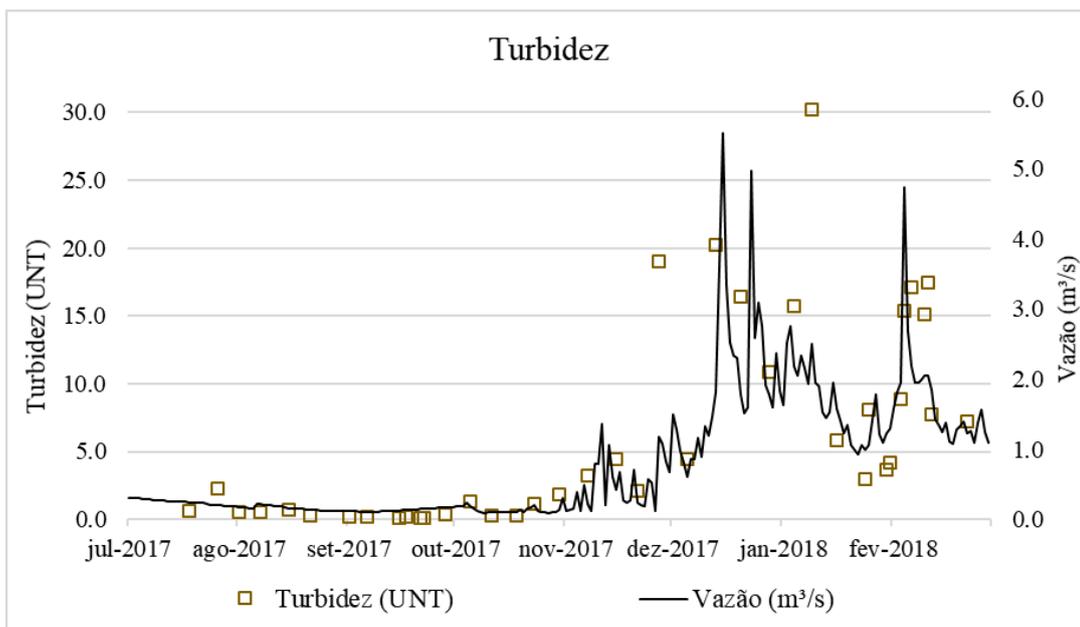


Figura 5.3 – Hidrograma e Turbidez no exutório da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF de julho de 2017 a fevereiro de 2018. (Elaborado com dados de vazão da CAESB, 2018).

Já a Demanda Química de Oxigênio, na Figura 5.4 se mostrou bastante variável ao longo de seis meses, sendo difícil discernir um padrão para esse parâmetro. Decerto que em algumas ocorrências mais altas de vazão, seu valor também aumentou. Porém, esses aumentos também ocorreram nos meses de vazões mínimas, tornando difícil afirmar se existe relação entre os valores da Demanda Química de Oxigênio e o aumento da vazão.

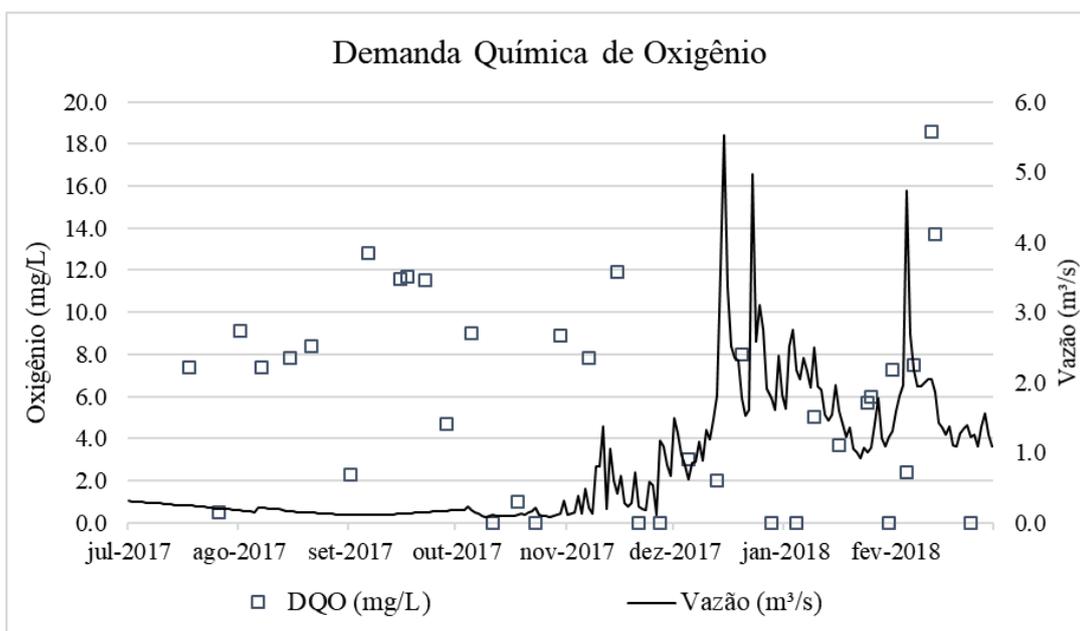


Figura 5.4 - Hidrograma e Demanda Química de Oxigênio no exutório da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF de julho de 2017 a fevereiro de 2018. (Elaborado com dados de vazão da CAESB, 2018).

5.1.2 - Análise da Variação Temporal

As cargas de nitrogênio inorgânico total, fósforo total e demanda química de oxigênio foram calculadas a partir dos valores gerados pela análise das amostras semanais combinados com dados diários de vazão.

Percebe-se, na Figura 5.5, que a frequência semanal de amostragem é raramente acompanhada por amostragens menos frequentes. Apesar da frequência quinzenal poder ser mantida até novembro, a partir desse mês qualquer frequência de amostragem que não a semanal iria subestimar a quantidade de nitrogênio no corpo d'água. Quando a carga de nitrogênio volta a diminuir, as frequências mensal e trimestral passam a superestimá-la.

Esse mesmo comportamento pode ser observado na análise da carga acumulada de nitrogênio total, vista na Figura 5.6. No caso da carga acumulada fica mais evidente que as frequências mensal e trimestral teriam valores mais baixos quando comparados aos valores das frequências semanal e quinzenal de meados de dezembro até meados de fevereiro. Ainda assim a carga acumulada de nitrogênio total não apresenta grandes discrepâncias quando analisada em diferentes frequências de amostragem.

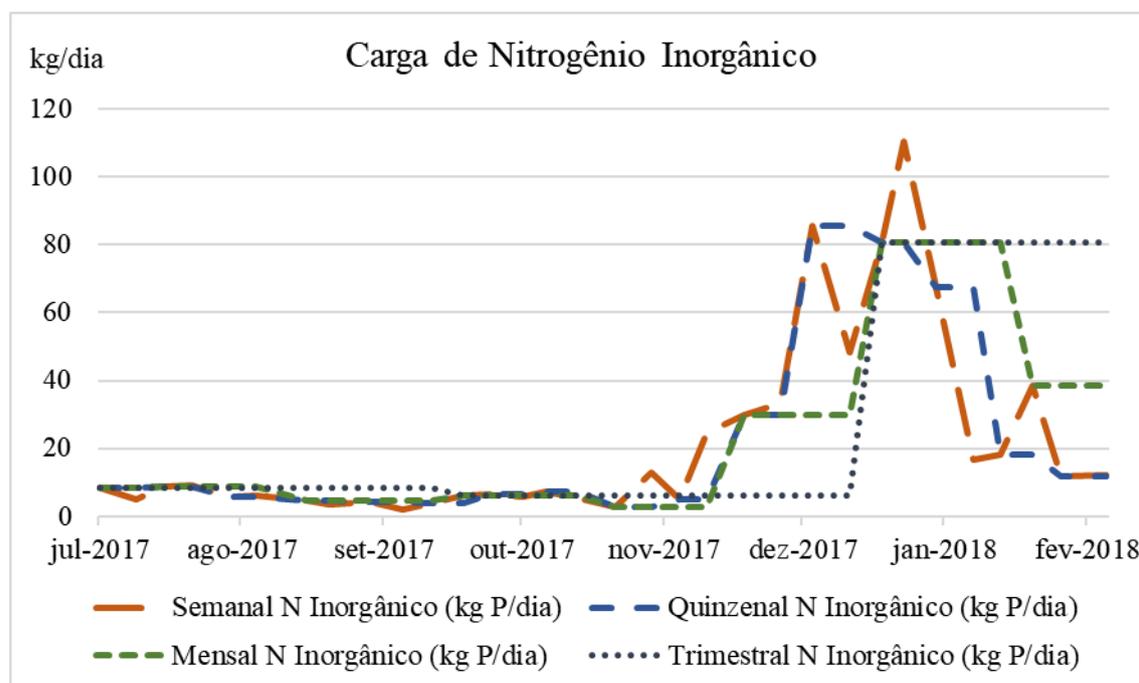


Figura 5.5 - Variação temporal da carga de nitrogênio inorgânico na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF de julho de 2017 a fevereiro de 2018.

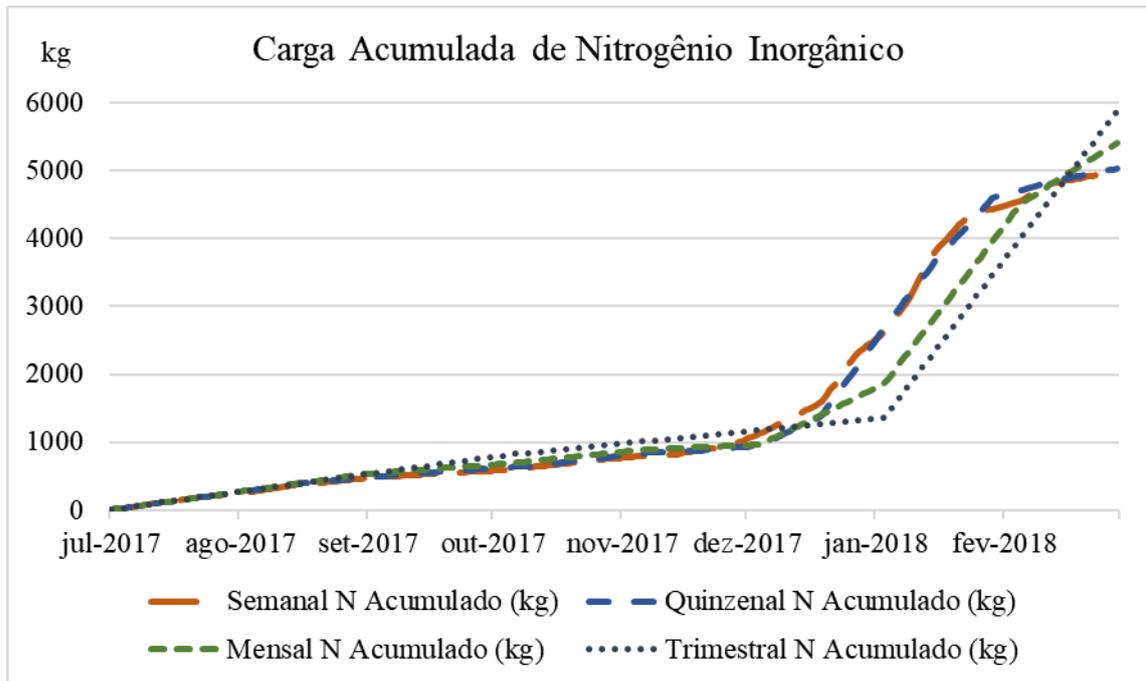


Figura 5.6 - Carga acumulada de nitrogênio inorgânico na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF de julho de 2017 a fevereiro de 2018.

Observando a Figura 5.7, parece que até outubro a frequência mensal é suficiente para averiguar a presença de fósforo no ribeirão Rodeador. Porém, essa frequência não observaria o aumento que a carga de fósforo sofre no início das chuvas, em novembro. Os valores de pico, já em dezembro, são melhor observados.

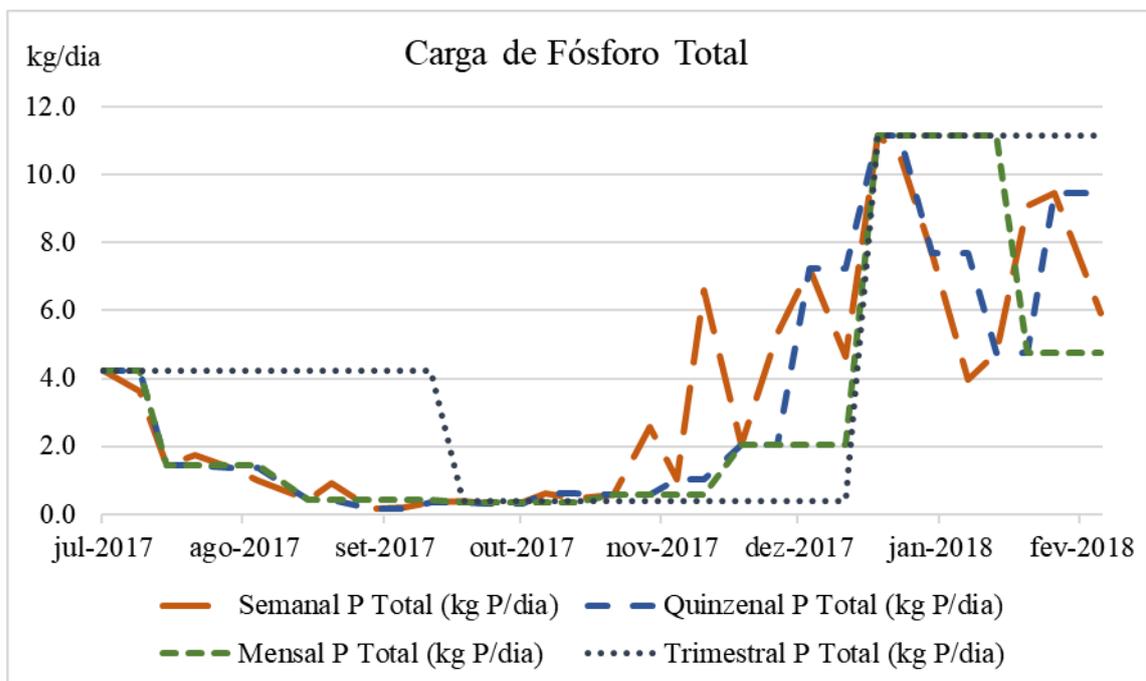


Figura 5.7 - Variação temporal da carga de fósforo total na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF de julho de 2017 a fevereiro de 2018.

Fica evidente na Figura 5.8 que, apesar da frequência trimestral não estar compatível com o observado para as outras frequências amostrais, as amostragens semanal, quinzenal e mensal apresentam cargas acumuladas de fósforo com valores próximos. Dessa maneira, as frequências semanal, quinzenal e mensal poderiam ser consideradas equivalentes e quaisquer poderiam ser utilizadas para o objetivo de averiguar a longo prazo a qualidade do corpo d'água.

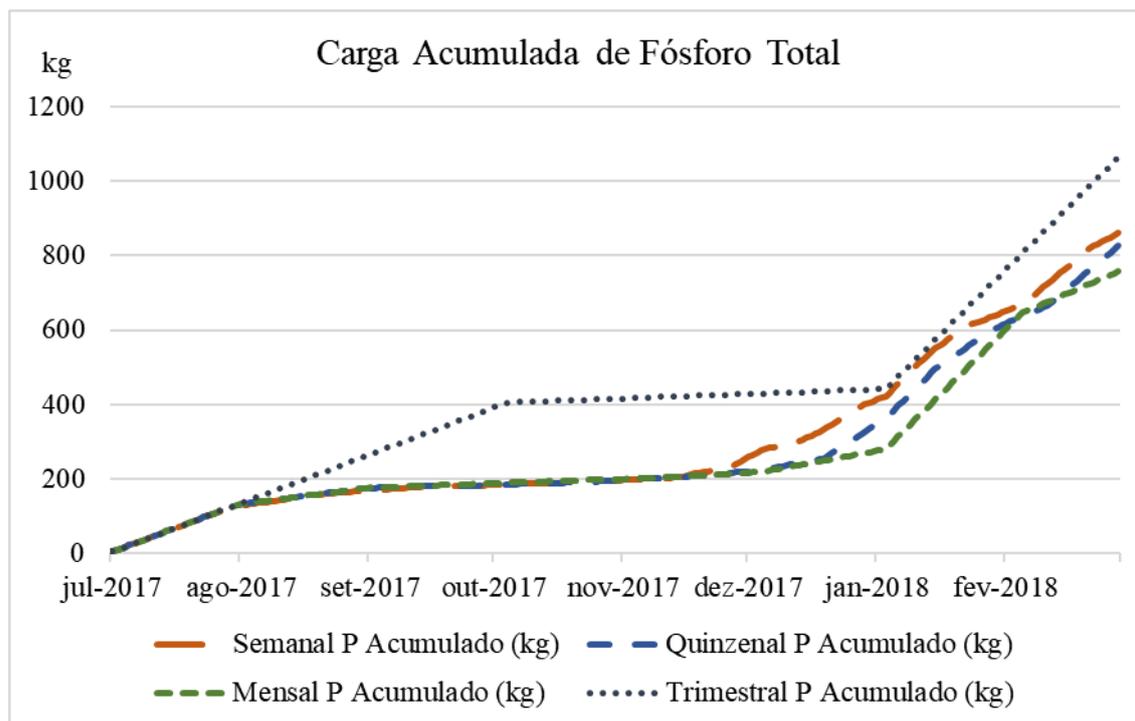


Figura 5.8 - Carga acumulada de fósforo total na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF de julho de 2017 a fevereiro de 2018.

No caso da demanda química de oxigênio, na Figura 5.9, as séries formadas por valores mensais e trimestrais sempre subestimam o valor da amostragem semanal, enquanto que a série quinzenal se adequa melhor àquela.

Observando a carga acumulada de DQO, na Figura 5.10, é possível perceber quão discrepante é a carga acumulada na frequência trimestral quando comparadas à frequência semanal. A frequência mensal já se aproxima um pouco mais do acumulado semanal, mas ainda assim gerando subestimação da carga de DQO no ribeirão Rodeador. A frequência quinzenal tem uma curva mais semelhante, mas por vezes subestima e por vezes superestima a carga acumulada. Por ser um parâmetro que se mostrou bastante variável, seria aconselhável analisá-lo em uma frequência mais adequada a essa variação.

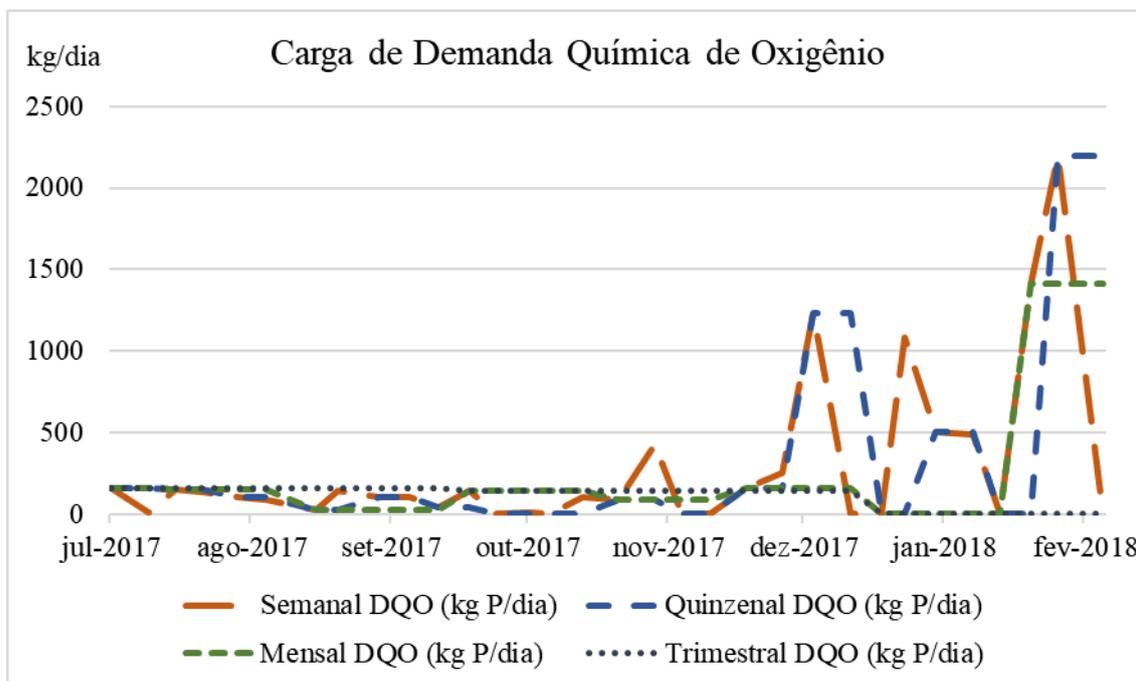


Figura 5.9 - Variação temporal da carga de demanda química de oxigênio na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF de julho de 2017 a fevereiro de 2018.

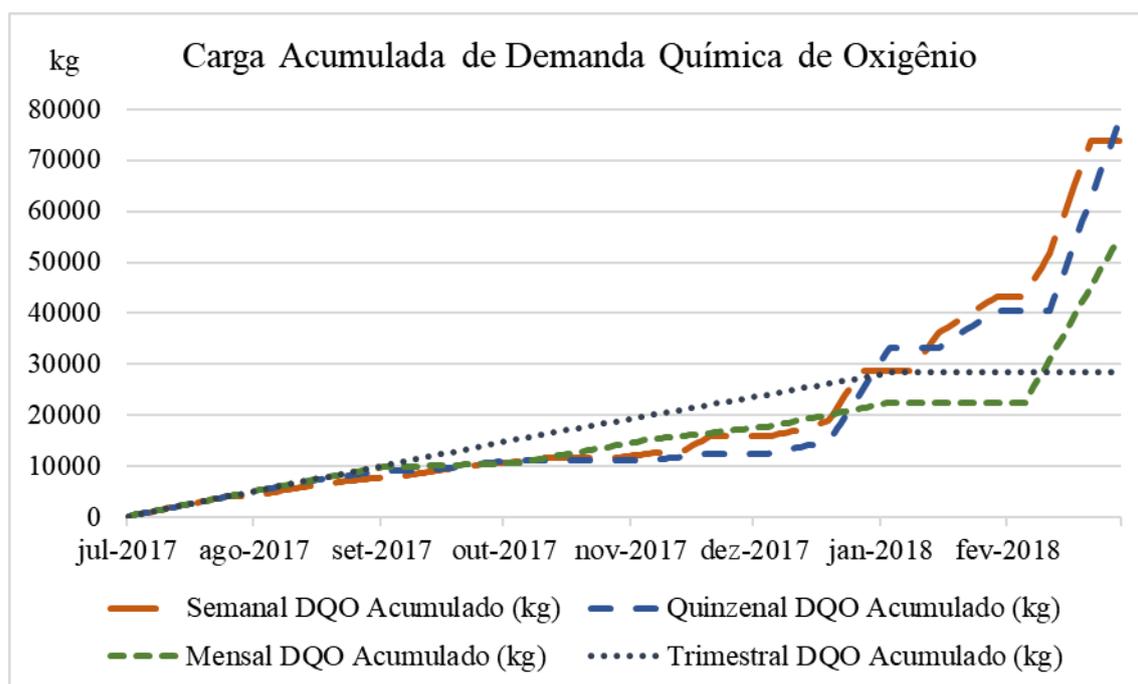


Figura 5.10 - Carga acumulada de demanda química de oxigênio na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF de julho de 2017 a fevereiro de 2018.

Lima (2004) ressalta que não é significativa a influência da frequência de amostragem no período de estiagem quando as frequências quinzenal e mensal são comparadas. Já em períodos de chuva percebe-se a necessidade de uma coleta mais frequente. A autora sugere a adoção de frequência mínima mensal.

No entanto, mesmo que o período de monitoramento do presente trabalho seja curto comparado à série histórica, percebe-se que a frequência escolhida para o monitoramento padrão da qualidade da água no ribeirão Rodeador é insuficiente, principalmente nos meses de chuva.

5.1.3 - Comparação dos dados monitorados com os dados da CAESB

A Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal realiza monitoramento mensal de alguns parâmetros de qualidade da água. Assim, foi possível comparar os registros da CAESB com o monitoramento semanal realizado no presente trabalho para os parâmetros fósforo total, oxigênio dissolvido, temperatura, pH, nitrato, nitrogênio amoniacal, turbidez e condutividade. O nitrogênio total analisado pela CAESB foi comparado ao valor de nitrogênio inorgânico total.

Analisando a Figura 5.11, percebe-se que o nitrogênio total registrado pela CAESB é sempre mais alto que o nitrogênio inorgânico do monitoramento semanal, provavelmente porque a análise de nitrogênio total também identifica frações de nitrogênio orgânico. As análises do presente trabalho se limitaram a parâmetros de nitrogênio inorgânico.

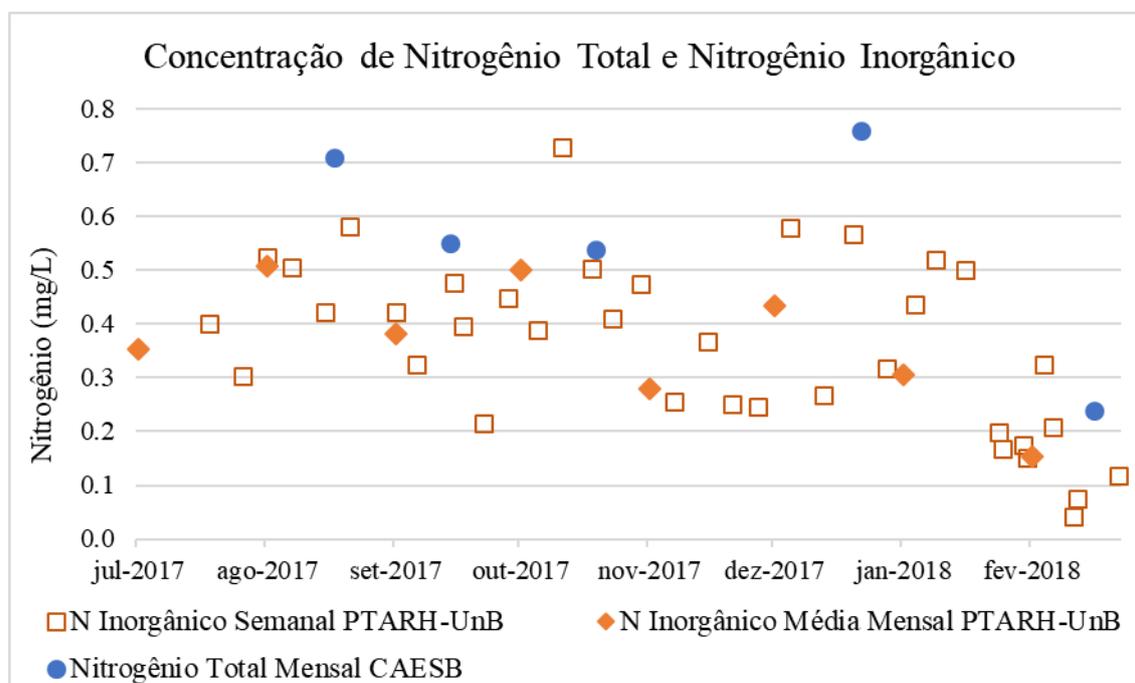


Figura 5.11 - Registros semanais e médias mensais de concentração de nitrogênio inorgânico e nitrogênio total na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF comparados aos registros mensais da CAESB.

Já para a concentração de fósforo total, o monitoramento semanal e as médias mensais estão acima dos valores analisados pela CAESB na maior parte dos casos. As análises mensais do monitoramento padrão podem estar subestimando os valores reais de fósforo no ribeirão Rodeador.

Além disso, não foi realizada coleta em novembro, logo após as chuvas, assim não foi possível comparar o resultado para esse mês. A Figura 5.12 expõe os registros mensais da CAESB e os registros semanais e médias mensais gerados pelo presente trabalho.

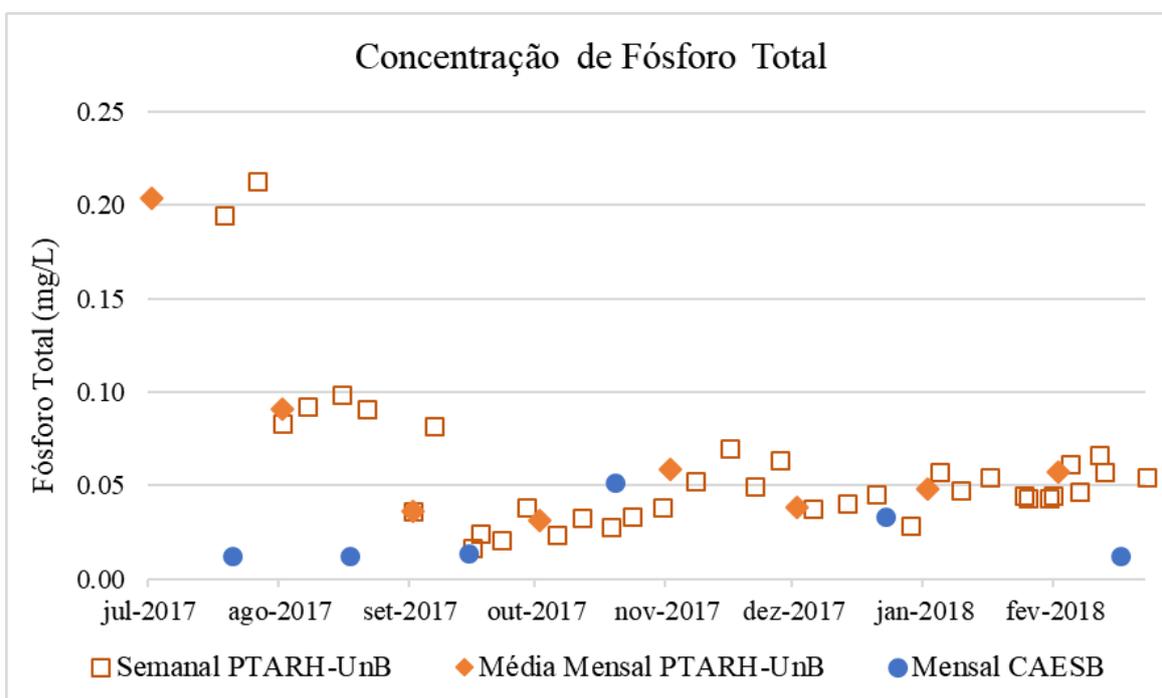


Figura 5.12 - Registros semanais e médias mensais de concentração de fósforo total na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF comparados aos registros mensais da CAESB.

Analisando a Figura 5.13, é possível observar que a concentração de oxigênio dissolvido monitorada mensalmente está praticamente equivalente aos valores semanais do presente trabalho. O mesmo ocorre para pH, para o qual o monitoramento semanal apresenta alguns valores mais altos, mas que estão compatíveis com o monitoramento mensal.

A temperatura, no entanto, é consistentemente mais alta no monitoramento mensal da CAESB quando comparada às medições semanais do presente trabalho. Essa diferença pode ser causada pela diferença nos aparelhos de medição utilizados, que podem ter sido calibrados para condições variadas.

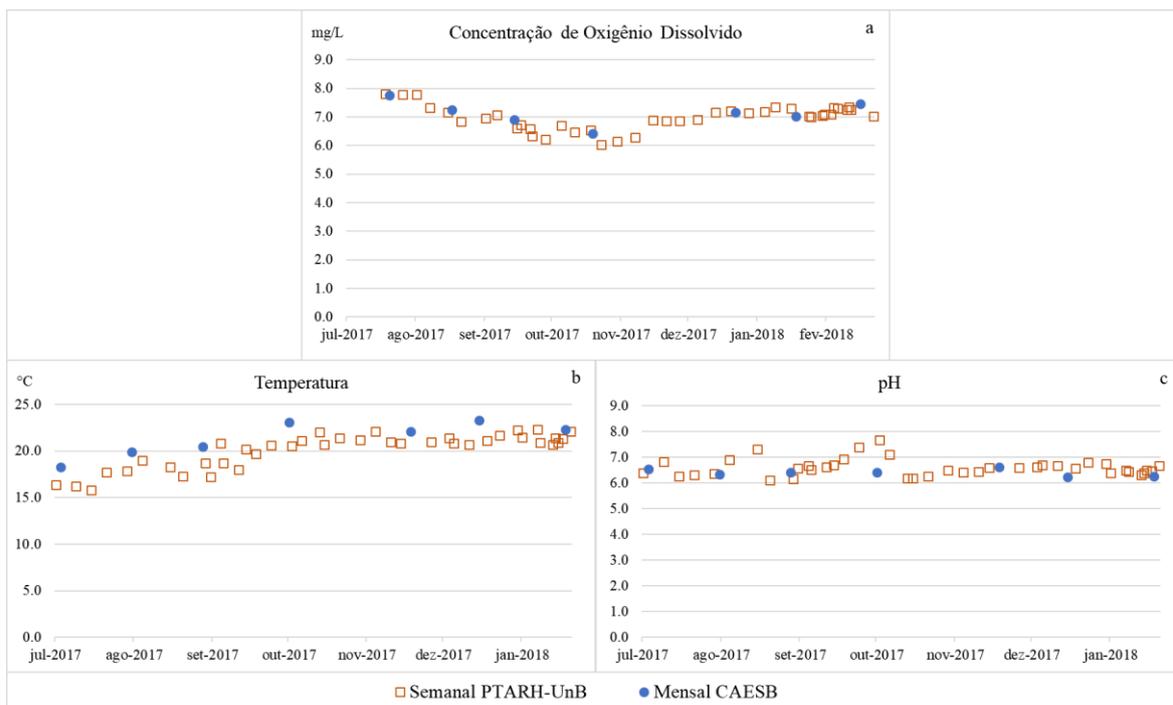


Figura 5.13 - Monitoramento semanal na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF comparado a registros mensais da CAESB. (a) Oxigênio Dissolvido. (b) Temperatura. (c) pH.

Atualmente há alguns parâmetros que são analisados pela CAESB a cada três meses. Na falta da coleta de novembro de 2018, apenas um registro pôde ser comparado ao monitoramento semanal.

Nesse caso, como pode ser visto na Figura 5.14, o valor do registro de nitrato analisado pela CAESB está bastante baixo. Esse valor é cerca da metade do valor registrado pelo monitoramento semanal. Em oposição ao nitrato, o nitrogênio amoniacal apresenta um valor duas a três vezes mais alto que o observado pelo monitoramento semanal para o mesmo mês.

Percebe-se que a turbidez começa a ascender em novembro, após as primeiras chuvas, mas o monitoramento da CAESB registrou esse parâmetro somente em agosto, então não foi possível fazer a comparação justamente nos meses nos quais a turbidez é mais acentuada e variável.

A condutividade apresenta uma variabilidade ao longo dos meses, porém com valores próximos. O valor registrado pela CAESB é um pouco mais alto que o observado nas análises semanais.

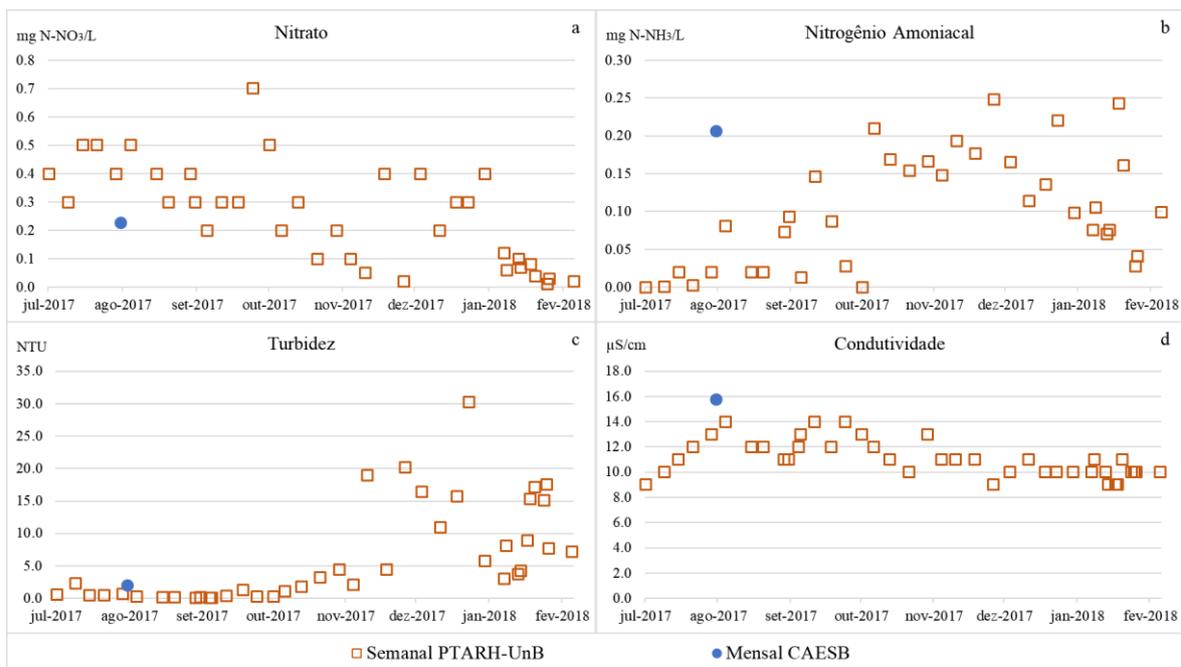


Figura 5.14 - Monitoramento semanal na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF comparado a registros trimestrais da CAESB.

(a) Nitrato. (b) Nitrogênio Amoniacal. (c) Turbidez. (d) Condutividade.

5.1.4 - Amostragem Contínua

A amostragem contínua foi separada em Período Seco e Período Chuvoso. As coletas do Período Seco foram realizadas nos dias 17, 22 e 29 de setembro de 2017, das 20:00 horas do dia anterior às 7:00 do dia de retirada do equipamento. As coletas do Período Chuvoso foram realizadas nos dias 25 e 31 de janeiro, e 06, 11 e 12 de fevereiro de 2018, das 22:00 horas do dia anterior às 9:00 o dia de retirada do equipamento.

5.1.4.1 - Período Seco

A Figura 5.15 mostra os resultados dos três eventos de coleta no período seco quando analisado o fósforo total. No dia 17 de setembro os valores se mantiveram bastante baixos na maior parte da noite, com um aumento ocorrendo somente às 6:30, pela manhã.

O mesmo ocorre no dia 29 de setembro, quando houve registro de cargas um pouco mais altas em dois momentos, às 3:00 e às 7:30, novamente pela manhã. Apesar de resultados de apenas dois dias de coleta não poderem ser conclusivos quanto ao despejo de cargas pontuais no ribeirão Rodeador, a ocorrência das cargas permite justificar investigações mais detalhadas.

No entanto, na semana seguinte, a amostragem contínua mostrou um valor um pouco mais alto à noite, por volta das 21:30, e não foi observada uma carga de fósforo pela manhã. Dessa maneira, seria aconselhável a continuação da amostragem contínua no ribeirão Rodeador para averiguar o que está causando a ocorrência de cargas mais altas de fósforo.

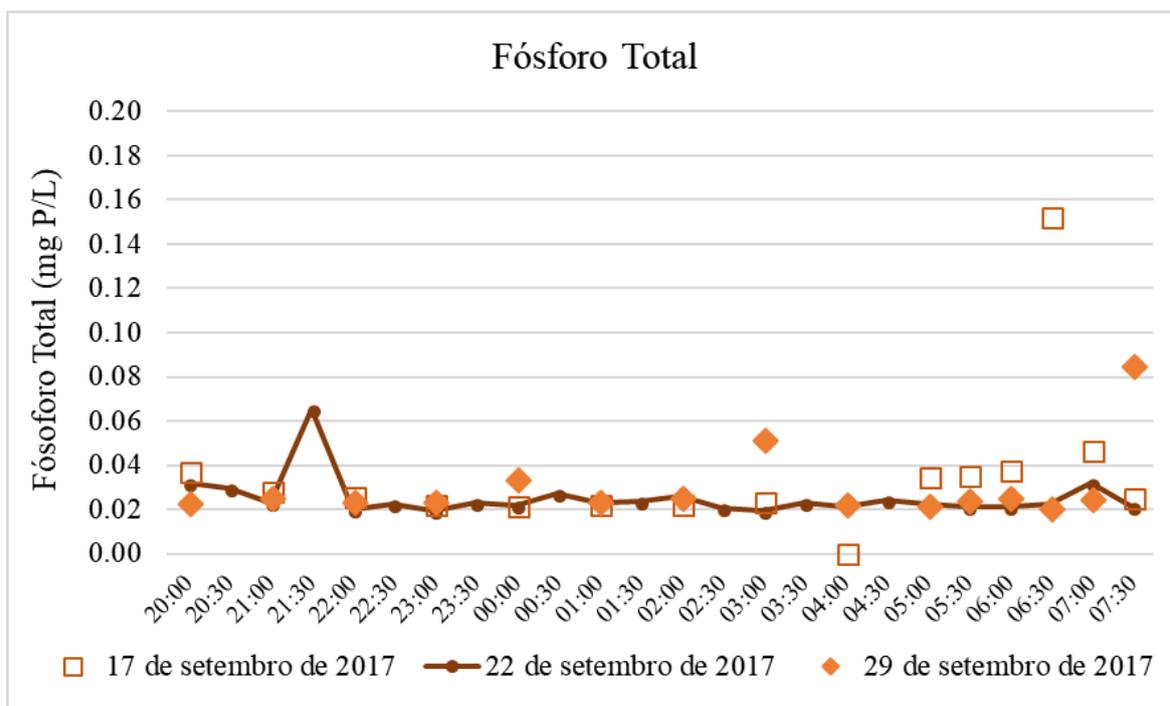


Figura 5.15 - Registros da amostragem contínua de fósforo total na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF no período seco.

A observação da concentração de nitrito, na Figura 5.16 (a), mostra uma variabilidade deste parâmetro ao longo da noite em ambos os eventos de amostragem contínua, ainda que seus valores continuem bastante baixos. O valor registrado às 22:00 da coleta do dia 17 de setembro de 2017 é incomum para esse parâmetro, assim como os registros de 1:00 e 5:00 do dia 29 de setembro de 2017.

A análise de nitrato, na Figura 5.16 (b), só foi possível na amostragem contínua do dia 29 de setembro de 2017. Nesse dia, o nitrato apresentou valores muito baixos quando comparados ao que estavam sendo registrados no monitoramento semanal, com a coleta de uma amostra discreta. Nesse evento de coleta contínua, o nitrato não passou de 0,14 mg/L enquanto que esse parâmetro costuma variar entre 0,30 e 0,40 mg/L.

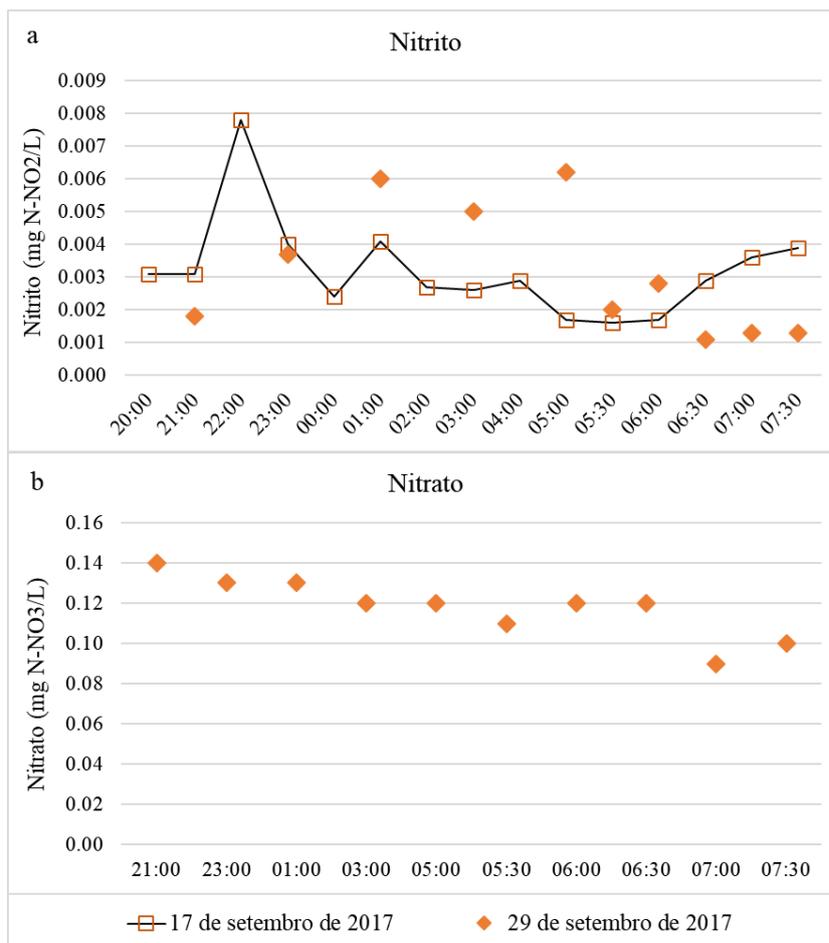


Figura 5.16 - Registros da amostragem contínua na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF no período seco. (a) Nitrito. (b) Nitrate.

5.1.4.2 - Período Chuvoso

A análise da Figura 5.17 (a) mostra que mesmo no período chuvoso os registros de fósforo total ao longo da noite costumam ser bastante baixos, com pouca variação. Nos dias 25 e 31 de janeiro apenas uma amostra apresenta valor mais alto que 0,1 mg/L.

Para avaliar melhor se realmente havia a ocorrência de valores mais altos de fósforo total pela manhã, nos dias 11 e 12 de fevereiro de 2018 o amostrador fez coletas das 5:00 às 9:00, no dia 11 com intervalos de 30 minutos, e no dia 12 a cada hora, visto na Figura 5.17 (b). Mais uma vez o fósforo total apresenta valores abaixo de 0,1 mg/L, o que mostra que nesse evento de coleta não foi possível identificar uma mudança na qualidade que indique a presença de despejos de cargas de poluição pontuais.

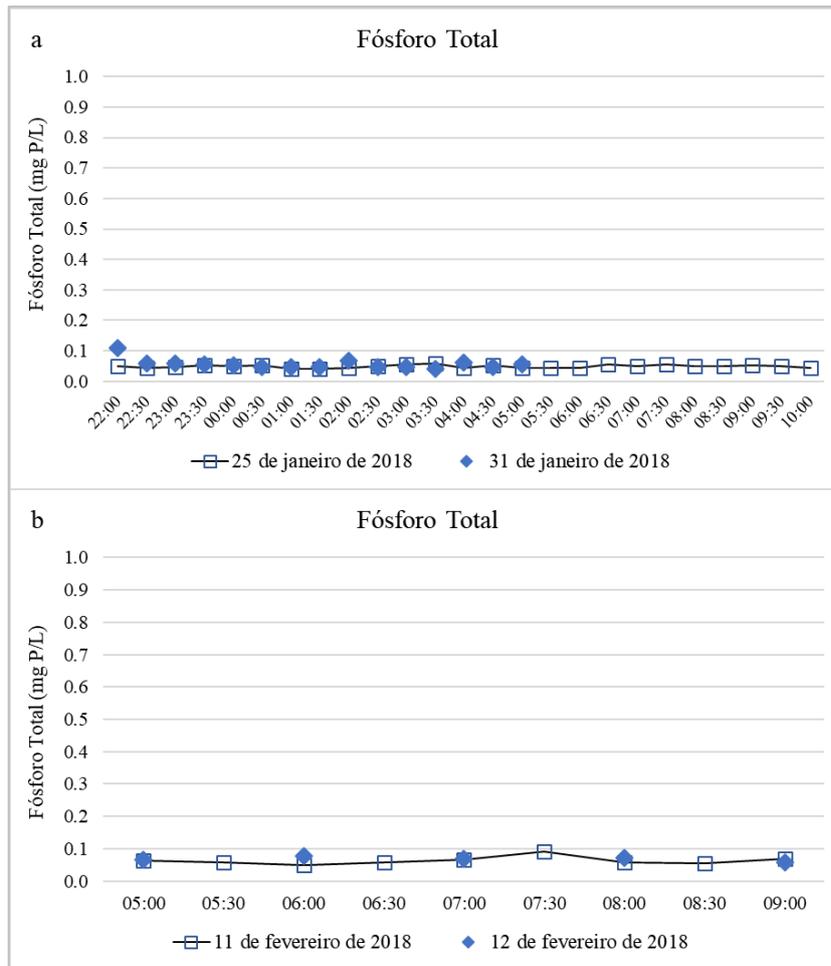


Figura 5.17 - Registros da amostragem contínua de fósforo total na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF no período chuvoso. (a) 25 e 31 de janeiro de 2018. (b) 11 e 12 de fevereiro de 2018.

Por outro lado, na amostragem contínua do dia 06 de fevereiro de 2018, na Figura 5.18, observa-se concentrações mais altas de fósforo total. Nesse dia houve um evento de chuva, com a ocorrência de carreamento de sedimentos e substâncias a eles associados, confirmado pelo valor da turbidez que foi de 17,10 UNT. Dessa maneira, é possível associar os picos de concentração de fósforo total com a ocorrência da chuva, que de maneira intermitente, carrou compostos de fósforo para o ribeirão Rodeador.

Da mesma maneira, como pode ser visto na Figura 5.19, o dia 06 de fevereiro foi o único em que a DQO chegou a valores tão altos como 100 e 140 mg/L. Nem todos os horários em que ocorreu aumento do valor de DQO são equivalentes ao aumento do fósforo total. Essa compatibilidade de ocorrência de picos aconteceu por volta das 5:30 e 6:00, e depois novamente às 8:00, talvez podendo indicar fontes variadas para cada parâmetro.

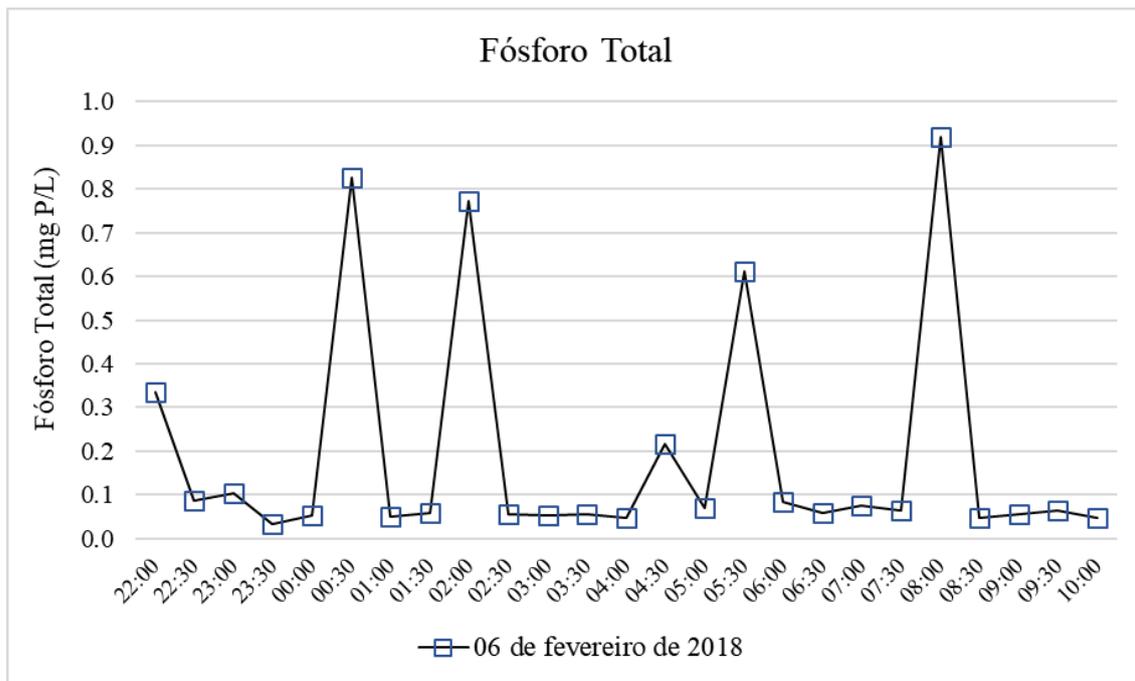


Figura 5.18 - Registros da amostragem contínua de fósforo total na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF no período chuvoso em 06 de fevereiro de 2018.

Os aumentos mais significativos da concentração de fósforo total ocorreram no início da madrugada, às 00:30 e 02:00 horas, e de manhã cedo, às 05:30 e 08:00 horas. Os aumentos mais significativos de DQO ocorreram no final da noite, às 22:00 e 23:30 horas, e novamente no início da manhã, às 06:00 e 08:00 horas.

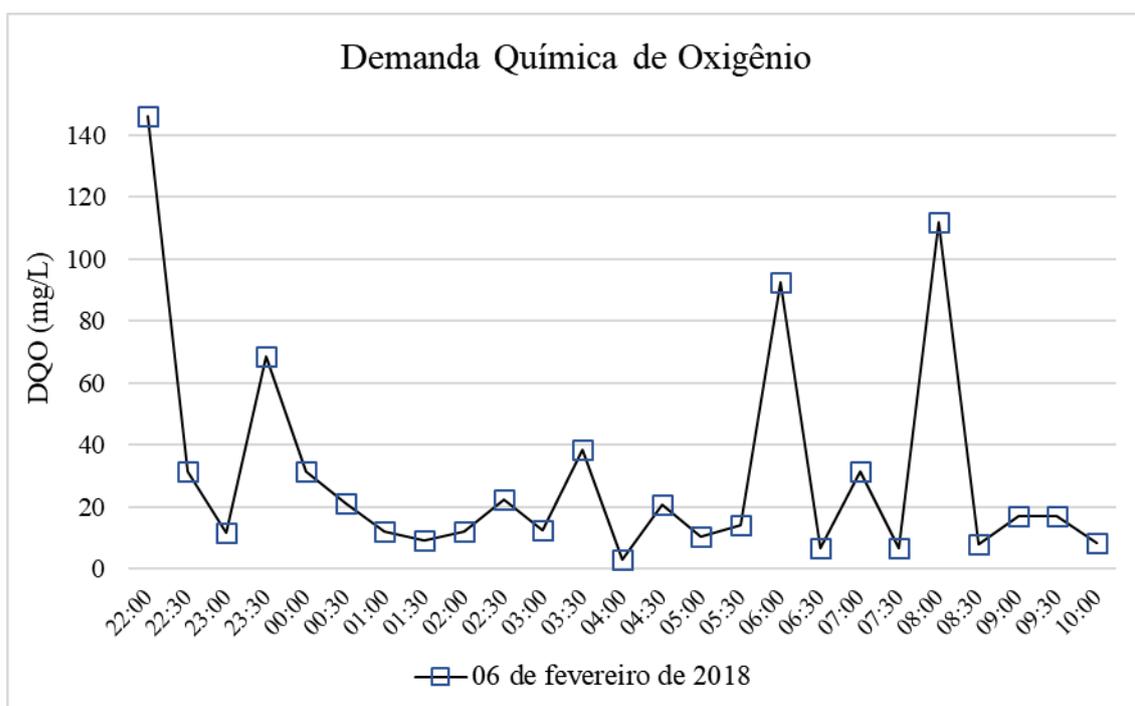


Figura 5.19 - Registros da amostragem contínua de demanda química de oxigênio na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF no período chuvoso em 06 de fevereiro de 2018.

Observa-se que o registro mais alto de fósforo total foi às 08:00 horas, e apresentou valor nove vezes mais alto que o comum de ser observado no ribeirão Rodeador. Também nesse horário a DQO foi muito alta, com valor cerca de cinco vezes maior que o comumente observado. Ambos valores ocorrendo no mesmo horário podem ser uma indicação de alguma outra fonte de nutrientes e matéria orgânica além do carreamento causado pela chuva. Como esse comportamento foi observado em apenas um dia, seria aconselhável investigar melhor a ocorrência de fósforo total e DQO no ribeirão Rodeador.

A Figura 5.20 mostra as amostragens contínuas de DQO nos dias 25 e 31 de janeiro (a), e depois nos dias 11 e 12 de fevereiro (b). Assim como observado para o fósforo, nesses dias não houve registros de aumento da concentração de DQO, e a maior parte dos valores está abaixo ou próximo de 20 mg/L.

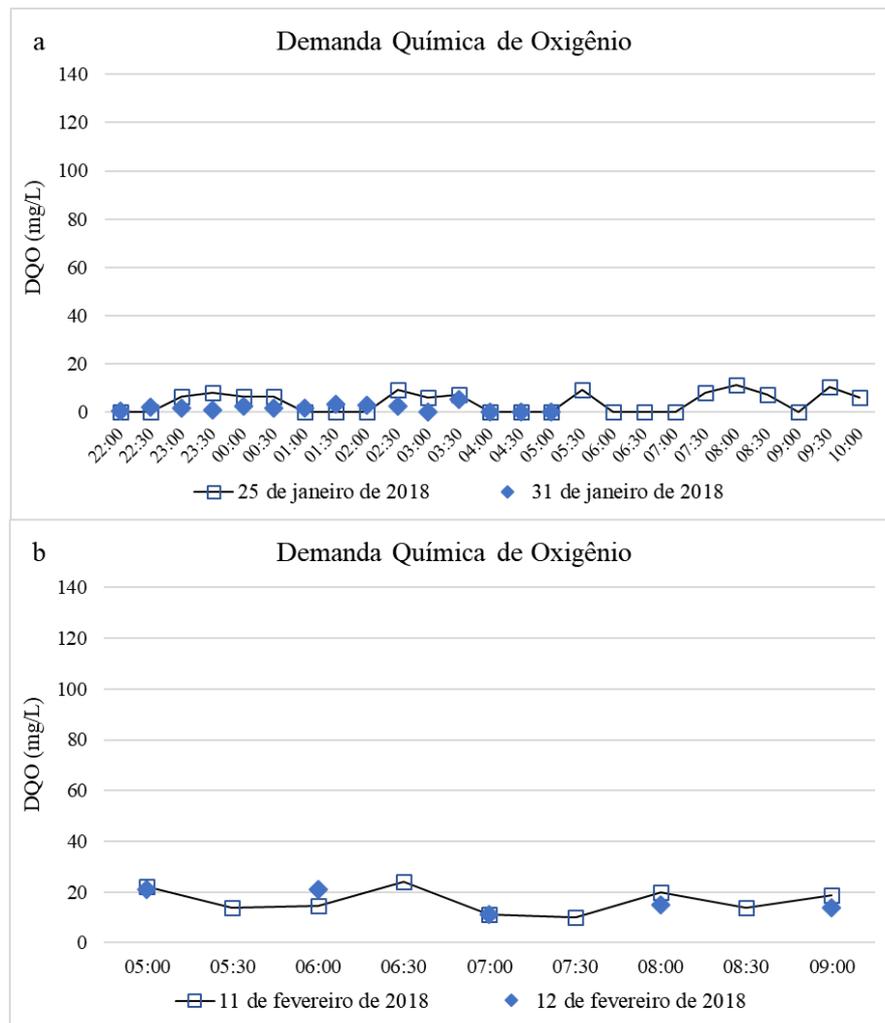


Figura 5.20 - Registros da amostragem contínua de demanda química de oxigênio na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF no período chuvoso. (a) 25 e 31 de janeiro de 2018. (b) 11 e 12 de fevereiro de 2018.

Os parâmetros fósforo reativo (a), nitrato (b), nitrogênio amoniacal (c) e nitrito (d) são expostos na Figura 5.21. Todos esses parâmetros tiveram o eixo de concentração padronizado para que fosse possível comparar os valores no mesmo intervalo. Assim, todos apresentaram valores baixos, não passando de 0.10 mg/L.

Como visto anteriormente na Tabela 5.1, nas coletas semanais a média das concentrações de nitrato foi 0,257 mg N-NO₃/L e a média dos valores de nitrito foi 0,0028 mg N-NO₂/L. Assim, é possível observar que enquanto que os valores de nitrato diminuíram consideravelmente na amostragem contínua, chegando no máximo à 0,03 mg/L, a concentração de nitrito chegou a registrar 0,0124 mg/L, oito vezes maior que a média semanal. Supõe-se que, com vazões mais altas no período chuvoso, o nitrato tenha sido diluído e o nitrito tenha sido carregado e identificado na análise antes de sofrer oxidação. Também são observados valores mais altos para o fósforo reativo, cuja média semanal é 0,0091 mg P-PO₄/L e a média da amostragem contínua é 0,016 mg/L. A maior variação durante a amostragem contínua foi do nitrogênio amoniacal, com registros entre 0,01 e 0,06 mg N-NH₃/L, mas cujos valores ainda estão abaixo da média semanal de 0,100 mg/L.

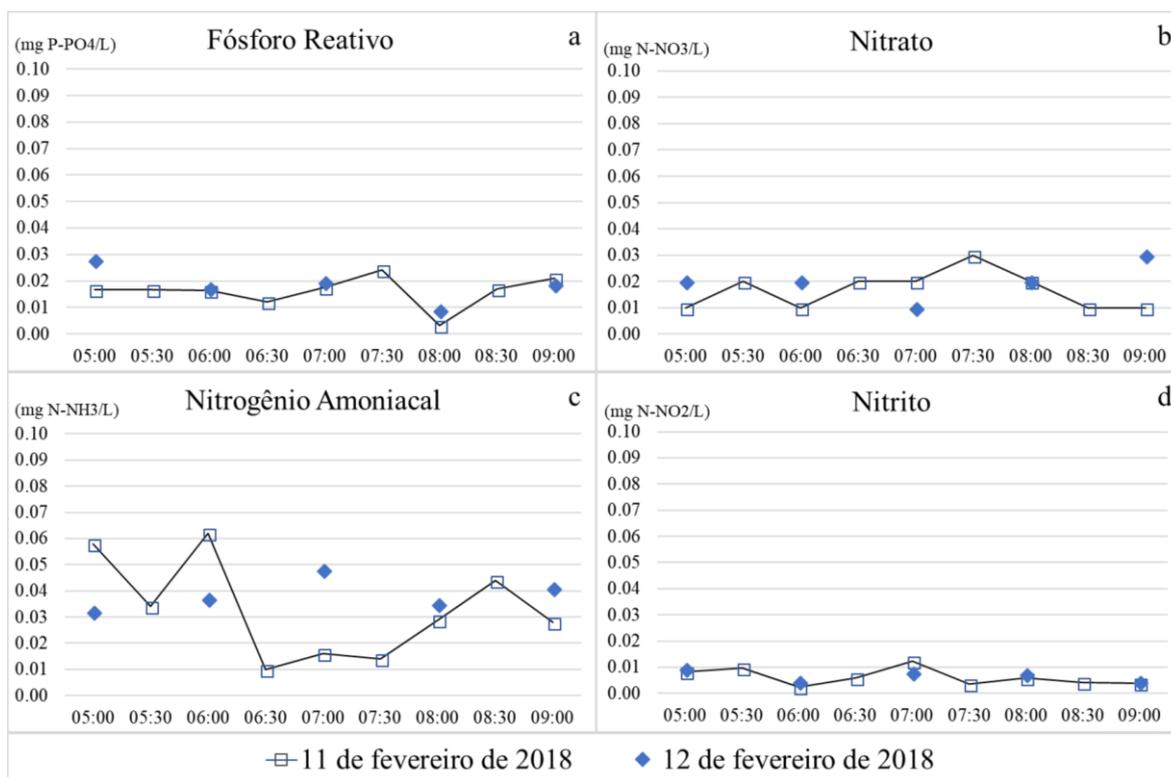


Figura 5.21 - Registros da amostragem contínua no período chuvoso na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF em 11 e 12 de fevereiro de 2018. (a) Fósforo Reativo. (b) Nitrato. (c) Nitrogênio Amoniacal. (d) Nitrito.

5.2 - MODELAGEM DA BACIA DO RIBEIRÃO RODEADOR

As simulações de variáveis hidrológicas e de qualidade da água foram realizadas com o modelo SWAT. Em seguida, com a utilização do software SWAT-CUP foram realizadas a análise de sensibilidade, a calibração e a verificação das simulações do modelo.

Em todas as etapas da adequação do modelo à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador (BHRR), foram avaliadas as variáveis vazão (m^3/s), carga mensal de nitrogênio total ($kg/mês$) e carga mensal de fósforo total ($kg/mês$).

5.2.1 - Modelagem Inicial

A sobreposição das camadas de uso e ocupação do solo, tipos de solo e relevo gerou 370 Unidades de Resposta Hidrológica (*Hydrologic Response Unit - HRU*) distribuídas em 3 sub-bacias, a primeira no rio Rodeador, a segunda no rio Jatobazinho, e a terceira na afluência de ambos, mais próxima do exutório da bacia. A Figura 5.22 mostra as sub-bacias e as Unidades de Resposta Hidrológica.

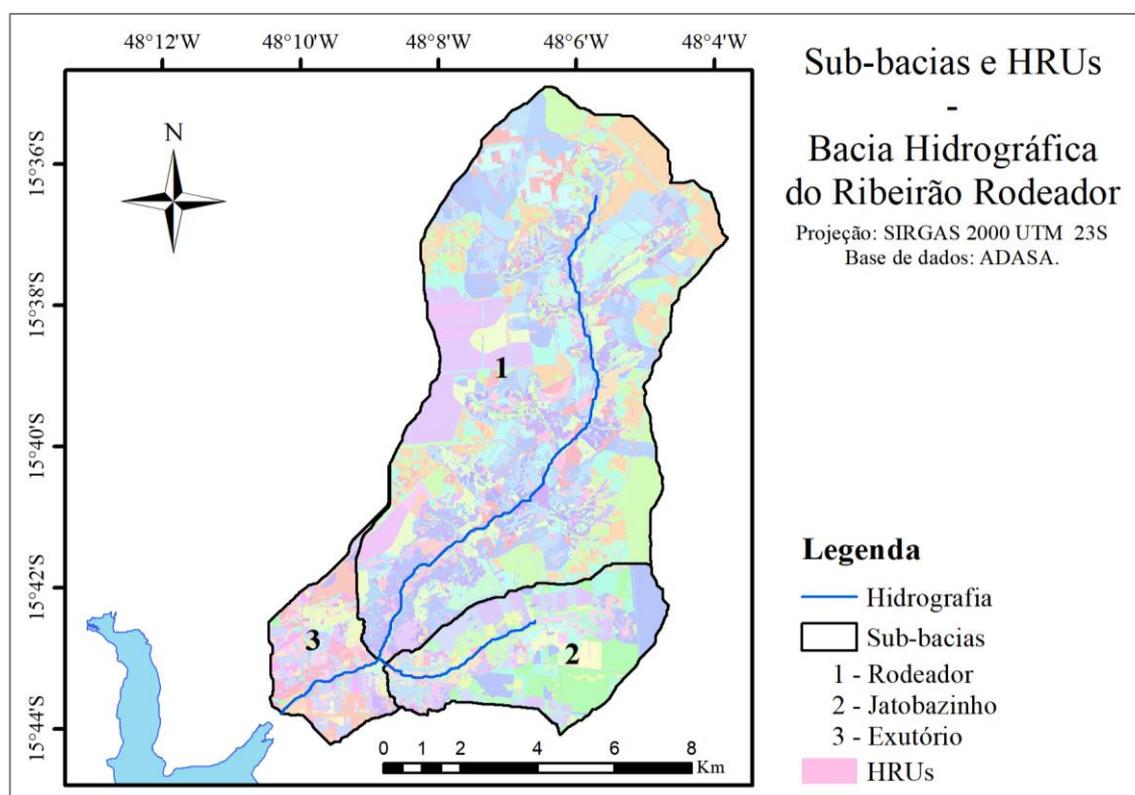


Figura 5.22- Sub-bacias e Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

Avaliou-se os resultados iniciais gerados pela simulação em passo mensal do SWAT de 2000 a 2011, com os anos de 1997- 1999 utilizados para o aquecimento do modelo.

Os critérios de avaliação de desempenho usados foram o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), o desvio padrão das observações (RSR), o percentual de tendência (PBIAS) e o coeficiente de determinação (R^2), segundo a classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007). Esses critérios estão detalhados na metodologia.

Como pode ser verificado na Tabela 5.2, apesar de todas as simulações iniciais serem consideradas insatisfatórias pela maioria dos critérios (Moriasi, 2007), a vazão teve um ajuste satisfatório pelo R^2 . A simulação da carga de nitrogênio teve o melhor desempenho, podendo inclusive ser considerada como muito boa segundo o critério do PBIAS.

Tabela 5.2 - Resultados da avaliação de desempenho da modelagem inicial de vazão e qualidade da água com o modelo SWAT na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

| Variável | NSE | RSR | PBIAS | R² |
|------------------|------------|------------|--------------|----------------------|
| Vazão | -1,46 | 1,57 | -102,45 | 0,79 |
| Nitrogênio Total | 0,33 | 0,81 | 16,93 | 0,36 |
| Fósforo Total | -10,64 | 3,41 | -279,03 | 0,39 |

A simulação inicial da vazão, na Figura 5.23, mostra que o modelo superestima os valores máximos da vazão, mas que se adequa um pouco melhor à recessão, prevendo valores mais próximos das vazões mínimas.

O valor de NSE de -1,46 para a simulação da vazão do ribeirão Rodeador é baixo se comparado com Silva (2016), que obteve NSE de 0,0 para a simulação inicial da vazão na BHRR em um período diferente, de 2006 a 2015. Aguiar (2016) utilizou a base de dados calibrada por Ferrigo (2014) para simular a bacia do Rodeador em um período diferente, de 2006 a 2016, e obteve resultados insatisfatórios, com NSE de 0,005. A queda no desempenho do modelo pode ser explicada pela diferença no período simulado, além de alterações na definição das sub-bacias e dos parâmetros de manejo do solo. A simulação diária inicial de Ferrigo (2014) na bacia do Rio Descoberto, também afluente ao Lago Descoberto, teve NSE de -0,57 e R^2 de 0,24, considerados insatisfatórios.

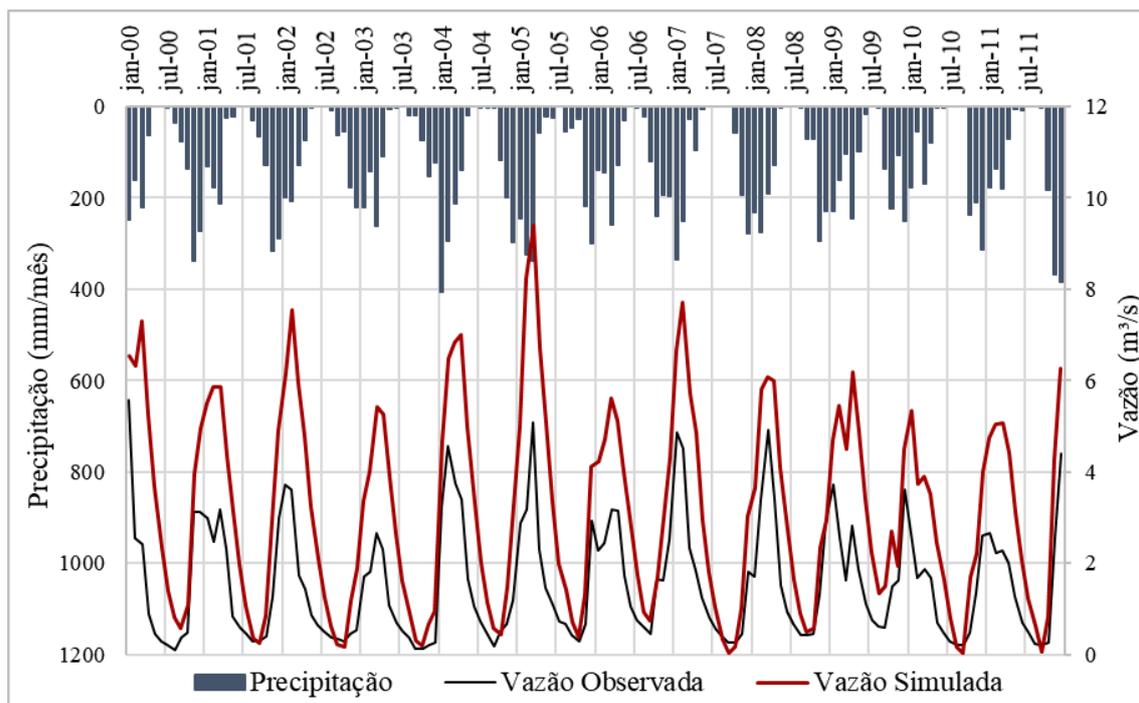


Figura 5.23 - Simulação inicial da vazão na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

A simulação da carga de nitrogênio teve ajuste razoável para uma simulação sem calibração. Apesar de não ter sido precisa, é possível perceber na Figura 5.24 que a curva da carga simulada consegue prever momentos de altas e baixas, como visto em 2000, 2001, 2004, 2005 e 2009.

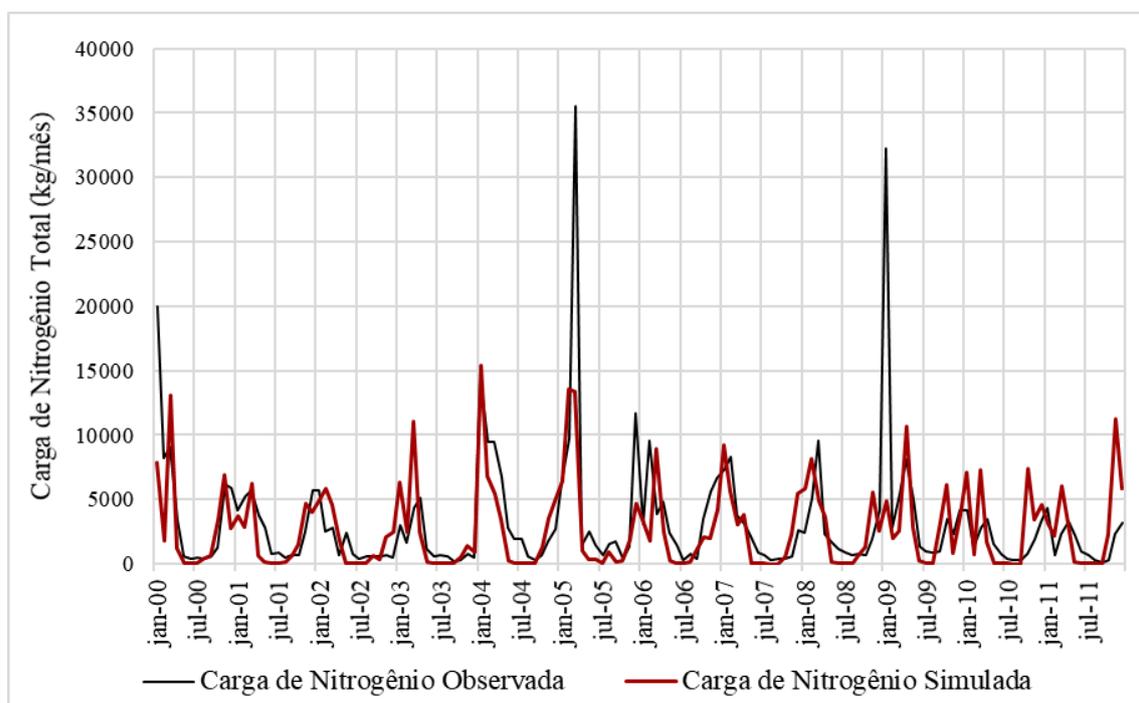


Figura 5.24 - Simulação inicial da carga mensal de nitrogênio total na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

A simulação da carga de fósforo, vista na Figura 5.25, consegue indicar tendências de altas e baixas. Porém, no caso dessa variável, a simulação superestimou demasiadamente os valores da carga. O fósforo é um parâmetro geralmente associado à geração de sedimentos, e como a BHRR é uma bacia com um carregamento de sólidos considerável, observado pelo aumento da turbidez no período de chuvas, é possível que o modelo tenha previsto uma quantidade muito maior de fósforo total do que o observado no monitoramento da bacia.

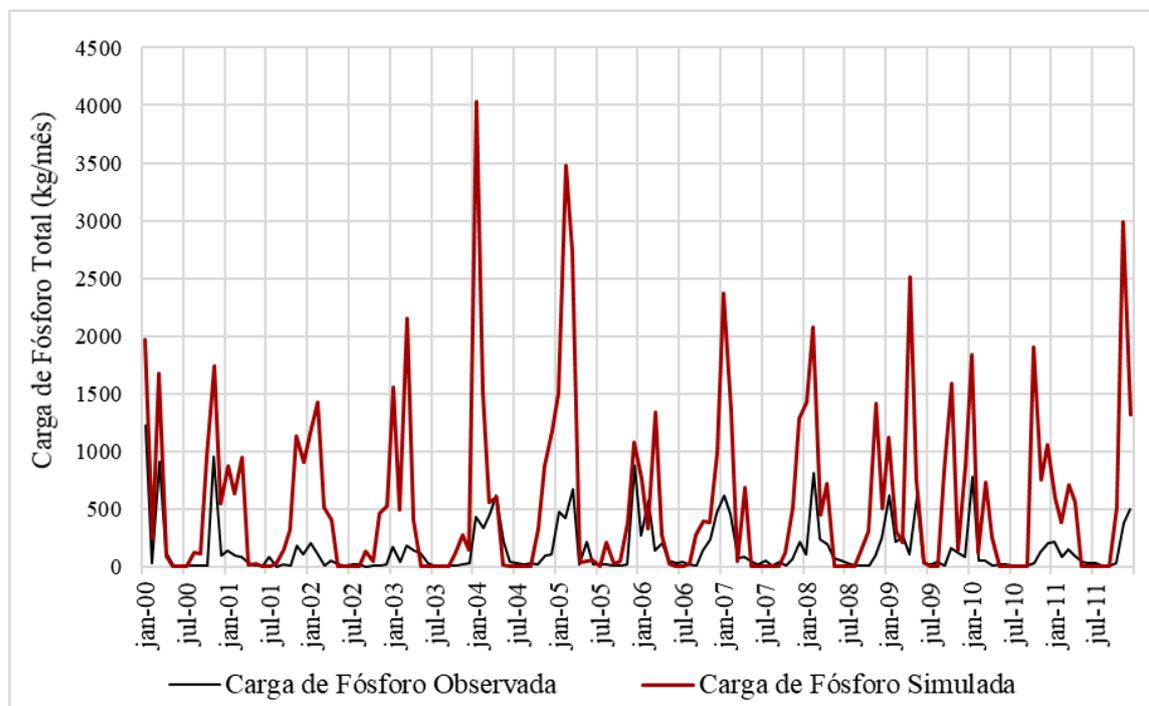


Figura 5.25 - Simulação inicial da carga mensal de fósforo total na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

Silva (2016) e Aguiar (2016) simularam as mesmas variáveis para a BHRR em períodos diferentes, e observaram que o modelo realmente superestima as concentrações de nutrientes. Ambos os trabalhos tiveram resultados insatisfatórios e não puderam calibrar os parâmetros de nitrogênio e fósforo.

5.2.2 - Análise de Sensibilidade

No que concerne a análise de sensibilidade da vazão, os parâmetros mais sensíveis determinados por Arnold *et al.* (2012) para escoamento superficial foram CN2, SOL_AWC, ESCO, EPCO, SURLAG e OV_N, e para o fluxo de base foram ALPHA_BF, GW_REVAP, GW_DELAY, GWQMN, REVAPMN e RCHRG_DP.

Além dessa compilação de Arnold *et al.* (2012), trabalhos mais recentes descrevem os parâmetros CN2, SOL_AWC, SOL_K, ALPHA_BF, ESCO, GW_DELAY, SHALLST e ANION_EXCL como os mais sensíveis na calibração da vazão (Ferrigo, 2014; Nunes, 2016; Shi *et al.*, 2017; Camargos *et al.*, 2018).

Esses resultados podem ser confirmados ao observar a Tabela 5.3, que apresenta o *P-value* na análise de sensibilidade dos parâmetros da vazão na BHRR. Como pode ser verificado na Figura 5.26, os parâmetros mais sensíveis são ESCO, GW_DELAY, EPCO, RCHRG_DP, SOL_AWC, SHALLST e SOL_K.

Tabela 5.3 - Análise de sensibilidade dos parâmetros relacionados à simulação de vazão no modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

| Parâmetro | <i>P-value</i> | Parâmetro | <i>P-value</i> |
|-----------|----------------|------------|----------------|
| ESCO | 0,0000 | GW_REVAP | 0,0603 |
| GW_DELAY | 0,0000 | CN2 | 0,0626 |
| EPCO | 0,0000 | DEEPST | 0,1088 |
| RCHRG_DP | 0,0000 | GWQMN | 0,1687 |
| SOL_AWC | 0,0000 | SOL_BD | 0,2678 |
| SHALLST | 0,0000 | ANION_EXCL | 0,2762 |
| SOL_K | 0,0000 | ALPHA_BF | 0,4332 |
| GWHT | 0,0216 | REVAPMN | 0,6456 |

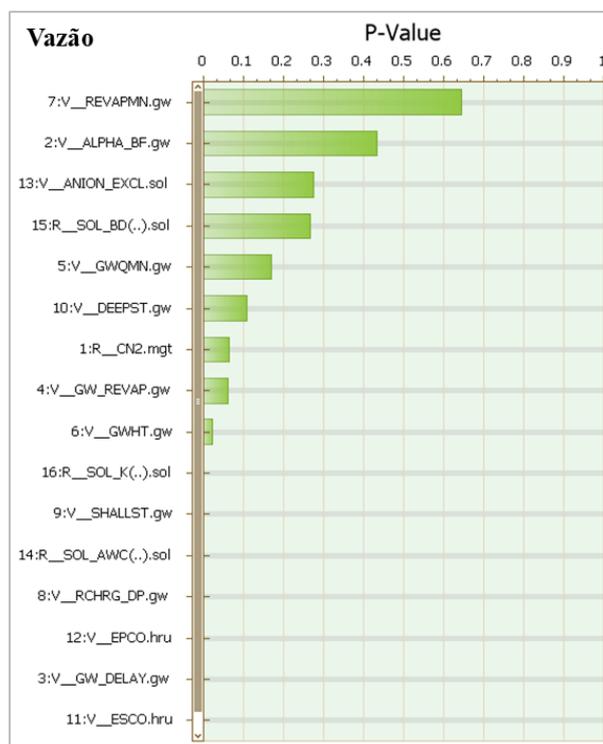


Figura 5.26 - Análise de sensibilidade dos parâmetros relacionados à simulação de vazão no modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

São menos frequentes os trabalhos de pesquisa que executam a análise de sensibilidade e a calibração de parâmetros para a simulação da carga de nitrogênio e fósforo. Ainda assim, é possível comparar os parâmetros mais sensíveis do presente trabalho com a literatura.

A análise de sensibilidade dos parâmetros que ajustam a carga de nitrogênio apontou que os mais sensíveis são LAT_ORGN, RS3, BC1, SDNCO e SHALLST_N, conforme Figura 5.27 (a). Sullivan e Gao (2016) também identificaram SHALLST_N como parâmetro mais sensível para o nitrogênio.

Como pode ser visto na Figura 5.27 (b), os parâmetros mais sensíveis para o fósforo foram GWSOLP, LAT_ORGP, RS5 e ADJ_PKR, ao contrário de Nunes (2016) e Bonumá *et al.* (2015) que identificaram PHOSKD e PPERCO como os mais sensíveis para fósforo.

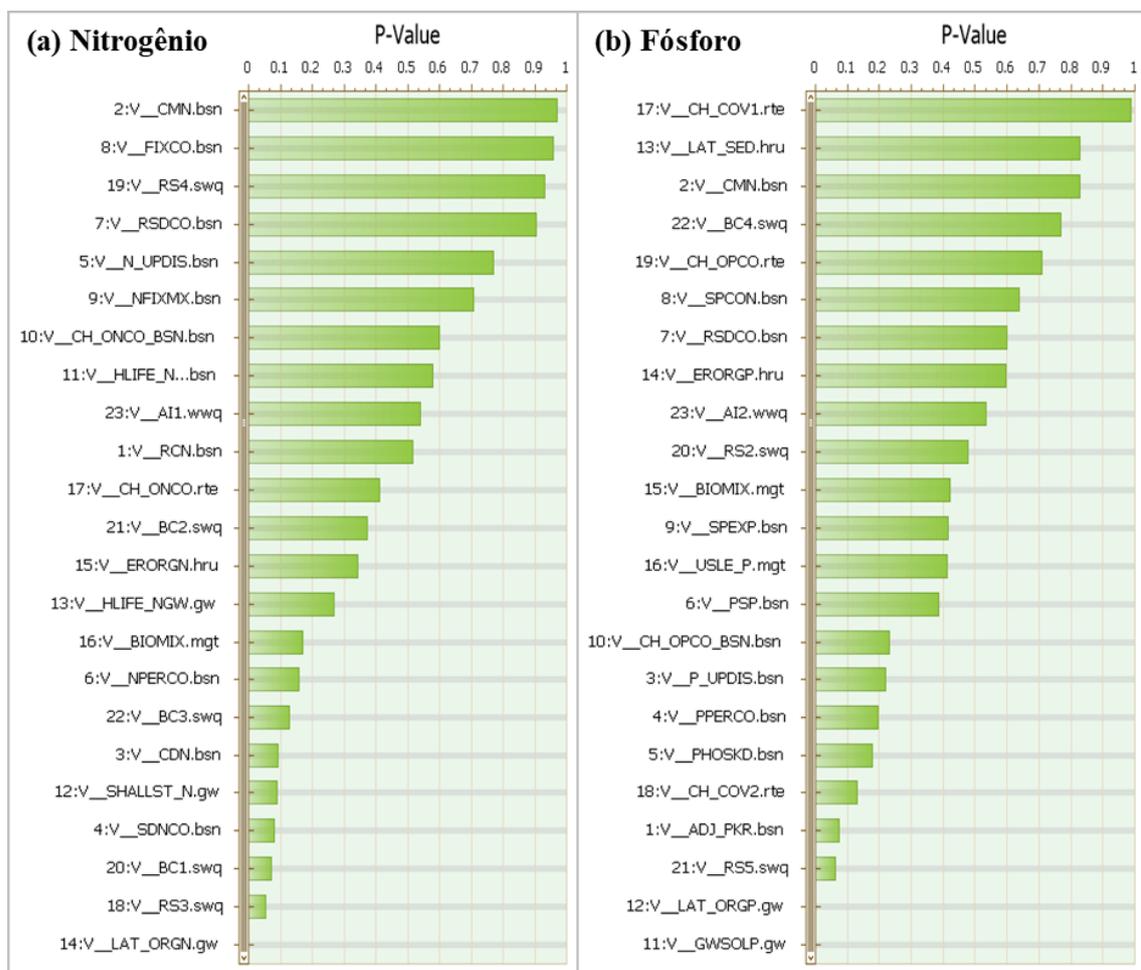


Figura 5.27 - Análise de sensibilidade dos parâmetros relacionados à simulação das cargas de nutrientes do modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF. (a) Nitrogênio. (b) Fósforo.

5.2.3 - Calibração

A calibração foi realizada para o mesmo período da modelagem inicial, de 2000 a 2011. Mesmo após a revisão dos parâmetros na análise de sensibilidade, as calibrações das simulações foram executadas com 44 parâmetros, devido ao fato de que alguns são mais adequados à calibração de vazão, outros à de nitrogênio, e outros à de fósforo.

5.2.3.1 - Vazão

Na calibração de vazão foram utilizados 12 parâmetros em 900 iterações para calibrar os processos de geração de escoamento superficial e do fluxo de base. A Tabela 5.4 mostra esses parâmetros, suas unidades e valores iniciais usados no modelo, o método e o intervalo escolhido para calibrar cada parâmetro, e o valor final do parâmetro ao final da calibração.

Tabela 5.4 - Parâmetros calibrados para a simulação da vazão no modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

| Parâmetro | Unidade | Valor inicial | Método | Intervalo | | Valor na calibração |
|------------|----------------------|---------------|--------|-----------|------|---------------------|
| | | | | Mín. | Máx. | |
| CN2 | adim | varia | r | -0,3 | 0,2 | -0,030507 |
| ALPHA_BF | dias | 0,0048 | v | 0,01 | 1,0 | 0,0372 |
| GW_DELAY | dias | 31 | v | 0,0 | 100 | 84,144104 |
| GWQMN | mm | 0,0 | v | 500 | 1228 | 971,577515 |
| GWHT | mm | 12 | v | 0,0 | 25 | 6,688107 |
| GW_REVAP | adim | 0,02 | v | 0,02 | 0,1 | 0,1 |
| REVAPMN | mm | 1,0 | v | 0,0 | 500 | 298,267395 |
| RCHRG_DP | fração | 0,05 | v | 0,0 | 1,0 | 0,348678 |
| SHALLST | mm | 1000 | v | 1000 | 5000 | 1290,828003 |
| DEEPST | mm | 2000 | v | 0,0 | 3000 | 2687,176514 |
| ESCO | adim | 0,95 | v | 0,4 | 1,0 | 0,4 |
| ANION_EXCL | fração | 0,5 | v | 0,1 | 1,0 | 0,215338 |
| SOL_AWC | mm/mm | varia | r | -0,2 | 0,5 | 0,470604 |
| SOL_BD | [g/cm ³] | varia | r | -0,93 | -0,6 | -0,659426 |
| SOL_K | mm/h | varia | r | -1,95 | 0,8 | 0,733289 |

r=*relative*; o valor do parâmetro é multiplicado pelo valor na calibração somado a 1,0.
v=*value*; o valor inicial do parâmetro é substituído pelo valor de calibração.

Após a calibração dos parâmetros que ajustam a vazão, os valores calibrados foram incluídos na base de dados do SWAT. De maneira geral, a nova simulação teve bom desempenho, como é possível verificar na Tabela 5.5. Comparando com simulações realizadas anteriormente na BHRR, a calibração para o período de 2000 a 2011 teve melhor desempenho. Silva (2016) também obteve bons resultados, com NSE de 0,64, RSR de 0,60 e PBIAS de 32,34 para a simulação de 2006 a 2015. A simulação calibrada por Aguiar (2016) para o período de 2006 a 2016 teve resultados menos satisfatórios, com NSE de 0,49.

Tabela 5.5 - Desempenho da simulação da vazão com parâmetros calibrados para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

| Variável estatística | Valor | Classificação (Moriassi et al, 2007) |
|-----------------------------|--------------|--|
| NSE | 0,68 | Boa |
| RSR | 0,56 | Boa |
| PBIAS | -27,06 | Insatisfatória |
| R ² | 0,81 | Satisfatória |

Considerando que houve a calibração dos parâmetros, a curva da simulação da vazão deveria estar melhor ajustada. Enquanto a modelagem inicial teve um melhor ajuste às vazões no período de recessão, a simulação calibrada está superestimando as vazões mínimas. Esse fato poderia ser explicado pela variação em parâmetros como GW_DELAY e RCHRG_DP, os quais ajustam as simulações dos picos, mas também superestimam a recessão. Os valores desses parâmetros foram limitados para tentar evitar que isso ocorresse, mas não podiam ser retirados pois melhoram os resultados de NSE.

Diversos trabalhos feitos em bacias hidrográficas no DF ou inseridas no bioma Cerrado apresentaram resultados semelhantes ao encontrados no presente trabalho após a calibração da vazão. Herrera (2013) e Ferreira *et al.* (2017) calibraram a bacia do Riacho Fundo em diferentes períodos, e obtiveram de NSE de 0,79 e 0,61, respectivamente. Salles (2012) obteve NSE de 0,67 na simulação mensal da bacia do Pípiripau, e Silva *et al.* (2018) obteve NSE de 0,68 e R² de 0,80 na simulação mensal da bacia do Alto São Francisco.

O único valor estatístico incompatível com o bom desempenho do modelo é o PBIAS, que apresenta valor bastante negativo, o que indica uma superestimação da simulação em relação à curva de vazões observadas, que pode ser verificada na Figura 5.28. Herrera

(2013) também obteve um valor negativo para PBIAS na calibração da bacia do riacho Fundo-DF, indicando superestimação da simulação nessa bacia. Também é notável o valor de R^2 de 0,81. Esse resultado de desempenho com um valor mais próximo de 1,0 indica uma boa aderência da curva simulada à curva de vazões observadas.

Além de superestimar os períodos de recessão, é possível observar que a transição da estação seca para a estação chuvosa está simulada com maior precisão. Ainda assim, em janeiro 2008 e 2009 o modelo subestima as vazões máximas, enquanto que em abril de 2005 e 2009 as vazões são superestimadas.

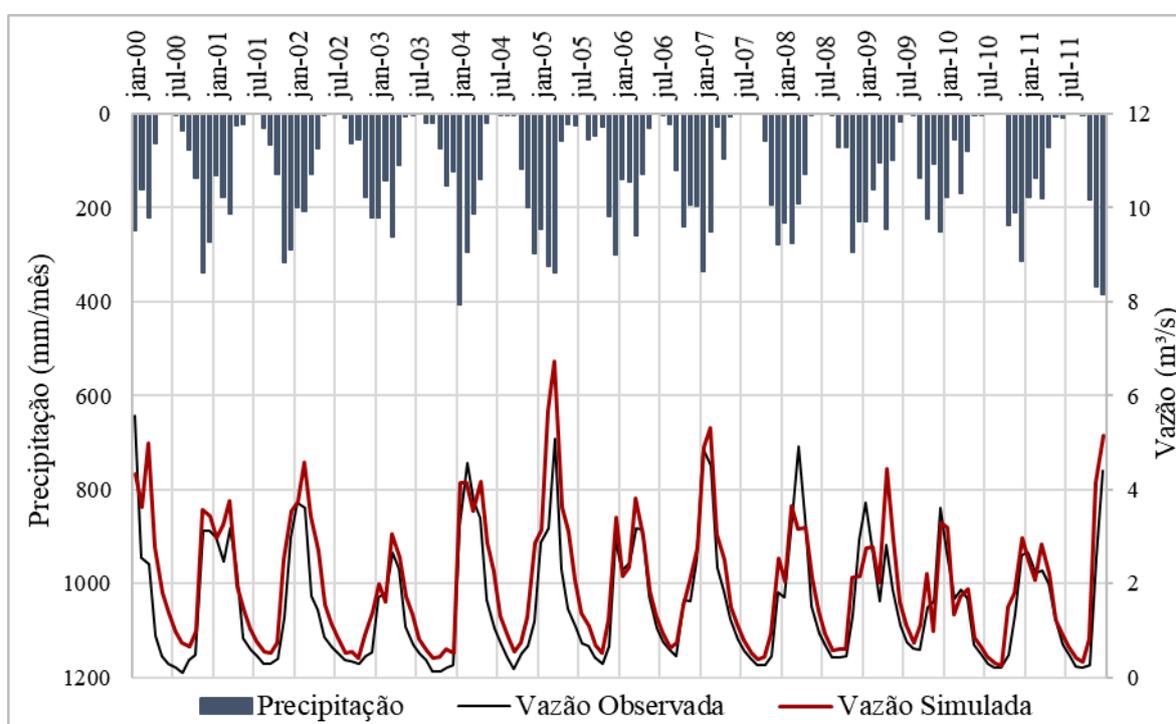


Figura 5.28 - Simulação mensal da vazão após a calibração dos parâmetros.

5.2.3.2 - Nitrogênio Total

Tendo obtido os valores da calibração dos parâmetros de vazão, foi realizada paralelamente a calibração dos parâmetros de nitrogênio e fósforo. Na calibração de nitrogênio foram utilizados 14 parâmetros em 900 iterações para calibrar os processos de geração da carga mensal de nitrogênio total. A Tabela 5.6 mostra esses parâmetros, suas unidades e valores iniciais usados pelo modelo, o método e o intervalo escolhido para calibrar cada parâmetro, e o valor final do parâmetro ao final da calibração.

Tabela 5.6 - Parâmetros calibrados para a simulação da carga de nitrogênio na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

| Parâmetro | Unidade | Valor inicial | Método | Intervalo | | Valor na calibração |
|-----------|--------------------------|---------------|--------|-----------|-------|---------------------|
| | | | | Mín. | Máx. | |
| RCN | mg N/L | 0,0 | v | 0,0 | 15 | 6,688908 |
| CDN | adim | 1,4 | v | 0,0 | 3,0 | 0,611966 |
| CMN | adim | 0,003 | v | 0,001 | 0,003 | 0,002982 |
| SDNCO | adim | 1,1 | v | 0,0 | 1,1 | 0,342323 |
| N_UPDIS | adim | 20 | v | 0,0 | 100 | 37,083248 |
| NPERCO | adim | 0,2 | v | 0,0 | 1,0 | 0,829001 |
| SHALLST_N | mg/L | 0,0 | v | 0,0 | 1000 | 476,543488 |
| HLIFE_NGW | dias | 0,0 | v | 0,0 | 200 | 65,895233 |
| LAT_ORGN | mg/L | 0,0 | v | 0,0 | 200 | 0,789616 |
| ERORGN | adim | 0,0 | v | 0,0 | 5,0 | 1,647534 |
| RS3 | mg/(m ² .dia) | 0,5 | v | 0,0 | 1,0 | 0,860022 |
| BC1 | 1/dia | 0,55 | v | 0,1 | 1,0 | 0,718735 |
| BC2 | 1/dia | 1,1 | v | 0,2 | 2,0 | 1,900287 |
| BC3 | 1/dia | 0,21 | v | 0,2 | 0,4 | 0,286636 |

r=relative: o valor do parâmetro é multiplicado pelo valor na calibração somado a 1,0.
v=value: o valor inicial do parâmetro é substituído pelo valor de calibração.

A simulação executada depois da calibração dos parâmetros de nitrogênio é classificada pela maioria dos critérios como insatisfatória, como visto na Tabela 5.7 (Moriassi *et al.*, 2007). Esses autores classificam como satisfatórias simulações com NSE acima de 0,5, mas Gupta *et al.* (1991) afirmam que o NSE acima de 0,0 pode ser considerado aceitável. O valor de NSE de 0,44 na simulação de nitrogênio está bastante próximo do satisfatório. A classificação como muito boa segundo o PBIAS indica que não houve grandes discrepâncias na estimativa dos valores para mais ou para menos (Gupta *et al.*, 1999). Verifica-se na Figura 5.29 que há um equilíbrio entre vazões subestimadas e superestimadas pelo modelo.

Tabela 5.7 - Desempenho da simulação da carga de nitrogênio com parâmetros calibrados para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

| Variável estatística | Valor | Classificação (Moriassi et al, 2007) |
|----------------------|-------|---|
| NSE | 0,44 | Insatisfatória |
| RSR | 0,75 | Insatisfatória |
| PBIAS | -1,64 | Muito boa |
| R ² | 0,45 | Insatisfatória |

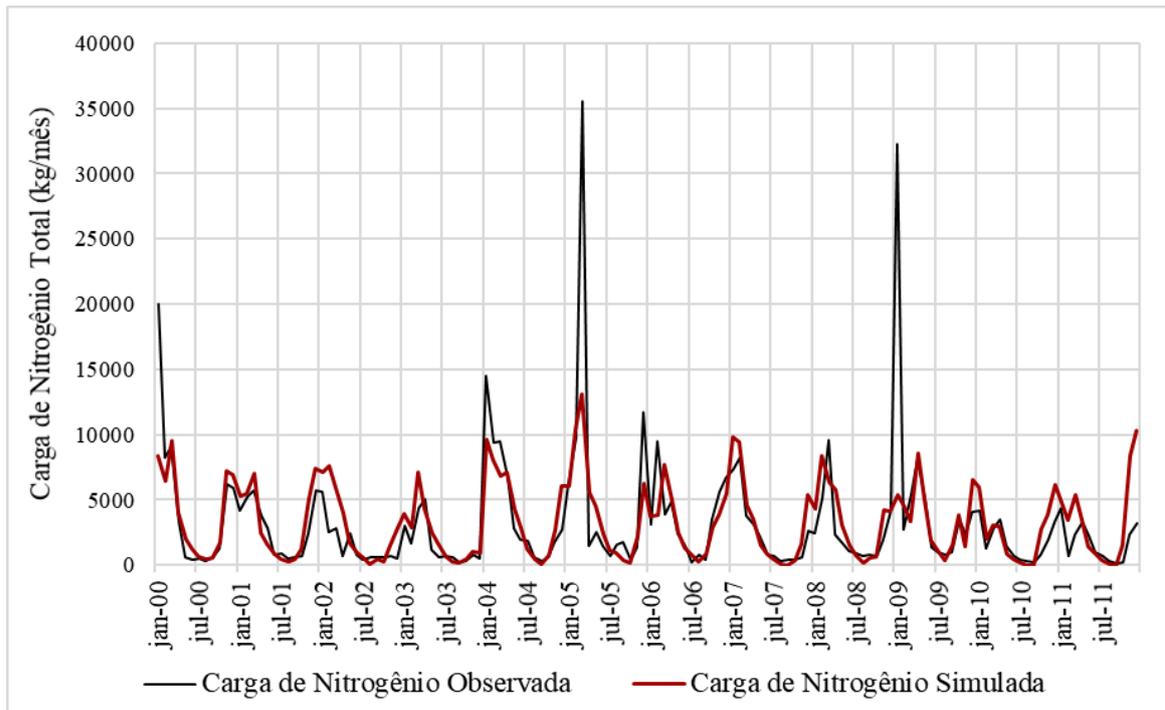


Figura 5.29 - Simulação mensal da carga de nitrogênio na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador após a calibração dos parâmetros.

Na região onde está inserida a BHRR o foco de pesquisas com o SWAT é a calibração dos parâmetros de vazão. Assim, Nunes (2016) foi pioneiro na calibração de parâmetros de nitrogênio e fósforo para as bacias que compõem a Bacia Hidrográfica do Lago Paranoá de 1982 a 2000, e obteve resultados insatisfatórios, com NSE negativo nas simulações de nitrogênio em todas as bacias em que foi possível realizar a calibração.

As simulações de nitrogênio total em bacias hidrográficas na China obtiveram maior sucesso. Shi *et al.* (2017) utilizaram duas estações para calibrar a bacia do rio Pengxi, inserida na região do reservatório de Três Gargantas, em 2012, e obtiveram NSE de 0,5 e 0,68, e R^2 de 0,76 e 0,84. Também na China, Wu *et al.* (2018) realizaram a calibração do modelo para bacias hidrográficas no distrito irrigado de Hetao, de 2007 a 2010, e obtiveram NSE de 0,63 na simulação de nitrogênio total.

Mesmo com resultados insatisfatórios, a curva da simulação de nitrogênio acompanha a curva da carga observada em diversos momentos, como nos anos de 2000, 2001, e em partes de todos os anos à frente. Além disso, alguns picos da carga de nitrogênio observada estão muito altos, assim a simulação subestima as máximas. Esses picos ocorrem devido a uma combinação de concentrações um pouco maiores com altas consideráveis de vazão.

5.2.3.3 - Fósforo Total

Na calibração de fósforo foram utilizados 14 parâmetros em 900 iterações para calibrar os processos de geração da carga mensal de fósforo total. A Tabela 5.8 mostra esses parâmetros, suas unidades e valores iniciais usados pelo modelo, o método e o intervalo escolhido para calibrar cada parâmetro, e o valor final do parâmetro ao final da calibração.

Tabela 5.8 - Parâmetros calibrados para a simulação da carga de fósforo na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador.

| Parâmetro | Unidade | Valor inicial | Método | Intervalo | | Valor na calibração |
|-----------|---------|---------------|--------|-----------|------|---------------------|
| | | | | Mín. | Máx. | |
| ADJ_PKR | adim | 1,0 | v | 0,5 | 2,0 | 0,510072 |
| P_UPDIS | adim | 20 | v | 0,0 | 100 | 9,268893 |
| PPERCO | adim | 10 | v | 10 | 17,5 | 15,989878 |
| PHOSKD | adim | 175 | v | 100 | 200 | 100,177979 |
| PSP | adim | 0,4 | v | 0,01 | 0,7 | 0,010038 |
| SPCON | adim | 0,0001 | v | 0,0001 | 0,01 | 0,009975 |
| SPEXP | adim | 1,0 | v | 1,0 | 1,5 | 1,001110 |
| GWSOLP | mg/L | 0,0 | v | 0,0 | 1000 | 0,066117 |
| LAT_ORGP | mg/L | 0,0 | v | 0,0 | 200 | 0,015435 |
| LAT_SED | mg/L | 0,0 | v | 0,0 | 5000 | 10,028040 |
| ERORGP | adim | 0,0 | v | 0,0 | 5,0 | 0,010028 |
| BIOMIX | adim | 0,2 | v | 0,0 | 1,0 | 0,459642 |
| USLE_P | adim | 1,0 | v | 0,0 | 1,0 | 0,182812 |
| RS5 | 1/dia | 0,05 | v | 0,001 | 0,1 | 0,001325 |
| BC4 | 1/dia | 0,35 | v | 0,01 | 0,7 | 0,697696 |

r=*relative*: o valor do parâmetro é multiplicado pelo valor na calibração somado a 1,0.

v=*value*: o valor inicial do parâmetro é substituído pelo valor de calibração.

A simulação executada após a calibração dos parâmetros de fósforo teve desempenho insatisfatório para a maioria dos critérios, como visto na Tabela 5.9. O valor negativo de PBIAS indica a superestimação da simulação em relação à curva observada, e a classificação satisfatória sugere que mesmo que tenham ocorrido, essas superestimações não são demasiado discrepantes. Nunes (2016) teve maior sucesso na calibração dos parâmetros de fósforo, em comparação com o nitrogênio. Ainda assim, encontrou dificuldades na obtenção de simulações satisfatórias, com o melhor resultado para a bacia do ribeirão do Gama, no Distrito Federal, com NSE de 0,16 e PBIAS de 24,40.

Tabela 5.9 - Desempenho da simulação da carga de fósforo com parâmetros calibrados para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

| Variável estatística | Valor | Classificação (Moriassi et al, 2007) |
|----------------------|--------|---|
| NSE | 0,29 | Insatisfatória |
| RSR | 0,85 | Insatisfatória |
| PBIAS | -42,61 | Satisfatória |
| R ² | 0,39 | Insatisfatória |

Shen *et al.* (2013) calibraram o modelo para as cargas de fósforo nas bacias da região do reservatório de Três Gargantas, China, utilizando quatro estações com NSE variando de 0,60 a 0,84, e R² variando de 0,75 a 0,90, de 2000 a 2004. Alguns anos mais tarde, Shi *et al.* (2017) calibraram a bacia do rio Pengxi para o ano de 2011 utilizando duas estações, com NSE de 0,82 e 0,87, e R² de 0,88 e 0,89. Wu *et al.* (2018) obtiveram NSE de 0,64 na calibração de 2007 a 2010 nas bacias do distrito irrigado de Hetao, China.

A simulação da carga de fósforo, na Figura 5.30, apresenta uma curva pouco correspondente aos valores observados para essa variável. Parece que a simulação inicial, apesar do resultado insatisfatório e da superestimação demasiada, conseguia acompanhar melhor as tendências da ocorrência da carga de fósforo na bacia. Ainda assim, houve uma melhora considerável no valor de NSE e RSR após a calibração.

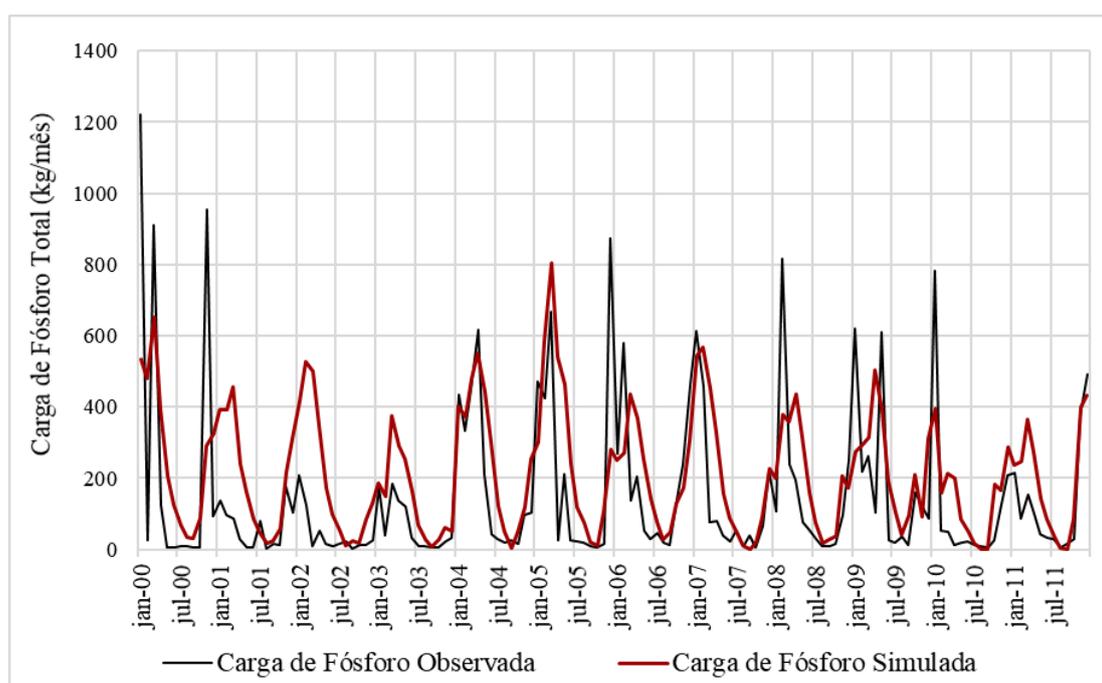


Figura 5.30 - Simulação mensal da carga de fósforo na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF após a calibração dos parâmetros.

5.2.4 - Verificação

A verificação é a etapa que se segue à calibração no processo de adequação de um modelo a uma bacia hidrográfica. A proposta do presente trabalho foi verificar o modelo para o período de 2012 a 2017. No entanto, ao verificar outros períodos, os resultados das simulações mudaram bastante. Dessa maneira, serão apresentados os resultados da aplicação dos parâmetros calibrados aos períodos de 2012 a 2017 e 2015 a 2017.

5.2.4.1 - Vazão

A verificação da simulação da vazão realizada para o período de 2012 a 2017 teve desempenho insatisfatório para a maioria dos critérios, como pode ser verificado na Tabela 5.10. A única variável estatística que mostra um desempenho satisfatório é o R^2 de 0,77. Esse valor pode estar mais alto pois a curva da vazão simulada acompanha a tendência da vazão observada, mesmo que superestimada.

Essa superestimação é corroborada pelo valor de PBIAS, que está negativo e muito distante de zero. Observando a Figura 5.31, nota-se que as vazões dos anos 2012, 2013 e 2014 estão superestimadas em até o dobro da vazão observada, e mesmo após 2015, ainda há superestimação da vazão.

Tabela 5.10 - Desempenho da simulação da vazão na verificação de 2012 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

| Variável estatística | Valor | Classificação (Moriassi et al, 2007) |
|-----------------------------|--------------|--|
| NSE | -0,96 | Insatisfatória |
| RSR | 1,40 | Insatisfatória |
| PBIAS | -79,65 | Insatisfatória |
| R^2 | 0,77 | Satisfatória |

Não é muito comum que o desempenho de um modelo calibrado para a vazão seja tão inadequado à verificação. Ainda assim, Herrera (2013), que obteve resultados muito bons para a calibração da bacia do Riacho Fundo de 1988 a 1996, não pôde observar o mesmo sucesso na verificação, de 1997 a 2000, e obteve resultados em geral insatisfatórios, com NSE de -1,02, RSR de 1,42 e PBIAS de -30,04.

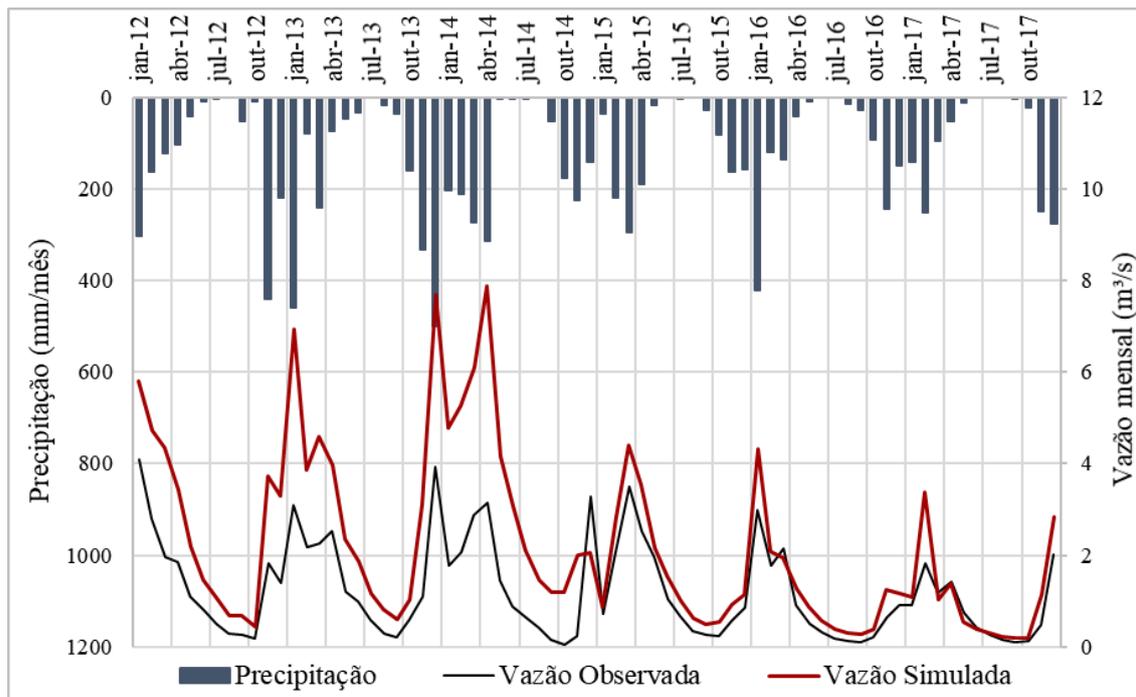


Figura 5.31 - Simulação mensal da vazão na verificação de 2012 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

A necessidade de fazer dois períodos de verificação e a não adequação dos anos de 2012 a 2014 à série de dados, tanto a anterior, que resultou em uma calibração satisfatória, quanto a posterior, com melhor desempenho da verificação, pode ser explicada pela variação climática no DF e pela retirada de água da bacia.

Observa-se, na análise de gráficos da vazão no ribeirão Rodeador, que é justamente a partir de 2012 que a ocorrência de chuvas mais fortes não se converte em vazões mais altas. Como esses dados de precipitação são médias ponderadas de outras estações, pode ter acontecido dessa chuva não ter ocorrido na bacia do ribeirão Rodeador de 2012 a 2014, gerando uma maior necessidade de retirada de água superficial para o abastecimento de pessoas e animais, e a irrigação de cultivos, resultando em vazões menores no exutório.

Além disso, já na verificação para o período de 2012 a 2017 é possível perceber que a partir de 2015, as vazões simuladas parecem se adequar melhor às observadas. Assim, a verificação para o período de 2015 a 2017 teve um bom desempenho, em média, como pode ser verificado na Tabela 5.11. Efetivamente, as vazões foram ligeiramente superestimadas pelo modelo para o período de 2015 a 2017, mas a curva da simulação está bastante adequada aos dados observados, como visto na Figura 5.32.

Tabela 5.11 - Desempenho da simulação da vazão na verificação de 2015 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

| Variável estatística | Valor | Classificação (Moriassi et al, 2007) |
|----------------------|--------|---|
| NSE | 0,65 | Boa |
| RSR | 0,59 | Boa |
| PBIAS | -34,91 | Insatisfatória |
| R ² | 0,92 | Satisfatória |

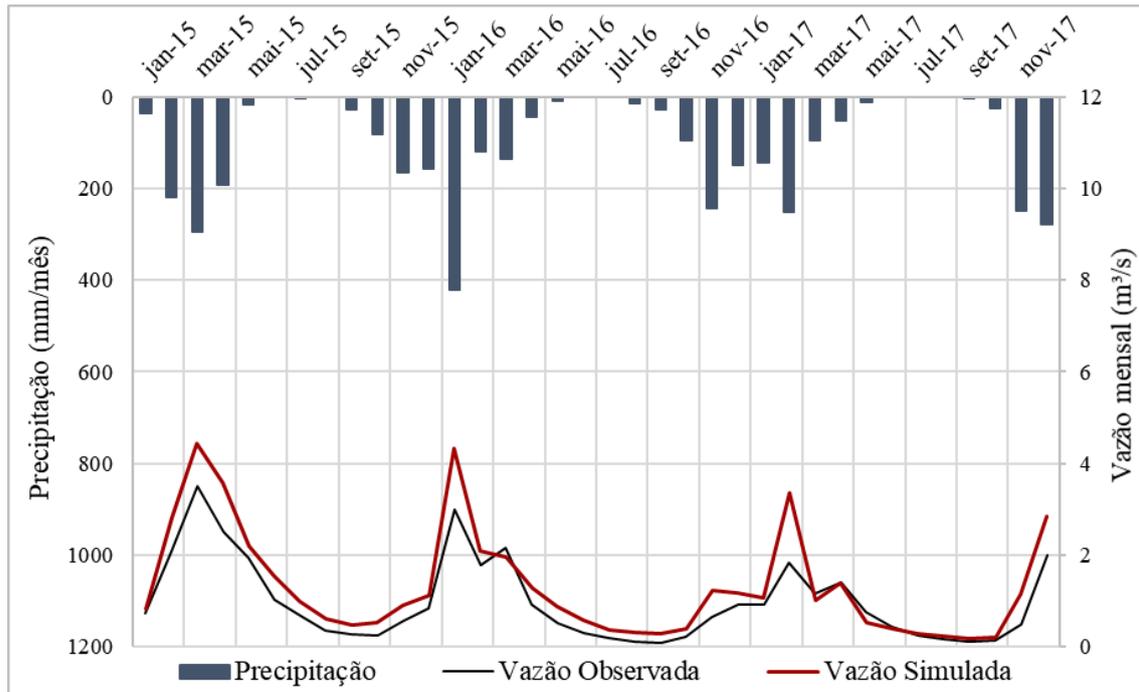


Figura 5.32 - Simulação mensal da vazão na verificação de 2015 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

A verificação da simulação da BHRR em 2016 com os parâmetros calibrados por Silva (2016) obteve NSE de 0,39, RSR de 0,78 e PBIAS de 46,93. O valor de PBIAS positivo em Silva (2016) indica que a simulação subestimou as vazões, enquanto que o valor negativo no presente trabalho indica que a simulação superestimou as vazões. Ferrigo (2014) utilizou uma base dados calibrada para a bacia do rio Descoberto na verificação da simulação da BHRR, e obteve NSE de 0,48 de 2005 a 2010 e NSE de 0,57 de 2010 a 2013.

A verificação da bacia hidrográfica do rio Descoberto, executada por Ferrigo (2014) teve NSE de 0,48 e R² de 0,46. Nunes (2016) realizou a verificação das simulações das bacias do Lago Paranoá de 2001 a 2010 e obteve resultados satisfatórios para as bacias do Ribeirão Gama e do Córrego Cabeça de Veado, com NSE de 0,58 e 0,52, RSR de 0,64 e 0,69, PBIAS -11,30 e -8,80, e R² de 0,61 e 0,54, respectivamente.

5.2.4.2 - Nitrogênio Total

A verificação da simulação da carga de nitrogênio realizada para o período de 2012 a 2017 pode ser classificada como insatisfatória pela maioria dos critérios como pode ser visto na Tabela 5.12. A verificação de Nunes (2016) para as simulações de carga de nitrogênio das bacias afluentes ao Lago Paranoá também apresentou resultados insatisfatórios, com o melhor desempenho na bacia do ribeirão do Gama, com NSE de 0,28, RSR de 0,85, PBIAS de 29,60 e R^2 de 0,39. Como esse autor já apresentava resultados insatisfatórios para a calibração da simulação de nitrogênio, assim como os resultados do presente trabalho, era de se esperar que também a verificação fosse insatisfatória em ambos.

Tabela 5.12 - Desempenho da simulação de nitrogênio na verificação de 2012 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

| Variável estatística | Valor | Classificação (Moriassi et al, 2007) |
|----------------------|--------|---|
| NSE | 0,17 | Insatisfatória |
| RSR | 0,91 | Insatisfatória |
| PBIAS | -25,81 | Boa |
| R^2 | 0,47 | Insatisfatória |

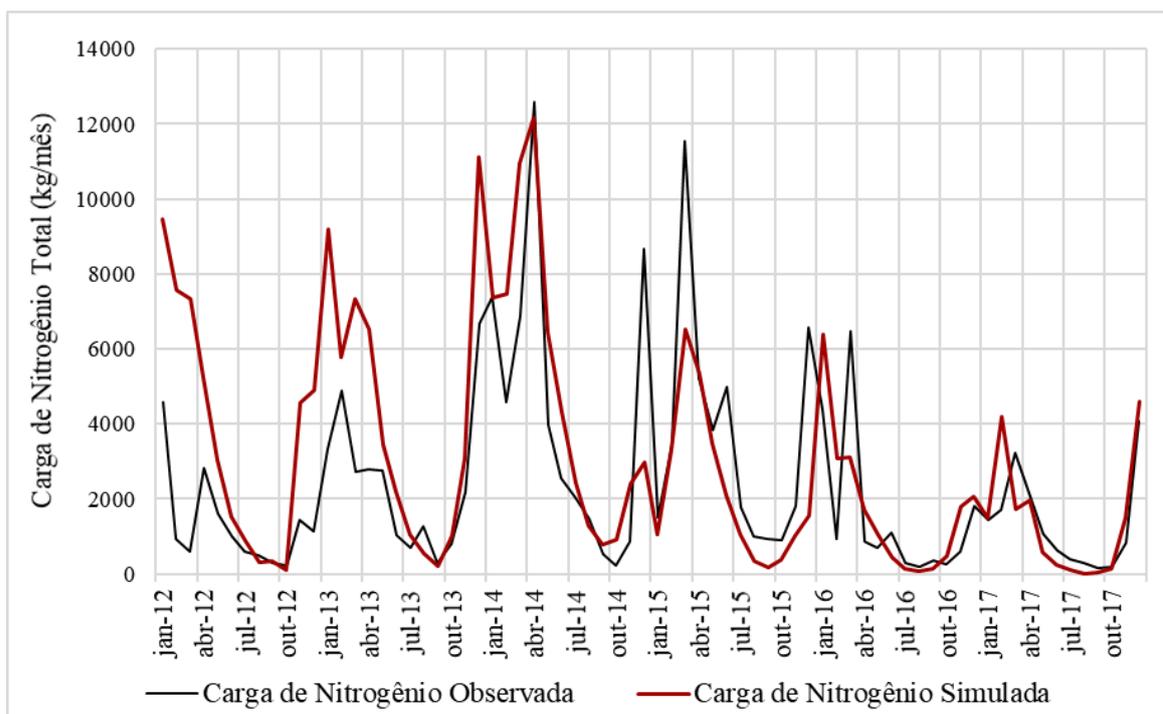


Figura 5.33 - Simulação mensal da carga de nitrogênio na verificação de 2012 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

Mesmo com desempenho insatisfatório, a verificação do nitrogênio para o período de 2012 a 2017 apresentou resultados melhores que a verificação da vazão e da carga de fósforo para o mesmo período. A classificação como boa segundo o PBIAS indica que, apesar da superestimação evidente em 2012 e 2013, houve um equilíbrio entre superestimações e subestimações da simulação em relação aos valores observados.

Analisando a Figura 5.33, é possível perceber que as mínimas estão melhor representadas pela simulação, mas que a curva não consegue acompanhar o padrão imposto pelos dados observados, causando superestimação da carga de nitrogênio, principalmente entre 2012 e 2014. Justamente entre 2010 e 2013 houveram algumas falhas na série de concentração de nitrogênio total que foram preenchidas pela soma dos compostos nitrogenados, que são nitrato, nitrito e nitrogênio amoniacal, quando esses existiam.

Já a verificação da simulação da carga de nitrogênio realizada para o período de 2015 a 2017 apresenta desempenho satisfatório pelos critérios NSE e RSR, e muito boa pelo critério PBIAS, como pode ser verificado na Tabela 5.13.

Pesquisas realizadas na China também apresentam resultados satisfatórios para verificação da simulação da carga de nitrogênio. Autores que já foram citados anteriormente no presente trabalho, Shi *et al.* (2017) realizaram verificação em duas estações na bacia do rio Pengxi, no reservatório de Três Gargantas, e obtiveram NSE de 0,70 e 0,75, e R² de 0,79 e 0,78 em 2013. Wu *et al.* (2018) verificaram as bacias do distrito irrigado de Hetao, de 2011 a 2013, e obtiveram NSE de 0,48, considerado insatisfatório, mas aceitável.

Tabela 5.13 - Desempenho da simulação de nitrogênio na verificação de 2015 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

| Variável estatística | Valor | Classificação (Moriassi et al, 2007) |
|-----------------------------|--------------|--|
| NSE | 0,55 | Satisfatória |
| RSR | 0,67 | Satisfatória |
| PBIAS | 18,28 | Muito boa |
| R ² | 0,57 | Satisfatória |

Graficamente, ao observar a Figura 5.34, vemos que verificação da simulação da carga de nitrogênio é classificada como satisfatória, mas não se adequa de maneira tão boa à carga

de nitrogênio observada. Há uma defasagem evidente entre novembro de 2015 e fevereiro de 2016, porém não foi possível verificar o motivo dessa ocorrência.

O PBIAS positivo indica subestimação da simulação em relação aos dados observados, o que pode ser verificado durante todo o ano de 2015, e em grandes porções dos anos 2016 e 2017. A superestimação da carga de nitrogênio de outubro de 2016 a março de 2017 coincide com o período de chuvas em uma época em que a precipitação que possa ter ocorrido na bacia não foi convertida em cargas mais altas de nitrogênio.

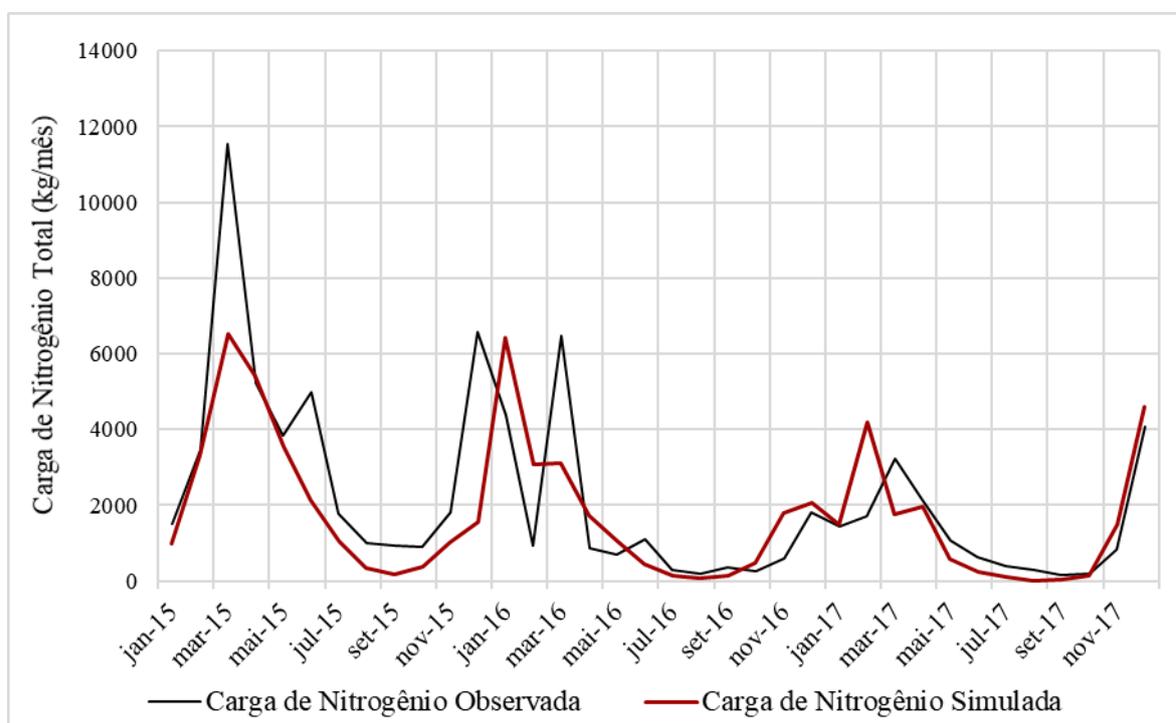


Figura 5.34 - Simulação mensal da carga de nitrogênio na verificação de 2015 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

5.2.4.3 - Fósforo Total

A verificação da simulação da carga de fósforo realizada para o período de 2012 a 2017 teve desempenho insatisfatório pelos critérios pela maioria dos critérios, com exceção do PBIAS, que foi satisfatório, como exposto na Tabela 5.14. Resultados insatisfatórios também foram encontrados por Nunes (2016), na verificação das bacias afluentes ao Lago Paranoá, sendo que a simulação de fósforo no Riacho Fundo teve NSE de -0,22, RSR de 2,14, PBIAS de -52,60 e R^2 de 0,20. Wu *et al.* (2018) obteve NSE de 0,42 na verificação da simulação de fósforo das bacias do distrito irrigado de Hetao, China, em 2013.

Tabela 5.14 - Desempenho da simulação de fósforo na verificação de 2012 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

| Variável estatística | Valor | Classificação (Moriassi et al, 2007) |
|----------------------|--------|---|
| NSE | -0,28 | Insatisfatória |
| RSR | 1,13 | Insatisfatória |
| PBIAS | -64,08 | Satisfatória |
| R ² | 0,03 | Insatisfatória |

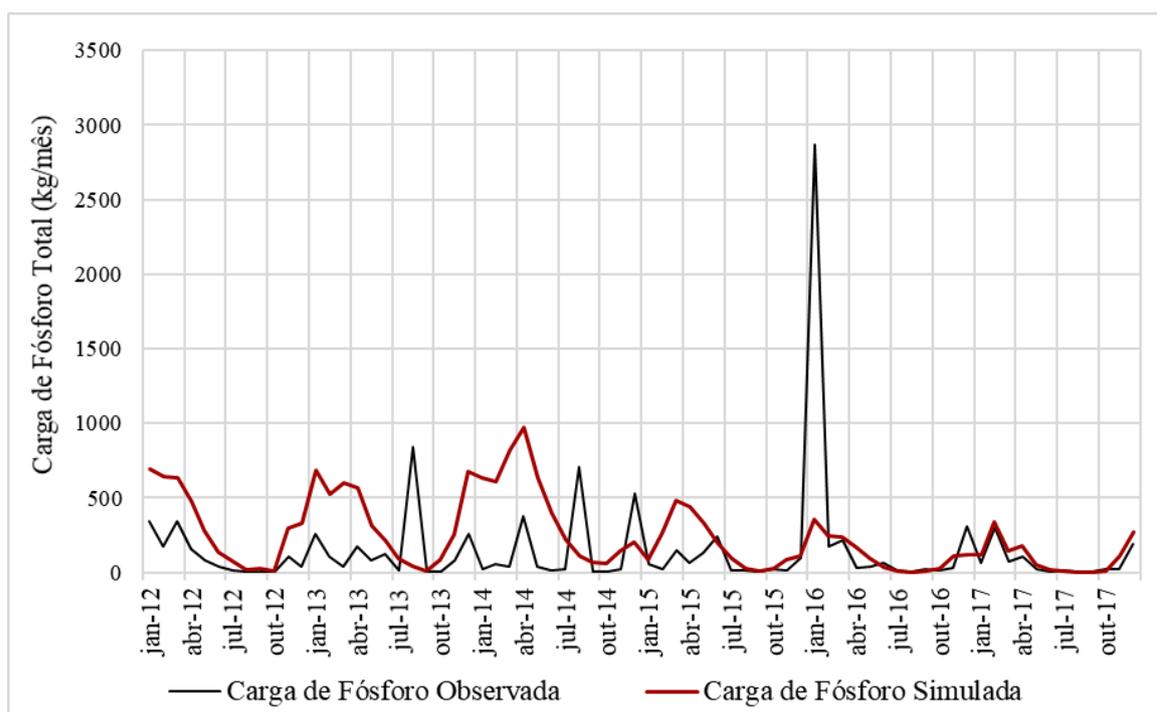


Figura 5.35 - Simulação mensal da carga de fósforo na verificação de 2012 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

A Figura 5.35 mostra a tendência do modelo em superestimar as cargas de fósforo, principalmente nas estações chuvosas de entre os anos de 2012, 2013, 2014 e 2015. Explicou-se anteriormente que os dados observados da vazão não são bem representados pela simulação de 2012 a 2014. Como a carga de fósforo costuma estar associada ao carreamento de sedimentos, é possível que a inadequação da simulação de vazão tenha resultado em desempenho insatisfatório da simulação da carga de fósforo.

A verificação da simulação da carga de fósforo realizada em um período mais curto, de 2015 a 2017, vista na Tabela 5.15, teve desempenho um pouco melhor, com classificação muito boa segundo o PBIAS, o que indica uma boa aderência da curva simulada à curva observada. Segundo as outras variáveis estatísticas o desempenho foi insatisfatório.

Outras verificações de simulações de cargas de fósforo realizadas na China apresentam um desempenho muito melhor. Shen *et al.* (2013) utilizaram dados de quatro estações na verificação das cargas de fósforo nas bacias do reservatório de Três Gargantas, e obtiveram NSE de 0,53 a 0,68 e R^2 de 0,70 a 0,89 de 2005 a 2009. Alguns anos mais tarde, Shi *et al.* (2017) utilizou dados de duas estações na verificação das cargas de fósforo, e obtiveram NSE de 0,81 e 0,86 e R^2 de 0,86 em ambas as estações, em 2013 da bacia do rio Pengxi, na região do mesmo reservatório.

Tabela 5.15 - Desempenho da simulação de fósforo na verificação de 2015 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

| Variável estatística | Valor | Classificação (Moriasi et al, 2007) |
|----------------------|-------|--|
| NSE | 0,13 | Insatisfatória |
| RSR | 0,93 | Insatisfatória |
| PBIAS | 12,11 | Muito boa |
| R^2 | 0,15 | Insatisfatória |

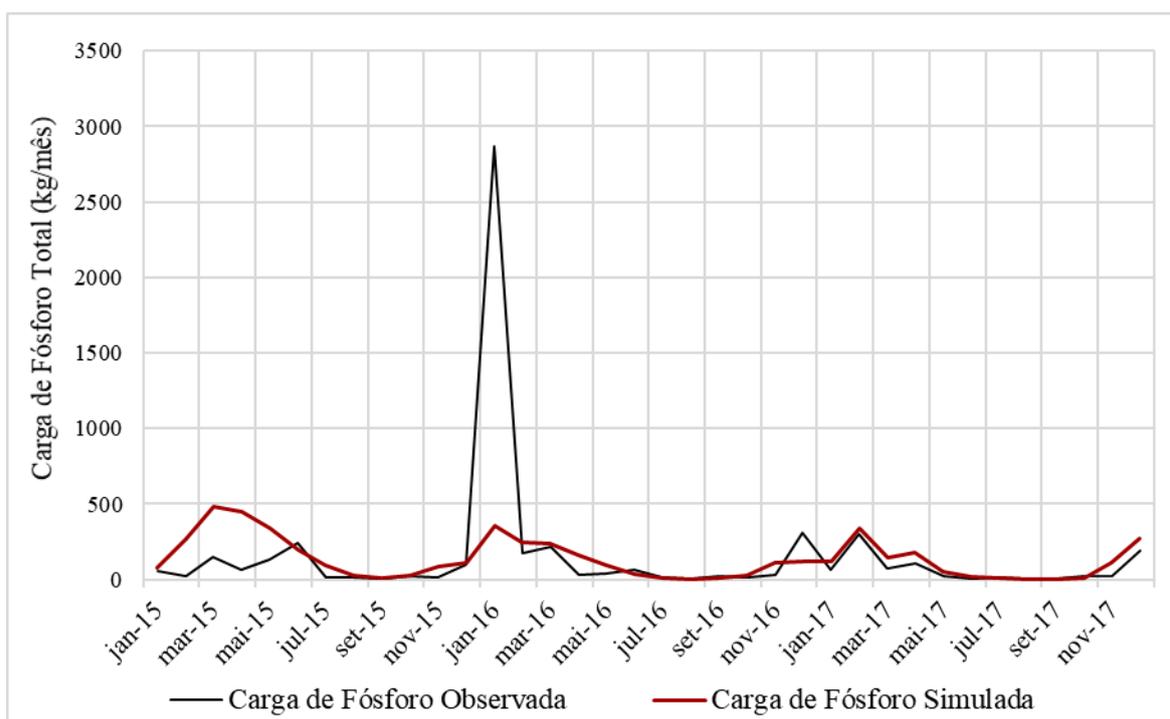


Figura 5.36 - Simulação mensal da carga de fósforo na verificação de 2015 a 2017 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

Percebe-se na Figura 5.36 que a simulação da carga de fósforo se adequa razoavelmente aos dados observados, principalmente no que pode ser considerado período de recessão dos anos 2015 e 2016, e durante todo o ano de 2017. O pico que ocorre na carga observada em

janeiro de 2016 é resultado de uma alta concentração de fósforo associado a uma vazão mais alta, que parece não ter sido percebida pelo modelo.

5.2.5 - Simulação diária e comparação com dados monitorados

A simulação diária foi realizada para as variáveis vazão (m^3/s), nitrogênio total (kg/dia), nitrato (kg/dia), nitrito (kg/dia), nitrogênio amoniacal (kg/dia) e fósforo total (kg/dia) do dia 1º de julho de 2017 ao dia 28 de fevereiro de 2018. Foram usados dados gerados no monitoramento semanal para a comparação com as simulações.

A simulação diária da vazão teve desempenho bastante insatisfatório para todos os critérios apresentados por Moriasi *et al.* (2007), como pode ser visto na Tabela 5.16. Como foi utilizada uma base de dados com parâmetros calibrados para a simulação mensal de vazão, um resultado insatisfatório na simulação diária não é fora do comum.

Tabela 5.16 - Desempenho da simulação diária da vazão de jul-2017 a fev-2018 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

| Variável estatística | Valor | Classificação (Moriasi et al, 2007) |
|----------------------|--------|--|
| NSE | -2,60 | Insatisfatória |
| RSR | 1,90 | Insatisfatória |
| PBIAS | -69,61 | Insatisfatória |
| R ² | 0,28 | Insatisfatória |

Ferrigo (2014) realizou a simulação diária da vazão para a bacia do Rio Descoberto, de outubro de 2005 a setembro de 2010. A simulação com parâmetros calibrados teve NSE de 0,40 e R² de 0,44, discutidos pela autora como uma melhora estatística quando comparados aos coeficientes da simulação inicial, que foram NSE de -0,57 e R² de 0,24. Em outra bacia do Distrito Federal, no Alto Rio Jardim, Castro (2013) obteve resultados satisfatórios na calibração do modelo de julho de 2006 a junho de 2007, com NSE de 0,60, mas insatisfatórios na verificação de julho de 2007 a junho de 2008, com NSE de -0,84.

Percebe-se na Figura 5.37 que a vazão simulada procura acompanhar a chuva observada, o que é esperado considerando que a precipitação é um dos dados de entrada do modelo. Ainda assim, existe uma superestimação demasiada, evidenciada pelo valor de PBIAS, que está negativo e muito distante de zero.

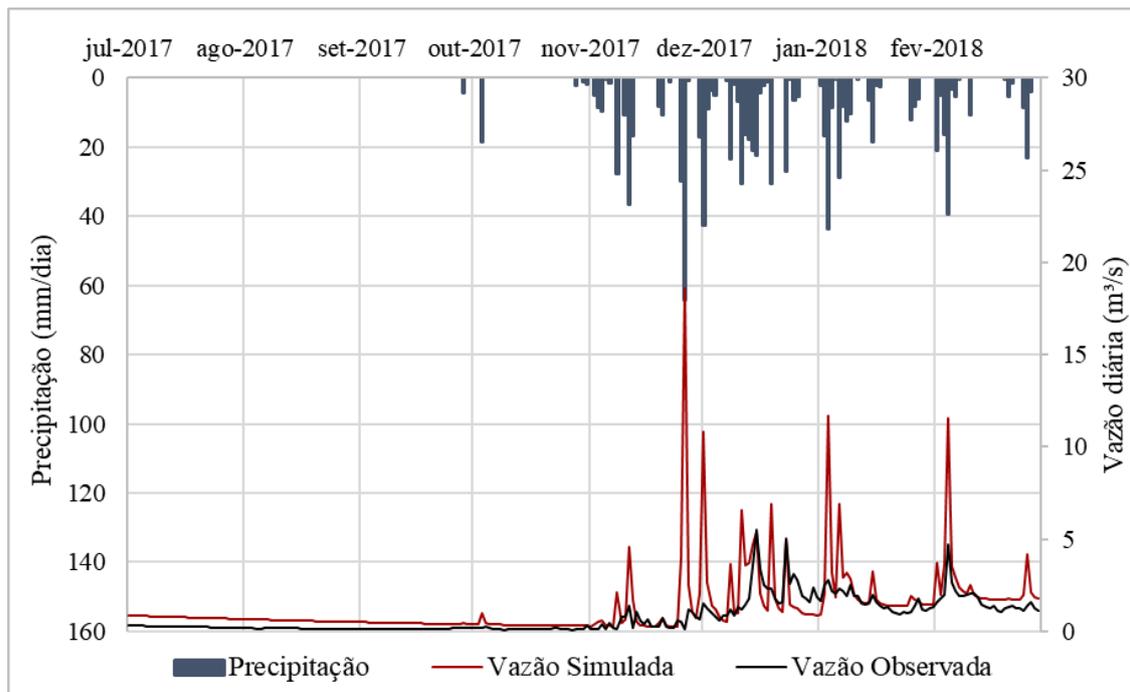


Figura 5.37 - Simulação diária da vazão de jul-2017 a fev-2018 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

Observa-se a tendência do modelo de superestimar as vazões em novembro de 2017, e em janeiro e fevereiro de 2018. A única exceção é o final do mês de dezembro de 2017, quando o modelo subestima a vazão.

Assim como para a vazão, a simulação das cargas diárias de fósforo total segue o padrão ditado pela precipitação. Na Figura 5.38 é evidente que o modelo está superestimando as cargas de fósforo total.

No entanto, durante todo o período de estiagem é possível observar a equivalência entre valores observados e simulados, mostrando que pelo menos nesse período, o modelo simula mais adequadamente as cargas de fósforo. Algumas cargas são mais altas após eventos de chuva, e existe correspondência entre os valores observados e simulados em algumas semanas dos meses de dezembro de 2017, janeiro e fevereiro de 2018.

A simulação diária da carga de nitrato, na Figura 5.39, apresenta um comportamento peculiar. O modelo prevê cargas altas em julho, que descendem gradativamente até outubro de 2017. No início do período de chuvas, que nesse ano ocorreu no final de outubro, e se intensificou em novembro, o modelo parece tentar simular a carga de nitrato

de acordo com a precipitação, mas subestimando as cargas de nitrato em dezembro de 2017 e janeiro de 2018.

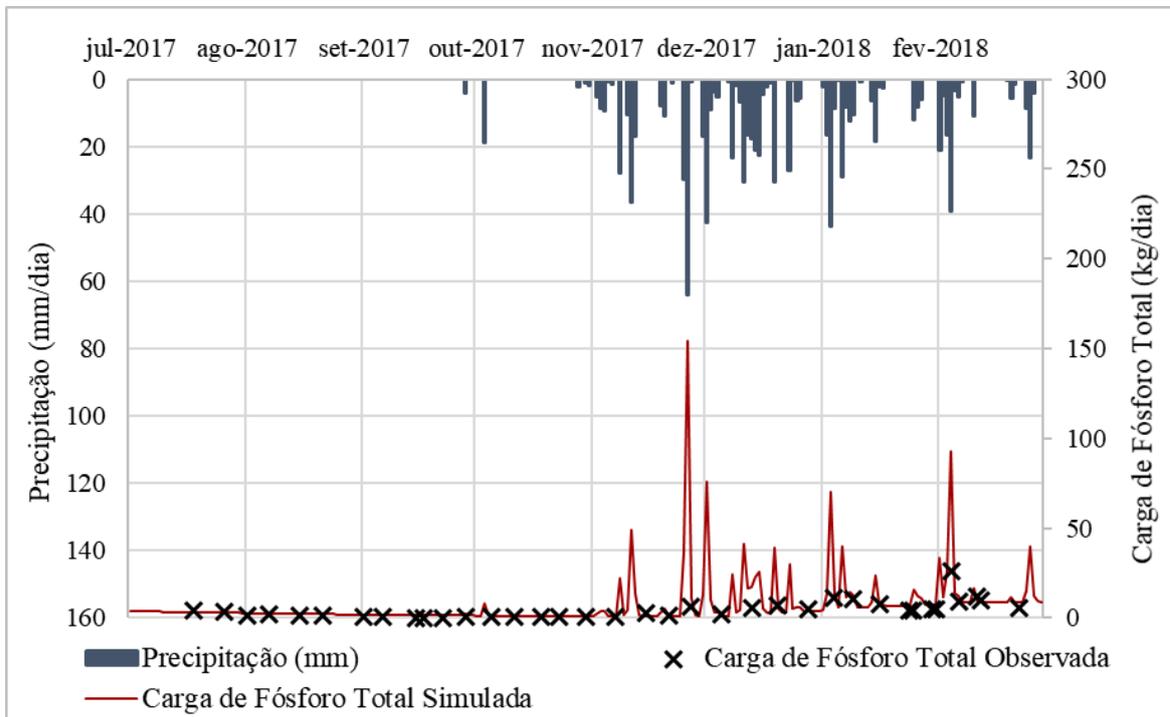


Figura 5.38 - Simulação diária da carga de fósforo total de jul-2017 a fev-2018 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

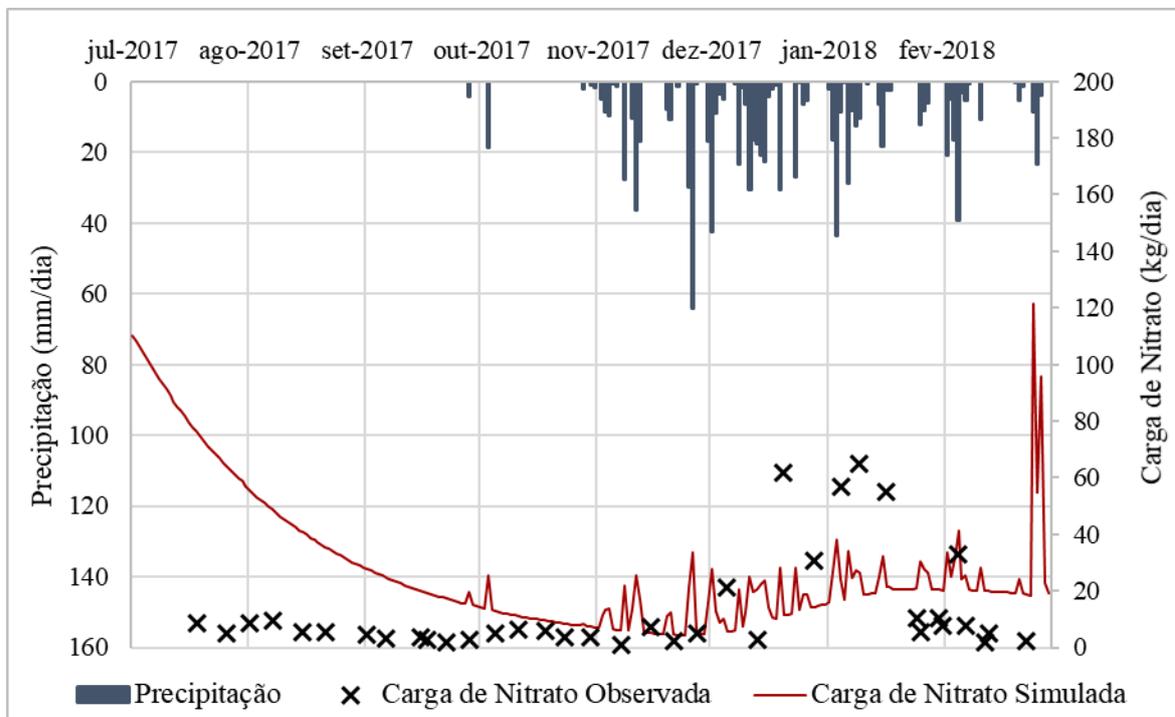


Figura 5.39 - Simulação diária da carga de nitrato de jul-2017 a fev-2018 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

Sullivan e Gao (2016) obtiveram resultados satisfatórios, ainda que superestimados, tanto na calibração, de 1996 a 1998, quanto na verificação, de 1999 a 2001, da simulação da carga mensal de nitrato na bacia do riacho Dry Comal, Texas. Lubitz *et al.* (2013) simularam as cargas diárias de nitrato e nitrito para a bacia do ribeirão Concórdia, em Santa Catarina, e compararam com monitoramento mensal de 2006 a 2009, resultando em simulações insatisfatórias e não correspondentes à carga na bacia, gerando subestimação da carga de nitrito para essa bacia.

A carga diária simulada de nitrito, na Figura 5.40, tem comportamento bastante atípico. Enquanto que as cargas observadas acompanham a ocorrência de vazões mais altas, a simulação sofre variação bem pequena, em torno de 0,04 a 0,2 kg/dia. Assim, é evidente que o modelo subestima as cargas de nitrito no ribeirão Rodeador.

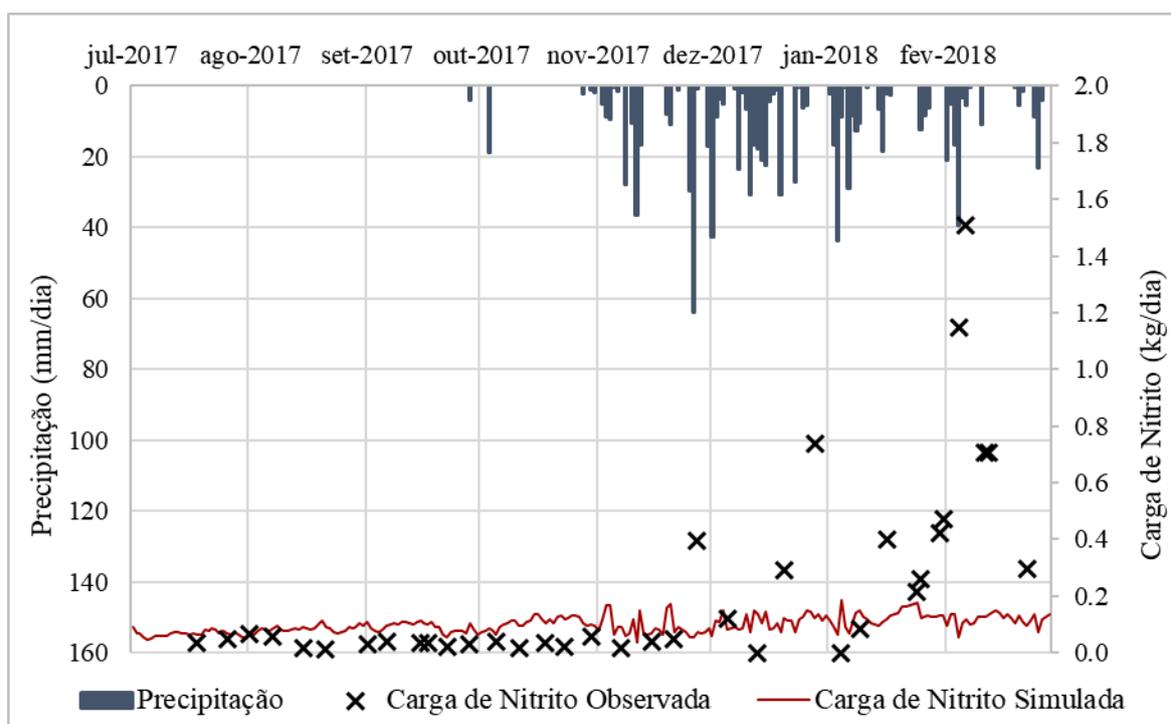


Figura 5.40 - Simulação diária da carga de nitrito de jul-2017 a fev-2018 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

A simulação da carga de nitrogênio amoniacal, assim como a carga de nitrogênio total, tenta acompanhar as variações na vazão do ribeirão Rodeador. No entanto, as cargas observadas de nitrogênio amoniacal são muito mais altas, como observado na Figura 5.41. Shen *et al.* (2013) realizaram calibração, de 2000 a 2004, e verificação, de 2005 a 2009, da

simulação da carga de nitrogênio amoniacal em três estações da região do reservatório de Três Gargantas, com resultados satisfatórios em todas as simulações.

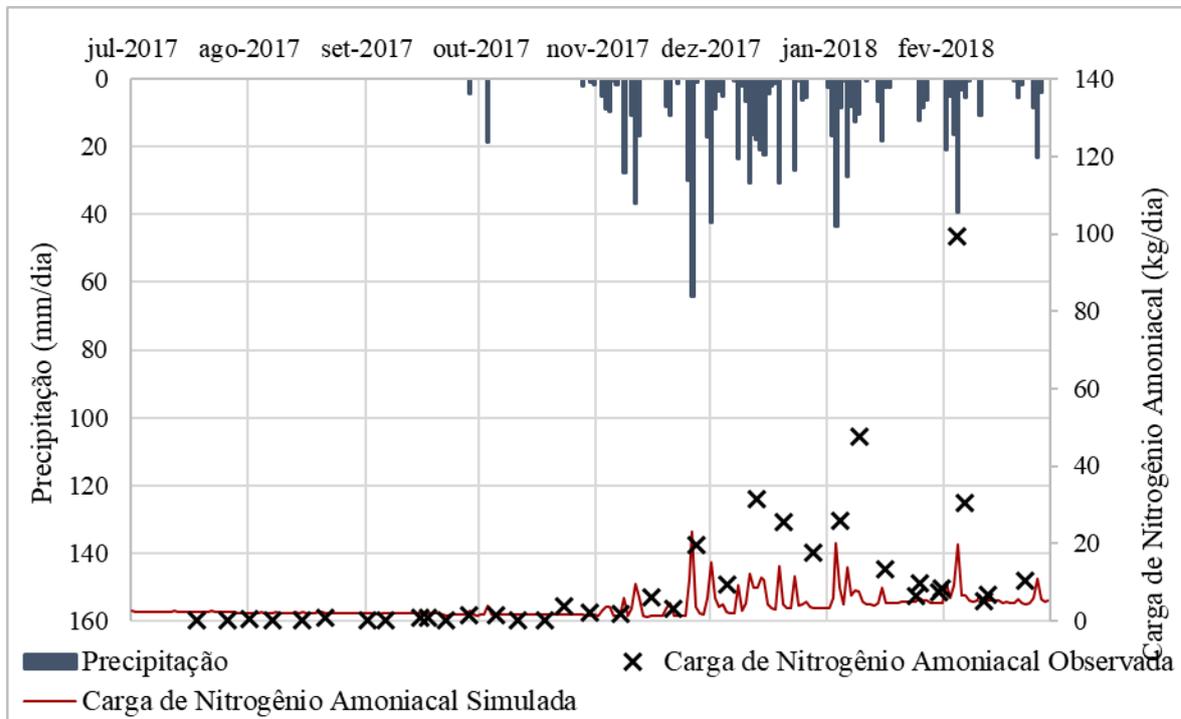


Figura 5.41 - Simulação diária da carga de nitrogênio amoniacal de jul-2017 a fev-2018 para o modelo SWAT aplicado à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF.

6 - CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo analisar aspectos quantitativos e qualitativos das águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador baseada na intensificação do monitoramento da qualidade da água e na simulação mensal e diária de vazão e nutrientes. Em geral, os resultados apontam para uma boa qualidade do Ribeirão Rodeador, e para a representação satisfatória dos processos de geração de vazão e carga de poluentes na bacia.

O monitoramento semanal do ponto no exutório da bacia mostra que as concentrações de compostos de nitrogênio e fósforo, e DQO são baixas e bastante variáveis, dificilmente apresentando a tendência de acompanhar os incrementos de vazão. Já a turbidez, como é esperado para esse parâmetro, aumenta na ocorrência de vazões mais altas, devido ao carreamento de sólidos provocado pelas chuvas.

A análise das cargas de poluentes em diferentes frequências aponta para subestimações dessas cargas, principalmente durante o período chuvoso. Esse fator é preocupante quando há a subestimação da concentração de poluentes no corpo hídrico, como foi para fósforo total e nitrato. Outros parâmetros tinham frequência maior, e não foi possível avaliar se seriam adequadamente mensurados pelo monitoramento padrão. Assim, é possível inferir que a frequência mensal é suficiente nos meses de estiagem, mas gera dados que podem não corresponder à realidade da bacia nos meses chuvosos.

A amostragem contínua com equipamento de coleta automática apresentou-se como uma ferramenta diferenciada e muito útil na obtenção de amostras em intervalos sub-diários. As análises noturnas apontam para a ocorrência de concentrações mais altas que as médias encontradas nas amostras discretas, principalmente após eventos de chuva, mesmo que apresentem valores intermitentes durante esses eventos. Recomenda-se a avaliação mais detalhada e frequente das concentrações sub-diárias de poluentes, se possível com a instalação do equipamento de amostragem contínua durante alguns dias seguidos, e de preferência durante a estação chuvosa.

A verificação da qualidade da água em dois pontos de monitoramento aponta para níveis pouco variáveis dos parâmetros ao longo do Ribeirão Rodeador. Os eventos de medições à montante foram pouco, por isso aconselha-se, para projetos futuros, que sejam feitas mais visitas a campo para a avaliação de ambos os pontos.

A modelagem hidrológica da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador, em relação à calibração dos parâmetros de vazão, de 2000 a 2011, e simulação de verificação, de 2015 a 2017, exibem resultados satisfatórios, com variáveis estatísticas dentro dos valores preconizados pela literatura. A única exceção foi a verificação para o período de 2012 a 2017, que apresentou resultados insatisfatórios.

No caso de nitrogênio total e fósforo total, os resultados de calibração dos parâmetros, de 2000 a 2011, e verificação das simulações, tanto no período de 2012 a 2017 quanto no período de 2015 a 2017 foram insatisfatórios segundo os intervalos apresentados na literatura. Porém, após a calibração dos parâmetros, as variáveis estatísticas apresentaram melhora significativa em relação à modelagem sem calibração.

A comparação das simulações diárias com os parâmetros analisados no monitoramento semanal foi insatisfatória para nitrato, nitrito e nitrogênio amoniacal. No entanto, as simulações diárias de nitrogênio total e fósforo total mostram um certo nível de correspondência com o observado no monitoramento semanal.

Conclui-se que, apesar de alguns resultados insatisfatórios, o monitoramento da qualidade da água e a modelagem quantitativa e qualitativa foram bem-sucedidos no aprimoramento dos dados disponibilizados e das simulações realizadas, e melhoram a compreensão dos processos que ocorrem na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador.

7 - PERSPECTIVAS FUTURAS

Em relação ao monitoramento, as perspectivas futuras seriam a continuação de frequências mais constantes de coletas, principalmente em períodos chuvosos. Idealmente, seria aconselhável a adoção de frequências incrementais para esses períodos, quando a qualidade do corpo hídrico é mais variável.

Ademais, seria interessante realizar novas campanhas de amostragem contínua, se possível durante alguns dias seguidos nos meses chuvosos, para averiguar as concentrações e cargas que ocorrem no corpo hídrico em momentos que vão além da amostragem discreta.

No que concerne a simulação hidrológica, aconselha-se calibrar os parâmetros do SWAT para a simulação diária no ribeirão Rodeador, pois é notável a diferença que ocorreu nas simulações mensais e diárias.

Por fim, como a frequência de coletas para análises de parâmetros físico-químicos que seriam necessárias à calibração é inviável logisticamente e economicamente, recomenda-se utilizar dados mais frequentes, semanais ou de alguns dias, para realizar comparações das simulações com os dados observados para procurar respostas para a não correspondência entre as duas séries de dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, L. M. (2016). *Integração entre curvas de permanência de qualidade de água e modelagem hidrológica como suporte à gestão de recursos hídricos - Estudo de caso da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF*. Monografia de Projeto Final em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. 69p.
- APHA. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 22^a ed. American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation, Washington, DC.
- Arnold, J. G.; Kiniry, J. R.; Srinivasan, R.; Williams, J. R.; Haney, E. B. Neitsch, S. L. (2012). *Input/Output Documentation: version 2012*. Texas Water Resources Institute, Temple, TX.
- Bonumá, N. B.; Reichert, J. M.; Rodrigues, M. F.; Monteiro, J. A. F.; Arnold, J. G.; Srinivasan, R. *Modeling surface hydrology, soil erosion, nutrient transport and future scenarios with the ecohydrological SWAT model in Brazilian watersheds and river basins*. *Tópicos de Ciências do Solo*, 9:241-290.
- Brasil. (1997). *Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997*. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm>. Último acesso em. 09 de abril de 2017.
- Brasil. (2005). Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução n. 357 de 17 de março de 2005. Dispões sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 18 mar. 2005.
- Bressiani, D. A.; Gassman, P. W.; Fernandes, J. G. Garbossa, L. H. P.; Srinivasan, R.; Bonumá, N. B.; Mendiando, E. M. (2015). “Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects.” *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(3), 9-35.
- CAESB - Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. (2017). Disponível em: <<https://www.caesb.df.gov.br/>>. Último acesso em: 9 de abril de 2017.
- CAESB - Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. (2018). *Relatório da Administração - 2017*. Disponível em: <https://www.caesb.df.gov.br/images/arquivos_pdf/Relatorio-da-Administracao_2017.pdf>. Último acesso: 17 ago. 2018.

- Cameira, M. R.; Mota, M. (2017). “Nitrogen related diffuse pollution from horticulture production – mitigation practices and assessment strategies.” *Horticultura*, v. 3, n. 25.
- Castro, K. B. (2013). *Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada*. Dissertação de Mestrado em Geoprocessamento e Análise Ambiental, Instituto de Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília. 2013. 141p.
- CETESB/ANA. (2011). *Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos*. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo/Agência Nacional de Águas. CETESB, São Paulo; ANA, Brasília.
- Chen, C.; Gao, M.; Xie, D.; Ni, J. (2016). “Spatial and temporal variations in non-point source losses of nitrogen and phosphorus in a small catchment in the Three Gorges Region.” *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(257).
- CRH-DF. Conselho de Recursos Hídricos do Distrito Federal. (2014). *Resolução nº 02, de 17 de dezembro de 2014*. Aprova o enquadramento dos corpos de água superficiais do Distrito Federal em classes, segundo usos preponderantes, e dá encaminhamentos. Disponível em: <<http://www.sema.df.gov.br/wp-conteudo/uploads/2017/09/Resolucao-CRH-n-02-de-2014.pdf>>. Último acesso: 02 out. 2018.
- Dechmi, F.; Burguete, J.; Skhiri, A. (2012). “SWAT application in intensive irrigation systems: model modification, calibration and validation.” *Journal of Hydrology*, 470, 227-238.
- Elshorbagy, A.; Teegavarapu, R. S. V.; Ormsbee, L. (2005). “Total Maximum Daily Load (TMDL) approach to surface water quality management: concepts, issues and applications.” *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32, 442-448.
- Ferreira, A. N.; Silva, J. S.; Brites, C. R. C.; Ferrigo, S. (2017). “Modelagem hidrológica da bacia do Riacho Fundo no Distrito Federal utilizando o modelo SWAT.” In: *XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Florianópolis, 2017.
- Ferrigo, S. (2014). *Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática - Estudo de caso da bacia do lago Descoberto - DF*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. 2014. 164p.

- Gassman, P. W.; Reyes, M. R.; Green, C. H.; Arnold, J. G. (2007). "The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications and future research directions." *Transactions of the ASABE*, v. 50, n. 4, 1211-1250.
- Goulding, K. W. T. (2006). "Nitrate leaching from arable and horticultural land." *Soil Use and Management*, 16(1), 145-151.
- Herrera, D. J. M. (2013). *Integração de modelos de quantidade e qualidade da água para avaliação de cargas de contaminantes em afluentes de mananciais de abastecimento*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. 2013. 120p.
- Jones, C.; Kim, S.; Schilling, K. (2017). "Use of continuous monitoring to assess stream nitrate flux and transformation patterns." *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(35).
- Kaufmann, V.; Pinheiro, A.; Castro, N. M. R. (2014). "Transporte de compostos de carbono, nitrogênio e fósforo pelo escoamento de água em solo agrícolas na região sul do Brasil." *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, pp. 75-86.
- Lima, J. B. M. (2004). *Estudo de redes de monitoramento de qualidade das águas superficiais - o caso da bacia do rio Descoberto*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. 2004. 112p.
- Lima, J. E. F. W.; Montenegro, S. M. G. L.; Montenegro, A. A. A.; Koide, S. (2014). "Comparative hydrology: relationship among physical characteristics, hydrological behaviour, and results of SWAT model in different regions of Brazil." *Revista Brasileira de Geografia Física*, 7(6), 1187-1195.
- Lorz, C. *et al.* (2012). "Challenges of an integrated water resource management for the Distrito Federal, Western Central Brazil: climate, land-use and water resources." *Environmental Earth Sciences*, 65, 1575-1586.
- Malheiros, T. F.; Prota, M. G.; Rincón, M. A. P. (2013). "Participação comunitária e implementação dos instrumentos de gestão da água em bacias hidrográficas." *Revista Ambiente & Água*, 8(1), 98-118.
- Marques, M. N.; Cotrim, M. B.; Pires, M. A. F. (2011). "Avaliação do impacto da agricultura em áreas de proteção ambiental, pertencentes à bacia hidrográfica do Rio Ribeira de Iguape, São Paulo." *Química Nova*, v. 30, n. 5, p. 1171-1178.

- Moriasi, D. N.; Arnold, J. G.; Van Liew, M. W.; Bingner, R. L.; Harmel, R. D.; Veith, T. L. (2007). "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations." *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Neitsch, S. L.; Arnold, J. G.; Kiniry, J. R.; Williams, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation: version 2009*. Agricultural Research Service; Texas Agricultural Experiments Station; Texas Water Resources Institute, Temple, TX.
- Novotny, V. (2007). "Diffuse pollution from agriculture: ecological sustainability, food production or both." *Water 21* (IWA).
- Nunes, G. (2016). *Aplicação do modelo SWAT no estudo hidrológico e de qualidade de água da bacia do Lago Paranoá – DF*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. 2016. 148p.
- Passig, F. H.; Lima, S. B.; Carvalho, K. Q.; Halmeman, M. C. R.; Souza, P. C.; Gusmão, L. K. (2015). "Monitoring of urban and rural basins: water quality of Mourão basin." *Brazilian Journal of Biology*, v. 75, n. 4(2), S158-S164.
- Passos, A. L. L. (2018). *Seleção de melhores parâmetros na definição de um índice de qualidade de água para o Distrito Federal*. Dissertação de Mestrado em Ciências Ambientais, Faculdade de Planaltina, Universidade de Brasília. 2018. 74p.
- Pechlivanidis, I. G.; Jackson, B. M.; McIntyre, N. R.; Weather, H. S. (2011). "Catchment scale hydrological modelling: A review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis Methods in the contexto of recente developments in technology and applications." *Global NEST Journal*, v. 13, 193-214.
- Rathunde, P. H.; Giordani, S.; Fedalto, G. (2013). "Programa de gestão do aporte de nutrientes na bacia hidrográfica do rio Tibagi." In: *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Bento Gonçalves, RS.
- Reatto, A.; Martins, E. S.; Cardoso, E. A.; Spera, S. T.; Carvalho Jr., O. A. C.; Silva, A. V.; Farias, M. F. R. (2003). Levantamento de reconhecimento de solos de alta intensidade do alto curso do rio Descoberto, DF/GO, escala 1:100000. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento Nº 92. EMBRAPA Cerrados, Distrito Federal, 2003.
- Robertson, D. M.; Roerish, E. D. (1999). "Influence of various water quality sampling strategies on load estimates for small streams." *Water Resources Research*, v. 35, n. 12, 3747-3759.

- Salles, L. A. (2012). Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pípiripau. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. 2012. 114p.
- Salles, L.A.; Lima, J.E.F.W.; Chaves, H.M.L.; Ferrigo, S.; Carvalho, H.E.S. (2015). “Impacts of using different soil databases on streamflow simulation in an experimental rural catchment of the Brazilian Savanna.” *Revista Brasileira de Geografia Física*, 8(1), 187-195.
- Santos, G. O.; Hernandez, F. B. T. (2012). “Uso do solo e monitoramento dos recursos hídricos no córrego do Ipê, Ilha Solteira, São Paulo.” *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 1, 60-68.
- São Paulo (Estado). (2011). Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas, e efluentes líquidos*. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011. 326p.
- Schneider, V. E.; Marques, R. V.; Bortolin, T. A.; Cemin, G.; Santos, G. M. (2016). “Monitoring and assessment of surface water quality in Taquari-Antas Watershed, South Brazil – region with intensive pig farming.” *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(617), 1-13.
- Shen, Z.; Chen, L.; Hong, Q.; Qiu, J.; Xie, H.; Liu, R. (2013). “Assessment of nitrogen and phosphorus loads and causal factors from different land use and soil types in the Three Gorges reservoir area.” *Science of the Total Environment*, v. 454-455, 383-392.
- Shi, Y.; Xu, G.; Wang, Y.; Engel, B. A.; Peng, H.; Zhang, W.; Cheng, M.; Dai, M. (2017). “Modelling hydrology and water quality processes in the Pengxi river basin of the Three Gorges Reservoir using the soil and water assessment tool.” *Agricultural Water Management*, 182, 24-38.
- Silva, I. R. O. *Aplicação do método de cargas máximas totais diárias de nutrientes na bacia do córrego Rodeador – DF*. (2016). Monografia de Projeto Final em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. 79p.
- Soroshian, S.; Gupta, V. K. (1995) Model Calibration, Chapter 2 of Computer Models and Watershed Hydrology, Edited by V. J. Singh, *Water Resources Publications*, Highlands Ranch, Colorado.

- Sprague, L. A.; Oelsner, G. P.; Argue, D. M. (2017). "Challenges with secondary use of multi-source water quality data in the United States." *Water Research*, 110, 252-261.
- Sullivan, T. P.; Gao, Y. (2016). "Assessment of nitrogen inputs and yields in the Cibolo and Dry Comal creek watersheds using the SWAT model, Texas, USA, 1996-2010." *Environmental Earth Sciences*, v. 75, n. 725.
- Taylor, S. D.; He, Y.; Hiscock, K. M. (2016). "Modelling the impacts of agricultural management practices on river water quality in Eastern England." *Journal of Environmental Management*, 180, 147-163.
- Teledyne Isco. (2017). *3700 Portable Samplers: Installation and Operation Guide*. Disponível em: < <http://www.teledyneisco.com/waterandwastewater/Sampler%20Documents/Manuals/3700%20Portable%20Sampler%20User%20Manual.pdf>>. Último acesso em: 24 de maio de 2017.
- Teza, C. T. V. (2008). Bacia hidrográfica do Alto Descoberto: as influências da ocupação e uso na disponibilidade hídrica para abastecimento público. Dissertação de Mestrado em Planejamento e Gestão Ambiental, Universidade Católica de Brasília. 2008. 102p.
- Tucci, C. E. M. (2005). *Modelos Hidrológicos*. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS.
- Tucci, C. E. M.; Mendes, C. A. (2006). *Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica*. Ministério do Meio Ambiente/SQA. Brasília: MMA.
- Tuck, G.; Matthews, A.M.; Harris, G.L.; Dailey, A.G.; Armstrong, A.C.; Addiscott, T.M. (2000). "Simulating nitrate concentrations in water draining from a small arable catchment in England." *Soil Use and Management*, 16, 66-70.
- Tundisi, J. G. (2008). "Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções." *Estudos Avançados*, 22, 7-16.
- Vidal, T. F.; Neto, J. C. (2013). "Aporte de nutrientes no período chuvoso em reservatório de abastecimento humano no estado do Ceará." In: *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 17 - 22 de novembro de 2013, Bento Gonçalves, RS.
- Wu, Y.; Shi, X.; Li, C.; Zhao, S.; Pen, F.; Green, T. R. (2017). "Simulation of hydrology and nutrient transport in the Hetao irrigation district, Inner Mongolia, China." *Water*, v. 9, n. 169.

APÊNDICES

APÊNDICE A - OPERAÇÕES DE MANEJO AUTOIRRIGAÇÃO E AUTOFERTILIZAÇÃO E EXTRAÇÃO DE ÁGUA SUPERFICIAL PARA IRRIGAÇÃO

Fertilizer Database Edit

Fertilizers

- 28-03-00
- 28-10-10
- 30-15-00
- 30-80-00
- 31-13-00
- 33-00-00
- 4-14-8
- 46-00-00
- Anhydrous Ammonia
- Beef-Fresh Manure
- Broiler-Fresh Manure
- Dairy-Fresh Manure
- Duck-Fresh Manure
- Elemental Nitrogen
- Elemental Phosphorous
- F.Osso
- Fert_Hortalica**
- Fert_Pomar
- Goat-Fresh Manure
- Horse-Fresh Manure
- Layer-Fresh Manure
- Sheep-Fresh Manure
- Swine-Fresh Manure
- T.Mamona
- Turkey-Fresh Manure
- Urea
- Veal-Fresh Manure

Fertilizer Parameters

Fertilizer Name
Fert_Hortalica

FERTNM (8 character)
F.Horta

FMINN (kg min N/kg fertilizer)
0.0125

FMINP (kg min P/kg fertilizer)
0.0117

FORGN (kg org N/kg fertilizer)
0.0302

FORGP (kg org P/kg fertilizer)
0.0203

FNH3N (kg NH3 N/kg min N)
0.2

Is Manure

BACTPDB (# cfu/g manure)
0

BACTLPDB (# cfu/g manure)
0

BACTFDDB (fraction)
0

Add New
Save Edits
Cancel Edits
Delete
Default
Exit

Figura A.1 - Fertilizante fictício “Fert_Hortalica” adicionado à base de dados do SWAT.

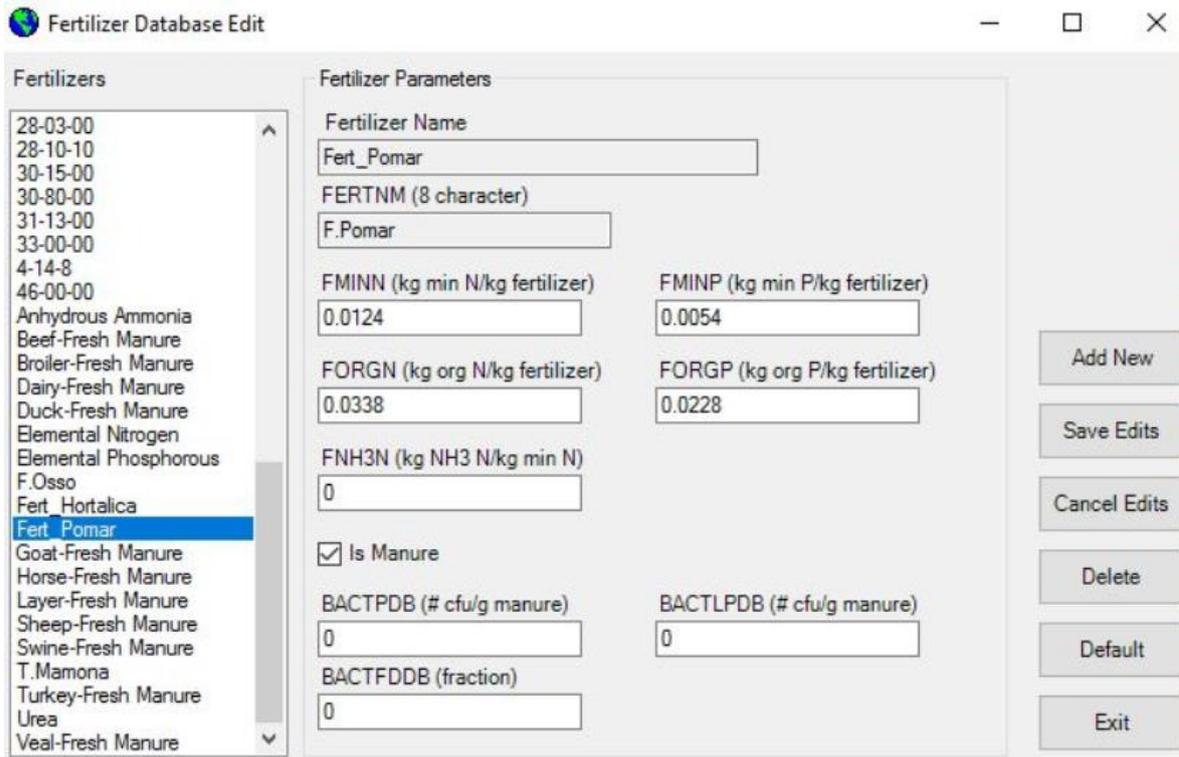


Figura A.2 - Fertilizante fictício “Fert_Pomar” adicionado à base de dados SWAT.

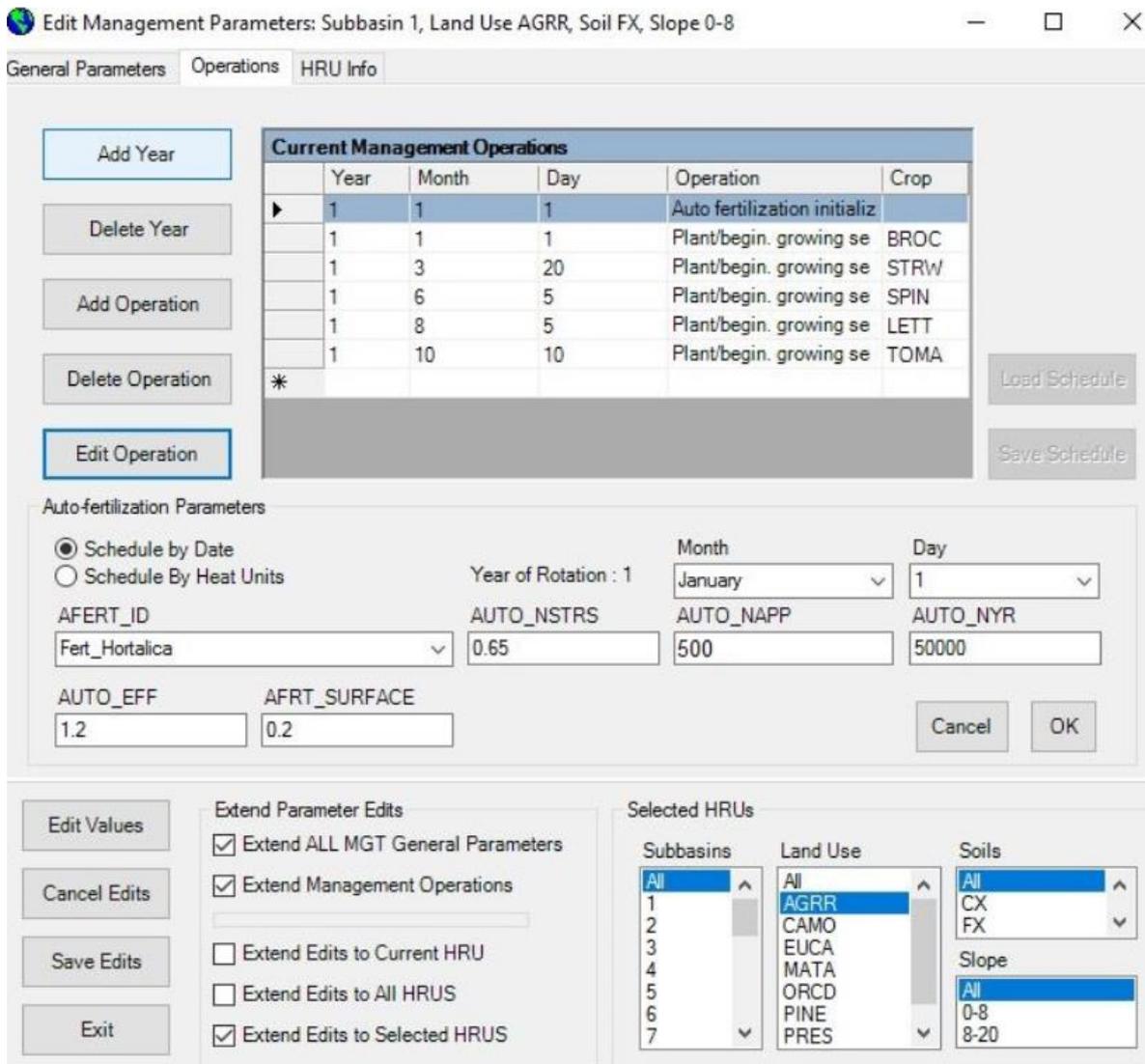


Figura A.3 - Opções de manejo: Inserção da operação “autofertilização”.

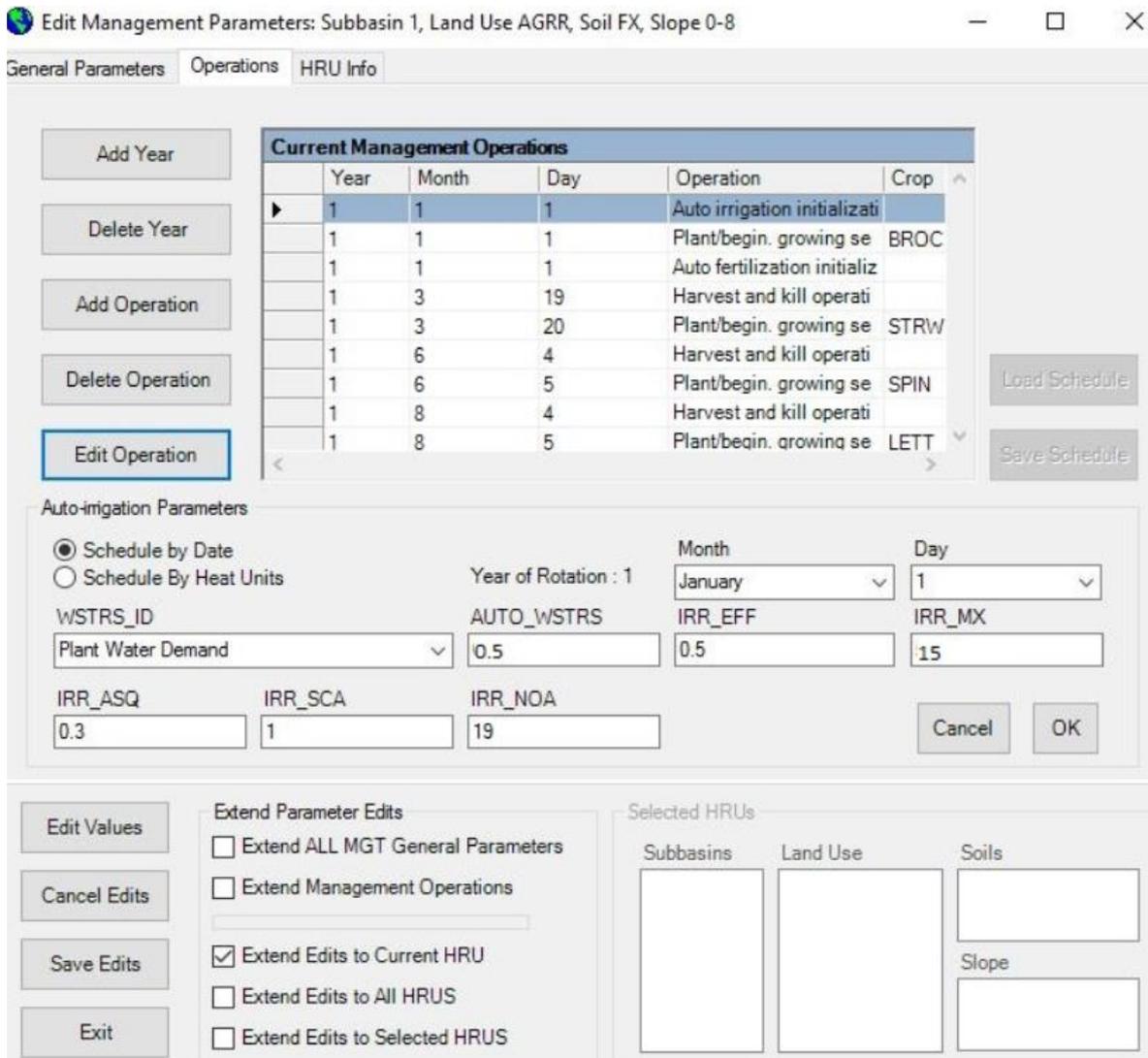


Figura A.4 - Opções de manejo: Inserção da operação “autoirrigação”.

Edit Management Parameters: Subbasin 1, Land Use AGRC, Soil CX, Slope 0-8

General Parameters | Operations | HRU Info

Initial Plant Growth

Initial Land Cover: No Crop Growing (dropdown) | LAI_INIT: 0 | BIO_INIT: 0 | PHU_PLT: 0

General Management

BIOMIX: 0.2 | CN2: 81 | USLE_P: 1 | BIO_MIN: 0 | FILTERW: 0

Urban Management

Urban Land Cover: No Urban Use (dropdown) | Urban Simulation Method: (dropdown)

Irrigation Management

Irrigation Source: Reach (dropdown) | Subbasin ID: 1 (dropdown) | FLOWMIN (m³/s): 0.1 | DIVMAX (+mm/-10⁴ m³): -5.616 | FLOWFR: 0.1

Tile Drain Management

DDRAIN (mm): 0 | TDRAIN (hr): 0 | GDRAIN (hr): 0

Special Management Options

Adjust Curve Numbers for Slope

Edit Values | **Cancel Edits** | **Save Edits** | **Exit**

Extend Parameter Edits

Extend ALL MGT General Parameters
 Extend Management Operations
 Extend Edits to Current HRU
 Extend Edits to All HRUS
 Extend Edits to Selected HRUS

Selected HRUs

| Subbasins | Land Use | Soils |
|-----------|----------|-------|
| | | |
| | | Slope |

Figura A.5 - Opções de manejo: Fonte e quantidade de água extraída para irrigação.