

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

**ANÁLISE PROSPECTIVA DE DIFERENTES CENÁRIOS DE  
USO DO SOLO E PRÁTICAS DE MANEJO E  
CONSERVAÇÃO DE ÁGUA E SOLO EM BACIAS  
HIDROGRÁFICAS AGRÍCOLAS**

**PRISCILLA REGINA DA SILVA**

**ORIENTADOR: RICARDO TEZINI MINOTI**

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

**BRASÍLIA/DF: OUTUBRO – 2022**

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

**ANÁLISE PROSPECTIVA DE DIFERENTES CENÁRIOS DE USO DO  
SOLO E PRÁTICAS DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DE ÁGUA E  
SOLO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS AGRÍCOLAS**

**PRISCILLA REGINA DA SILVA**

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 PhD (ENC-UnB)**  
**(Orientador)**

---

**Prof. Sergio Koide**  
**(Examinador Interno)**

---

**Prof. Silvio Crestana**  
**(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 25 DE OUTUBRO DE 2022**

## FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, PRISCILLA REGINA DA

Análise prospectiva de diferentes cenários de uso do solo e práticas de manejo e conservação de água e solo em bacias hidrográficas agrícolas.

xvii, 191p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2022).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Modelagem Hidrológica

2. SWAT +

3. Conservação de Água e Solo

4. Cenários de uso do solo

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, P. R. (2022). Análise Prospectiva de Diferentes Cenários de Uso do Solo e Práticas de Manejo e Conservação de Água e Solo em Bacias Hidrográficas Agrícolas. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-/2022, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 191p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Priscilla Regina da Silva.

TÍTULO: Análise Prospectiva de Diferentes Práticas de Manejo e Conservação de Água e Solo em Bacias Hidrográficas Agrícolas.

GRAU: Mestre

ANO: 2022

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. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Priscilla Regina da Silva

priscilla.silva@emater.df.gov.br

Parque Estação Biológica, Ed. Sede Emater-DF, SHCN, Brasília - DF, 70770-915

Dedico a Deus,  
a meus pais Tânia e Reginaldo  
e ao meu marido Marcus,  
com muita gratidão.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, meu porto seguro, que me guia e conduz. Ele é quem ilumina todas as minhas escolhas, me ajuda a acertar e a caminhar em Sua direção. O Teu amor me envolve e me protege.

À minha família, em especial aos meus pais, Tânia e Reginaldo, pelo aconselhamento constante, pelo apoio contínuo e por sempre estarem presentes em minha vida. Ao meu irmão Gustavo e minha cunhada Brenda pela parceria, carinho e amizade. À minha avó Irene pelo apoio e acalento em dias complicados. Ao meu marido Marcus pela companhia de vida, suporte, paciência e compreensão. Às minhas amigas de vida, em particular a Karina, pelos momentos de descontração e carinho.

Ao meu orientador, Ricardo Minoti, meus sinceros agradecimentos pelos ensinamentos e orientação. Aos membros da banca examinadora, professor Sérgio Koide e Dr. Silvio Crestana, pela disponibilidade, comentários e contribuições.

Aos professores do PTARH, agradeço por todo conhecimento repassado, em especial os professores Sérgio Koide e Carlos Lima, os quais contribuíram fortemente em meu aprendizado no curso das disciplinas.

Aos colegas de turma, especialmente meu amigo Yanick, pela ajuda mútua e companheirismo, e também aos colegas do grupo de modelagem hidrológica do PTARH.

À Sara Ferrigo e Daniela Bressiani pelo repasse de conhecimentos e auxílio contínuo.

À Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (Emater-DF) por oportunizar o alcance de mais um propósito e por contribuir para meu delineamento profissional. Aos produtores rurais do Distrito Federal que trabalham com afinco para o desenvolvimento e a segurança alimentar de nossa região.

Aos colegas de trabalho da Emater, principalmente aos da Gerência de Meio Ambiente, Anne, Icléa, Juliano, Luiz Carlos, Luiz Eutímio, Marcos Lara e Sumar, e também aos colegas agrônomos que colaboraram com solicitude no repasse de informações, em especial o amigo Antônio Dantas.

À Equipe SWAT da Universidade do Texas pelo pronto atendimento às dúvidas e dificuldades observadas na utilização do modelo.

À CAESB, Adasa (Jorge Werneck), SLU, Embrapa e INMET, pela disponibilização dos dados.

A todos que contribuíram de maneira direta e indireta para a realização dessa dissertação, meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

O desenvolvimento de atividades agropecuárias está diretamente ligado à disponibilidade de recursos naturais e é continuamente afetado por eventos de instabilidade climática e de escassez hídrica. A utilização imprópria de espaços rurais, a destituição de áreas de vegetação nativa e, até mesmo, o emprego de práticas de manejo inadequadas e ultrapassadas, influenciam no comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica. Práticas de manejo e conservação de solo e água são consideradas alternativas técnicas potenciais no auxílio da continuação, aprimoramento e evolução da atividade agropecuária de forma sustentável. O objetivo deste trabalho foi o de analisar como as mudanças no uso do solo e a aplicação de técnicas e práticas de manejo e conservação de água e solo influenciam no balanço hídrico e na qualidade dos recursos hídricos, considerando duas bacias predominantemente rurais e contribuintes do principal manancial de abastecimento público do Distrito Federal (Reservatório do Descoberto): bacias hidrográficas do córrego Capão Comprido e do ribeirão Rodeador. Para isso, o estudo contou com a caracterização de quatro cenários de uso do solo da região que abordam desde o início da ocupação agrícola, com o advento da construção de Brasília, até o molde de ocupação mais atual. Realizou-se a parametrização de banco de dados do SWAT+ adaptado ao contexto rural da região, com a adição de informações relacionadas a fertilizantes, implementos agrícolas, práticas de conservação do solo e manejo de irrigação ajustados para a realidade local. A modelagem foi realizada para os quatro cenários de uso do solo, contando com a análise de sensibilidade de 10 parâmetros e a calibração automática com base em dados observados de vazões diárias. Optou-se pela calibração para a bacia do Capão Comprido, a qual foi replicada na bacia do Rodeador. Os coeficientes de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e PBIAS obtidos foram utilizados, mas não foram considerados satisfatórios para todos os cenários no que tange a calibração e verificação. A modelagem da influência das mudanças no uso do solo e das práticas de conservação de água e solo foi realizada com a simulação do cenário de uso do solo mais atual correlacionando a adoção de práticas convencionais de manejo com práticas consideradas conservacionistas, observando tendências de urbanização e cenário de recuperação e conservação de áreas protegidas. Verificou-se que com o emprego de práticas conservacionistas, as bacias do Capão Comprido e do Rodeador responderam com a diminuição de sedimentos carreados, aumento de percolação e infiltração no solo e, conseqüentemente, maior regularidade no regime hídrico das bacias.

**PALAVRAS CHAVES:** Cenários de Uso do Solo, Manejo Agrícola de Água e Solo, Modelagem Hidrológica, SWAT+.

## ABSTRACT

The development of agricultural activities is directly linked to natural resource availability and is continually affected by climate instability and water scarcity events. The improper use of rural areas, the suppression of native vegetation, and the inadequate and outdated management practices influence the watershed hydrological behavior. Soil and water management and conservation practices are considered potential technical alternatives to help the continuation, improvement, and evolution of sustainable agricultural activity. The objective of this study was to analyze how land use change and the application of techniques and practices of management and conservation of water and soil influence the water balance and the quality of water resources, considering two predominantly rural watersheds and contributors to the main water public reservoir in the Federal District (Descoberto Reservoir): Capão Comprido stream and the Rodeador stream watersheds. Therefore, the study relied on the characterization of four land-use scenarios in the region, that address the beginning of the agricultural occupation, with the construction of Brasília (Brazil's capital), until the most current occupation model. The SWAT+ database was parameterized and adapted to the rural context of the region, with the addition of information related to fertilizers, agricultural implements, soil conservation practices, and irrigation management adjusted to the local reality. Modeling was performed for the four land-use scenarios, relying on sensitivity analysis of 10 parameters and automatic calibration based on observed daily flow data. Calibration was chosen for the Capão Comprido watershed, which was replicated in the Rodeador watershed after. The Nash-Sutcliffe efficiency coefficients (NSE), coefficient of determination ( $R^2$ ), and PBIAS were used, but they were not considered satisfactory for all scenarios regarding calibration and verification. The hydrologic modeling of the changes in influences on land use, water, and soil conservation practices, was carried out with the simulation of the most current land use scenario, correlating the adoption of conventional management practices and conservationist practices. It was found that with the use of conservation practices, the Capão Comprido and Rodeador watersheds responded to the decrease of sediments carried, increased percolation and infiltration in the soil, and, consequently, greater regularity in the water regime of the watershed.

**KEYWORDS:** Land-use Scenarios, Agricultural Water and Soil Management, Hydrological Modeling, SWAT+.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	5
2.1 OBJETIVO GERAL .....	5
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
3. REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
3.1 TÉCNICAS DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DE ÁGUA E SOLO.....	6
3.1.1 Práticas de manejo e conservação de solo .....	7
3.1.2 Práticas de manejo e conservação de água .....	14
3.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA .....	17
3.2.1 Evolução dos modelos .....	21
3.2.2 Utilização de Sistemas de Informações Geográficas e Cenarização em modelagem .....	22
3.3 SWAT - <i>SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL</i> .....	24
3.3.1 Aplicações do modelo SWAT e SWAT+ .....	30
3.3.2 Aplicação do SWAT para a simulação de áreas agrícolas.....	35
3.3.2.1 Nutrientes.....	35
3.3.2.2 Sedimentos e Erosão .....	41
3.3.2.3 Gestão geral da produção agrícola.....	42
4. METODOLOGIA.....	48
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	49
4.1.1 Bacia do córrego Capão Comprido.....	54
4.1.2 Bacia do Ribeirão Rodeador .....	57
4.2 ESTRUTURAÇÃO DE BASE DE DADOS .....	59
4.2.1 Fontes de dados hidrometeorológicos.....	60
4.2.2 Preparação de base de dados.....	64
4.2.2.1 Dados climáticos .....	64
4.2.2.2 Modelo Digital de Elevação .....	65
4.2.2.3 Dados de classes de solo .....	66
4.2.2.4 Dados hidrográficos .....	66
4.2.2.5 Dados de uso do solo.....	66
4.2.2.6 Geoprocessamento de imagens .....	71
4.3 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS .....	76
4.4 MODELAGEM INICIAL COM O SWAT.....	77
4.5 INCORPORAÇÃO DE DADOS REGIONAIS NA BASE DO MODELO SWAT+ E APLICAÇÃO DE CENÁRIOS DE MANEJO.....	79
4.5.1 Dados de Manejo .....	80
4.5.2 Aplicação de base de dados adaptada e simulação de práticas de manejo de água e solo .....	83
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	86

5.1 CARACTERIZAÇÃO HIDROMETEOROLÓGICA DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS .....	86
5.1.1 Precipitação .....	86
5.1.2 Temperatura e Umidade .....	91
5.1.3 Vazão .....	93
5.1.4 Qualidade da água .....	96
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS USOS DO SOLO E DA ÁGUA .....	98
5.2.1 Captação e uso dos recursos hídricos .....	98
5.2.1.1 Outorgas - bacia do Capão Comprido.....	100
5.2.1.2 Outorgas - bacia do Rodeador.....	104
5.2.2 Cenários de uso do solo .....	107
5.2.2.1 Uso do solo - bacia do Capão Comprido .....	107
5.2.2.2 Uso do solo - bacia do Rodeador .....	113
5.2.2.3 Mudanças e tendências observadas.....	118
5.3 MODELAGEM DAS BACIAS .....	120
5.3.1 Sub-bacias, HRUs e LSUs.....	120
5.3.2 Modelagem inicial .....	122
5.3.3 Análise de sensibilidade .....	125
5.3.4 Calibração.....	126
5.3.5 Verificação do modelo para a bacia do Capão Comprido .....	129
5.3.6 Verificação do modelo para a bacia do Rodeador .....	131
5.3.7 Simulação do uso do solo e impactos no balanço hídrico .....	133
5.4 PARAMETRIZAÇÃO DE BANCO DE DADOS SWAT .....	137
5.4.1 Fertilizantes ( <i>Fertilizer Database</i> ) .....	137
5.4.2 Implementos Agrícolas ( <i>Tillage Database</i> ) .....	138
5.4.3 Irrigação ( <i>Irrigation Database</i> ).....	139
5.4.4 Práticas de Conservação do Solo ( <i>Management Database</i> ).....	140
5.4.5 Crescimento de Plantas ( <i>Plant Growth Database</i> ) e Urbano ( <i>Urban Database</i> )..	141
5.4.6 Aplicação de banco de dados adaptado e análise dos resultados .....	141
5.5 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE PRÁTICAS DE CONSERVAÇÃO DE SOLO. 146	
5.5.1 Simulação do balanço hídrico de cenários conservacionistas e convencionais....	146
5.5.2 Visualização de resultados simulados – SWAT+.....	152
5.5.2.1 Canais de escoamento geolocalizados .....	153
5.5.2.2 Unidades de paisagem (LSU) .....	157
5.5.2.3 Sedimentos.....	166
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	175
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	178
APÊNDICES.....	191

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Práticas conservacionistas e sistemas de manejo do solo (adaptado de Bertoni Lombardi Neto, 2012 e De Maria <i>et al.</i> , 2019).....	8
Tabela 2 - Classificação de modelos para gerenciamento dos recursos hídricos. Fonte: (TUCCI, 1998).....	18
Tabela 3 - Critérios de avaliação de desempenho para medidas estatísticas para modelos em escala de bacias hidrográficas com base na distribuição dos dados existentes. (Adaptado e traduzido de Moriasi <i>et al.</i> , 2015).....	21
Tabela 4 - Melhorias de funcionalidades do SWAT+ (Silva <i>et al.</i> , 2021). ....	26
Tabela 5 - Técnicas de conservação e remoção de poluentes disponíveis para a simulação nos modelos SWAT e APEX - adaptado Waidler <i>et al.</i> (2009). ....	45
Tabela 6 - Lista de estudos acadêmicos aplicados às bacias de estudo e à região próxima à bacia do Alto Rio Descoberto. ....	52
Tabela 7 - Estações de monitoramento de Águas Superficiais presentes nas bacias de estudo (RMSP/Adasa e Hidroweb/ANA).....	60
Tabela 8 - Estações Pluviométricas da Bacia do Alto Descoberto no Distrito Federal (Hidroweb/ANA e Rede Caesb). ....	63
Tabela 9 - Dados de variáveis e parâmetros do modelo SWAT monitorados por diferentes instituições na região de estudo e seus períodos utilizados no estudo. ....	64
Tabela 10 - Unidades dos dados climáticos no SWAT+. ....	65
Tabela 11 - Informações de tipo, fonte e data da imagem utilizada para mapeamento de uso do solo na área de estudo. ....	72
Tabela 12 - Identificação visual para vetorização em software de SIG de uso do solo das bacias de estudo nos cenários propostos a partir de imagens aéreas e de satélites. ....	73
Tabela 13 - Caracterização das classes de uso do solo escolhidas e identificadas. ....	75
Tabela 14 - Parâmetros, intervalo de valores e métodos de variação utilizados na análise de sensibilidade. (Fonte: adaptado de Ferrigo (2014)) ....	78
Tabela 15 - Períodos de aquecimento, modelagem, calibração e verificação do modelo das bacias.....	79
Tabela 16 - Classes, subclasses e porcentagens de itens utilizados para base de crescimento de planta e base urbana. ....	80
Tabela 17 - Lista de fertilizantes usualmente recomendados no Distrito Federal. (EMATER-DF, 2020b; SLU; CAESB) ....	81
Tabela 18 - Cenários prospectivos de práticas de manejo e uso do solo e da água. ....	84
Tabela 19 - Práticas de manejo do solo configuradas no SWAT+ para o cenário conservacionista. ....	85
Tabela 20 - Fator de peso de cada estação pluviométrica na região de influência da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF, baseada em sua área de influência, na aplicação do método de polígonos de Thiessen. ....	89
Tabela 21 - Fator de peso de cada estação pluviométrica na região de influência da bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido/DF, baseada em sua área de influência, na aplicação do método de polígonos de Thiessen. ....	90
Tabela 22 - Informações de outorgas subterrâneas na bacia do Capão Comprido considerando sua finalidade principal (Adasa – maio de 2021).....	102
Tabela 23 - Informações de outorgas superficiais na bacia do Capão Comprido considerando sua finalidade principal (Adasa – maio 2021). ....	102
Tabela 24 - Informações de outorgas subterrâneas na bacia do Rodeador considerando sua finalidade principal (Adasa – maio de 2021). ....	105
Tabela 25 - Informações de outorgas superficiais na bacia do Rodeador considerando sua	

finalidade principal (Adasa – maio de 2021).....	106
Tabela 26 - Área e porcentagem de cada cenário de uso do solo na bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido (DF). .....	108
Tabela 27 - Área e porcentagem de cada cenário de uso do solo na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador (DF). .....	113
Tabela 28 - Quantidade de Unidades de Resposta Hidrológicas simuladas em cada bacia. .	122
Tabela 29 - Critérios de avaliação de desempenho calculados para os três cenários. ....	123
Tabela 30 - Critérios de avaliação de desempenho calculados para nutrientes N e P. ....	124
Tabela 31 - Parâmetros e valores de calibração resultantes para os três cenários na bacia hidrográfica do Capão Comprido.....	127
Tabela 32 - Critérios de avaliação de desempenho calculados para os três cenários. ....	128
Tabela 33 - Critérios de avaliação de desempenho calculados para os três cenários. ....	130
Tabela 34 - Critérios de avaliação de desempenho calculados para nutrientes N e P. ....	131
Tabela 35 - Critérios de avaliação de desempenho calculados para os três cenários. ....	132
Tabela 36 - Valores simulados (mm) de parâmetros componentes do ciclo hidrológico médio da bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido (DF) para cada cenário de uso do solo. .	134
Tabela 37 - Valores simulados (mm) de parâmetros componentes do ciclo hidrológico médio da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador (DF) para cada cenário de uso do solo. ....	135
Tabela 38 - Base de dados de fertilizantes configurada para utilização no SWAT+ na região. ....	138
Tabela 39 - Base de dados de implementos agrícolas utilizados no DF configurada para o SWAT+ na região de estudo. ....	139
Tabela 40 - Base de dados referente à irrigação ideal configurada para o SWAT+ na região de estudo. ....	139
Tabela 41 - Base de dados referente à irrigação atual configurada para o SWAT+ na região. ....	140
Tabela 42 - Práticas de manejo do solo e valores P da EUPS. ....	140
Tabela 43 - Quantidade de Unidades de Resposta Hidrológica por divisão e subdivisão de classe de uso.....	141
Tabela 44 - Valores em kg/ha de componentes do Ciclo do Nitrogênio. ....	142
Tabela 45 - Valores em kg/ha de componentes do Ciclo do Fósforo. ....	142
Tabela 46 - Valores simulados (mm) de parâmetros componentes do ciclo hidrológico da bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido (DF) para cenários conservacionista e convencional. ....	150
Tabela 47 - Valores simulados (mm) de parâmetros componentes do ciclo hidrológico da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador (DF) para cenários conservacionista e convencional. ....	150
Tabela 48 - Razões entre componentes do balanço hídrico e ciclo hidrológico nos cenários conservacionista e convencional das bacias. ....	151
Tabela 49 - Percentual das bacias e área média das classes de unidade de paisagem nas bacias do Capão Comprido e Rodeador.....	157
Tabela 50 - Balanço Hídrico, componente Escoamento Superficial (mm), média anual considerando as unidades de paisagem em cada cenário construído para as bacias hidrográficas (período 2020 a 2030). ....	157
Tabela 51 - Balanço Hídrico, componente Evapotranspiração (mm), média anual - unidades de paisagem em cada cenário construído para as bacias hidrográficas (2020 a 2030). ....	160
Tabela 52 - Balanço Hídrico, componente percolação (mm), média anual - unidades de paisagem em cada cenário construído para as bacias hidrográficas (período 2020 a 2030). .	163
Tabela 53 - Valores de produção de sedimentos gerados pela simulação via SWAT+ na bacia do Capão Comprido (DF). ....	168

Tabela 54 - Valores de produção de sedimentos gerados pela simulação via SWAT+ na bacia do Rodeador (DF). .....	168
Tabela 55 - Média anual de produção de sedimentos em toneladas por hectare, considerando as unidades de paisagem em cada cenário construído para as bacias hidrográficas (período 2020 a 2030). .....	171

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Terraços quanto ao modo de construção (BIAS, 1992).....	11
Figura 2 - Terraços quanto à faixa de movimentação da terra (BIAS, 1992).....	12
Figura 3 - Terraços quanto à forma do perfil (BIAS, 1992).....	12
Figura 4 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento de modelo matemático (adaptado de von Sperling, 2007) .....	19
Figura 5 - Esquema de delimitação do SWAT+ e sua versão anterior (Adaptado de Arnold <i>et al.</i> , 2021).....	28
Figura 6 - Representação da bacia hidrográfica e as subdivisões em sub-bacia e unidades de paisagem (floodplain e upland) (Adaptado de Srinivasan, 2021).....	28
Figura 7 - Fluxo conceitual da água dos principais objetos geográficos abordados no SWAT+. (BIEGER <i>et al.</i> , 2017).....	29
Figura 8 - Ciclo do nitrogênio - adaptado de Neitsch <i>et al.</i> (2009).....	36
Figura 9 - Dinâmica dos reservatórios de nitrogênio no SWAT - adaptado de Neitsch <i>et al.</i> (2009). .....	37
Figura 10 - Ciclo do fósforo - adaptado de Neitsch <i>et al.</i> (2009).....	39
Figura 11 - Reservatórios de fósforo SWAT - adaptado de Neitsch <i>et al.</i> (2009). .....	40
Figura 12 - Fluxograma da metodologia e etapas do estudo. ....	48
Figura 13 - Localização das bacias de estudo em relação ao DF e ao Brasil. ....	51
Figura 14 - Hidrografia e limite da Bacia do Capão Comprido. ....	54
Figura 15 - Características morfológicas da bacia do córrego Capão Comprido (DF). (Fontes: Solos - Reatto <i>et al.</i> (2004); Geomorfologia - Codeplan, 1984; Zoneamento APA - ICMBio, 2014) .....	56
Figura 16 - Hidrografia e limite da bacia do Ribeirão Rodeador (DF). ....	57
Figura 17 - Características morfológicas da bacia do ribeirão Rodeador (DF). (Fontes: Solos - Reatto <i>et al.</i> (2004); Geomorfologia - Codeplan, 1984; Zoneamento APA - ICMBio, 2014) .....	59
Figura 18 - Localização das Estações Fluviométricas - Capão Comprido e Rodeador. (Hidroweb/ANA e Rede Caesb) .....	61
Figura 19 - Localização das estações pluviométricas na Bacia Hidrográfica do Alto Descoberto no Distrito Federal (Hidroweb/ANA). ....	62
Figura 20 - Comparação de porcentagem de área plantada (2011 e 2020) por classe de cultivo na Região Administrativa de Brazlândia. (Fonte de dados: Emater-DF).....	68
Figura 21 - Produção agrícola (ha) na RA de Brazlândia de 2011 a 2020 (Fonte de dados: Emater-DF).....	68
Figura 22 - Gráficos comparativo de espécies de Grandes Culturas (2011 e 2020) na Região Administrativa de Brazlândia. (Fonte de dados: Emater-DF).....	70
Figura 23 - Gráficos comparativo de espécies de Fruticultura (2011 e 2020) na Região Administrativa de Brazlândia. (Fonte de dados: Emater-DF). ....	70
Figura 24 - Gráficos comparativo de espécies de Olericultura (2011 e 2020), sem a classe "Outras", na Região Administrativa de Brazlândia. (Fonte de dados: Emater-DF). ....	70
Figura 25 - Imagens utilizadas para vetorização, considerando a APA do Descoberto no DF. ....	72
Figura 26 - Disponibilidade de dados de precipitação de cada estação entre os anos de 1971 a 2020. ....	86
Figura 27 - Localização das estações pluviométricas com séries históricas obtidas e analisadas.....	87
Figura 28 - Índice pluviométrico médio mensal (mm) (Hidroweb/ANA e Rede Caesb)....	87
Figura 29 - Precipitação média anual das estações (Hidroweb/ANA e Rede Caesb). ....	88

Figura 30 - Área de influência das estações pluviométricas nas bacias do Rodeador e Capão Comprido pelo método de polígonos de Thiessen dividido por períodos.....	89
Figura 31 - Precipitação média mensal (mm) entre os anos de 1971 a 2020, calculada pelos polígonos de Thiessen a partir dos dados provenientes de Hidroweb/ANA e Rede Caesb.	90
Figura 32 - Precipitação anual da Bacia do Capão Comprido (mm), calculada pelos polígonos de Thiessen (Hidroweb/ANA e Rede Caesb). .....	90
Figura 33 - Precipitação anual da Bacia do Rodeador (mm), calculada pelos polígonos de Thiessen (Hidroweb/ANA e Rede Caesb).....	91
Figura 34 - Temperaturas máximas, médias e mínimas mensais (1961-2020) (BDMEP/INMET). .....	91
Figura 35 - Médias das temperaturas máximas, médias e mínimas nas últimas cinco décadas (BDMEP/INMET). .....	92
Figura 36 - Umidade relativa do ar média (1961-2020) (BDMEP/INMET).....	92
Figura 37 - Estações fluviométricas próximas ao exutório das bacia do Capão Comprido e Rodeador.....	93
Figura 38 - Vazões médias mensais do córrego Capão Comprido dos anos 1978 a 2020 (Hidroweb/ANA e Rede Caesb). .....	94
Figura 39 - Vazões médias mensais do ribeirão Rodeador dos anos 1978 a 2020 (Hidroweb/ANA e Rede Caesb). .....	94
Figura 40 - Vazões mensais córrego Capão Comprido - 1978 a 2020 (Hidroweb/ANA e Rede Caesb). .....	95
Figura 41 - Vazões mensais ribeirão Rodeador - 1978 a 2020 (Hidroweb/ANA e Rede Caesb). .....	95
Figura 42 - Gráfico dos dados de material em suspensão e vazão do córrego Capão Comprido (Hidroweb/ANA e Rede Caesb).....	96
Figura 43 - Gráfico dos dados de material em suspensão e vazão do ribeirão Rodeador (Hidroweb/ANA e Rede Caesb). .....	97
Figura 44 - Concentrações de nitrogênio total no córrego Capão Comprido (Rede Caesb). .....	97
Figura 45 - Concentrações de fósforo total no córrego Capão Comprido (Rede Caesb). ...	98
Figura 46 - Outorgas superficiais e subterrâneas e canais de irrigação na bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido - DF (Adasa - maio de 2021) .....	99
Figura 47 - Outorgas superficiais e subterrâneas e canais de irrigação na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador - DF (Adasa - maio de 2021). .....	100
Figura 48 - Outorgas subterrâneas categorizadas por vazão e finalidade principal na bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido - DF (Adasa - maio de 2021).....	101
Figura 49 - Outorgas superficiais categorizadas por vazão e finalidade principal na bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido - DF (Adasa – maio de 2021) .....	103
Figura 50 - Outorgas subterrâneas categorizadas por vazão e finalidade principal na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador - DF (Adasa – maio de 2021).....	104
Figura 51 - Outorgas superficiais categorizadas por vazão e finalidade principal na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador - DF (Adasa – maio de 2021).....	106
Figura 52 - Uso do solo ano de 1964 - Bacia Capão Comprido (Imagem base: Fotos aéreas Serviço Geográfico do Exército / GeoPortal).....	109
Figura 53 - Uso do solo ano de 1980 - bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido - DF (Imagem base: fotos aéreas Serviço Geográfico do Exército / GeoPortal). .....	110
Figura 54 - Uso do solo ano de 2009 - bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido - DF (Imagem base: imagem aérea ortorretificada / Codeplan).....	111
Figura 55 - Uso do solo ano de 2019 - bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido - DF (Imagem base: imagem World Imagery Wayback / ESRI e Imagens de satélite CBERS-4A	

/ INPE ).....	112
Figura 56 - Uso do solo ano de 1964 - bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador - DF (Imagem base: fotos aéreas Serviço Geográfico do Exército / GeoPortal). .....	114
Figura 57 - Uso do solo ano de 1980 - bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador - DF (Imagem base: imagem aérea ortorretificada / Codeplan).....	115
Figura 58 - Uso do solo ano de 2009 - bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador - DF (Imagem base: imagem World Imagery Wayback / ESRI e Imagens de satélite CBERS-4A / INPE ).....	116
Figura 59 - Uso do solo ano de 2019 - bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador - DF (Imagem base: imagem World Imagery Wayback / ESRI e Imagens de satélite CBERS-4A / INPE ).....	117
Figura 60 - Gráfico de tendências de mudança de uso do solo na bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido.....	118
Figura 61 - Gráfico de tendências de mudança de uso do solo na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador. ....	118
Figura 62 - Sub-bacias e unidades de paisagem da bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido (DF) geradas pelo modelo SWAT+. ....	120
Figura 63 - Sub-bacias e unidades de paisagem da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador geradas pelo modelo SWAT+. ....	121
Figura 64 - Vazões simuladas e observadas sem calibração do córrego Capão Comprido no período de 1965 a 1974. ....	122
Figura 65 - Vazões simuladas e observadas sem calibração do córrego Capão Comprido no período de 1979 a 1988. ....	122
Figura 66 - Vazões simuladas e observadas sem calibração do córrego Capão Comprido no período de 2001 a 2010. ....	123
Figura 67 - Vazões simuladas e observadas sem calibração do córrego Capão Comprido no período de 2006 a 2015. ....	123
Figura 68 - Concentração de nitrogênio total observado e simulado córrego Capão Comprido. ....	124
Figura 69 - Concentração de fósforo total observado e simulados córrego Capão Comprido. .....	124
Figura 70 - Análise de sensibilidade - Cenário 2 (1980).....	125
Figura 71 - Análise de sensibilidade - Cenário 3 (2009).....	125
Figura 72 - Análise de sensibilidade - Cenário 4 (2019).....	126
Figura 73 - Vazões simuladas do córrego Capão Comprido no período de 1965 a 1974 - após processo de calibração.....	127
Figura 74 - Vazões simuladas e observadas do córrego Capão Comprido no período de 1979 a 1988 - após processo de calibração.....	127
Figura 75 - Vazões simuladas e observadas do córrego Capão Comprido no período de 2001 a 2010 - após processo de calibração.....	128
Figura 76 - Vazões simuladas e observadas do córrego Capão Comprido no período de 2006 a 2015 - após processo de calibração.....	128
Figura 77 - Vazões simuladas do córrego Capão Comprido no período de 1975 a 1979. ....	129
Figura 78 - Vazões simuladas e observadas do córrego Capão Comprido no período de 1989 a 1993 - verificação. ....	129
Figura 79 - Vazões simuladas e observadas do córrego Capão Comprido no período de 2001 a 2010 - verificação. ....	129
Figura 80 - Vazões simuladas e observadas do córrego Capão Comprido no período de 2006 a 2015 - verificação. ....	130
Figura 81 - Concentração de nitrogênio total observado e simulado do córrego Capão	

Comprido no período de 2013 a 2020 - verificação. ....	130
Figura 82 - Concentração de fósforo total observado e simulado do córrego Capão Comprido no período de 2013 a 2020 - verificação. ....	131
Figura 83 - Vazões simuladas do ribeirão Rodeador no período de 1975 a 1979. ....	131
Figura 84 - Vazões simuladas e observadas do ribeirão Rodeador no período de 1989 a 1993 - verificação. ....	132
Figura 85 - Vazões simuladas e observadas do ribeirão Rodeador no período de 2011 a 2015 - verificação. ....	132
Figura 86 - Vazões simuladas e observadas do ribeirão Rodeador no período de 2016 a 2020 - verificação. ....	132
Figura 87 - Ciclo hidrológico médio simulado pelo SWAT+ nos 4 cenários de usos distintos da bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido (DF). ....	134
Figura 88 - Ciclo hidrológico simulado pelo SWAT+ nos 4 cenários de usos distintos da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador (DF). ....	135
Figura 89 - Gráfico comparativo das cargas mensais de nitrogênio total (Kg) entre os anos 2010 a 2020 - córrego Capão Comprido. ....	143
Figura 90 - Gráfico comparativo das cargas médias mensais de nitrogênio total (Kg) entre os anos 2010 a 2020 - córrego Capão Comprido. ....	143
Figura 91 - Gráfico comparativo das cargas mensais de nitrogênio total (Kg) entre os anos 2010 a 2020 – ribeirão Rodeador. ....	144
Figura 92 - Gráfico comparativo das cargas médias mensais de nitrogênio total (Kg) entre os anos 2010 a 2020 – ribeirão Rodeador. ....	144
Figura 93 - Gráfico comparativo das cargas mensais de fósforo total (Kg) entre os anos 2010 a 2020 - córrego Capão Comprido. ....	144
Figura 94 - Gráfico comparativo das cargas médias mensais de fósforo total (Kg) entre os anos 2010 a 2020 - córrego Capão Comprido. ....	145
Figura 95 - Gráfico comparativo das cargas mensais de fósforo total (Kg) entre os anos 2010 a 2020 – ribeirão Rodeador. ....	145
Figura 96 - Gráfico comparativo das cargas médias mensais de fósforo total (Kg) entre os anos 2010 a 2020 – ribeirão Rodeador. ....	145
Figura 97 - Cenário de uso do solo com adição de práticas de conservação de água, solo e recuperação de vegetação nativa na bacia do córrego Capão Comprido (DF). ....	147
Figura 98 - Cenário de uso do solo com configuração de práticas convencionais de manejo de solo na bacia do córrego Capão Comprido (DF) e aumento de área urbanizada. ....	147
Figura 99 - Cenário de uso do solo com adição de práticas de conservação de água, solo e recuperação de vegetação nativa na bacia do ribeirão Rodeador (DF). ....	148
Figura 100 - Cenário de uso do solo com configuração de práticas convencionais de manejo de solo na bacia do ribeirão Rodeador (DF) e aumento de área urbanizada. ....	148
Figura 101 - Porcentagens de uso do solo para cenários convencional e conservacionista - Bacia hidrográfica Capão Comprido. ....	149
Figura 102 - Porcentagens de uso do solo para cenários convencional e conservacionista - Bacia hidrográfica ribeirão Rodeador. ....	149
Figura 103- Vazão média mensal simulada para os cenários convencional e conservacionista para o período de 2020 a 2030 - bacia hidrográfica do Capão Comprido. ....	152
Figura 104- Vazão média mensal simulada para os cenários convencional e conservacionista para o período de 2020 a 2030 - bacia hidrográfica do Rodeador. ....	152
Figura 105 - Média anual (2020 a 2030) referente a valores de vazão de saída de cada canal - Bacia do Capão Comprido - Cenário Convencional. ....	153
Figura 106 - Média anual (2020 a 2030) referente a valores de vazão de saída de cada canal	

- Bacia do Capão Comprido - Cenário Conservacionista.....	153
Figura 107 - Média anual (2020 a 2030) referente a valores de vazão de saída de cada canal - Bacia do Rodeador - Cenário Convencional. ....	154
Figura 108 - Média anual (2020 a 2030) referente a valores de vazão de saída de cada canal - Bacia do Rodeador - Cenário Conservacionista.....	154
Figura 109 - Máxima vazão mensal (2020 a 2030) referente a valores de vazão de saída de cada canal - Bacia do Capão Comprido - Cenário Convencional. ....	155
Figura 110 - Máxima vazão mensal (2020 a 2030) referente a valores de vazão de saída de cada canal - Bacia do Capão Comprido - Cenário Convencional. ....	155
Figura 111 - Máxima vazão mensal (2020 a 2030) referente a valores de vazão de saída de cada canal - Bacia do Rodeador - Cenário Convencional. ....	156
Figura 112 - Máxima vazão mensal (2020 a 2030) referente a valores de vazão de saída de cada canal - Bacia do Capão Comprido - Cenário Conservacionista. ....	156
Figura 113 - Média anual referente ao escoamento superficial de cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Capão Comprido - Cenário Convencional.....	158
Figura 114 - Média anual referente ao escoamento superficial de cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Capão Comprido - Cenário Conservacionista.....	158
Figura 115 - Média anual referente ao escoamento superficial de cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Rodeador- Cenário Convencional.....	159
Figura 116 - Média anual referente ao escoamento superficial de cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Rodeador - Cenário Conservacionista. ....	159
Figura 117 - Média anual referente à evapotranspiração de cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Capão Comprido - Cenário Convencional.....	161
Figura 118 - Média anual referente à evapotranspiração de cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Capão Comprido - Cenário Conservacionista.....	161
Figura 119 - Média anual referente à evapotranspiração de cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Rodeador - Cenário Convencional.....	162
Figura 120 - Média anual referente à evapotranspiração de cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Rodeador - Cenário Conservacionista. ....	162
Figura 121 - Média anual referente a percolação em cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Capão Comprido - Cenário Convencional. ....	164
Figura 122 - Média anual referente a percolação em cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Capão Comprido - Cenário Conservacionista. ....	164
Figura 123 - Média anual referente a percolação em cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Rodeador - Cenário Convencional. ....	165
Figura 124 - Média anual referente a percolação em cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Rodeador - Cenário Conservacionista. ....	165
Figura 125 - Representação ilustrativa dos componentes de produção de sedimentos observados e simulados no modelo hidrológico SWAT+ (tradução livre) – bacia do Capão Comprido. ....	167
Figura 126 - Representação ilustrativa dos componentes de produção de sedimentos observados e simulados no modelo hidrológico SWAT+ (tradução livre) – bacia do Rodeador.....	167
Figura 127 - Média anual referente a valores de produção de sedimentos de cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Capão Comprido - Cenário Convencional.....	169
Figura 128 - Média anual referente a valores de produção de sedimentos de cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Capão Comprido - Cenário Conservacionista.....	169
Figura 129 - Média anual referente a valores de produção de sedimentos de cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Rodeador - Cenário Convencional.....	170
Figura 130 - Média anual referente a valores de produção de sedimentos de cada unidade	

de paisagem (LSU) - Bacia do Rodeador - Cenário Conservacionista.....	170
Figura 131 - Média anual referente a valores de produção de sedimentos de cada HRU - Bacia do Capão Comprido - Cenário Convencional. ....	172
Figura 132 - Média anual referente a valores de produção de sedimentos de cada HRU - Bacia do Capão Comprido - Cenário Conservacionista. ....	172
Figura 133 - Média anual referente a valores de produção de sedimentos de cada HRU - Bacia do Rodeador - Cenário Convencional. ....	173
Figura 134 - Média anual referente a valores de produção de sedimentos de cada HRU - Bacia do Rodeador - Cenário Conservacionista. ....	173

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

Adasa	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ATER	Assistência Técnica e Extensão Rural
APA	Área de Proteção Ambiental
APP	Área de Preservação Permanente
ASAE	<i>American Society of Agricultural Engineers</i>
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
BMPs	<i>Best Management Practices</i> (melhores práticas de manejo)
Caesb	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
Codeplan	Companhia de Planejamento do Distrito Federal
DDS	<i>Dynamically Dimensioned Search</i>
DF	Distrito Federal
Emater- DF	Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Distrito Federal
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
EUPS	Equação Universal de Perdas de Solo
GDF	Governo do Distrito Federal
GO	Goiás
HRU	<i>Hidrologic Response Units</i> (unidades de resposta hidrológica)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPA	Índice de Produção Agropecuária
LSU	<i>Landscape Units</i> (Unidades de Paisagem)
MDE	Modelo Digital de Elevação
MG	Minas Gerais
MUSLE	<i>Modified Universal Soil Loss Equation</i>
N	Nitrogênio
NSE	<i>Nash-Sutcliffe</i>
ONU	Organização das Nações Unidas

P	Fósforo
PBIAS	Percentual de viés <i>Bias</i>
PDOT	Plano Diretor de Ordenamento Territorial
PGIRH	Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos
PICAG	Projeto Integrado de Colonização Alexandre Gusmão
PICH	Plano Integrado de Enfrentamento da Crise Hídrica
PTF	<i>Pedo Transfer Function</i>
RA	Região Administrativa
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinação
RMSP	Rede de Monitoramento de Águas Superficiais da Adasa
RL	Reserva Legal
SCS	Serviço de Conservação do Solo
SEDUH	Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Habitação
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SLU	Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
UH	Unidade Hidrográfica
USDA	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos
ZRUC	Zona Rural de Uso Controlado
ZRUD	Zona Rural de Uso Diversificado
WMS	<i>Web Map Service</i>
WMTS	<i>Web Map Tile Service</i>

# 1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, a expansão urbana e o incremento de renda per capita aumentam consideravelmente a demanda pela produção de alimentos (SAATH & FACHINELLO, 2018). A Organização das Nações Unidas (ONU, 2019) estima que no ano de 2050 a população mundial deve chegar a 9,7 bilhões de pessoas, com a previsão de ascensão de cerca de 60% na demanda total de alimentos (UNESCO, 2021). Sabe-se que, para a ampliação de ofertas de alimentos, é fundamental o aumento da produtividade dos cultivos de espécies agrícolas, o que requer uma maior utilização de recursos naturais, principalmente água e solo.

A agricultura é apresentada, constantemente, como uma das principais usuárias de recursos hídricos, sendo responsável por 69% das captações de água no âmbito global (UNESCO, 2021). No Brasil, a atividade de irrigação é responsável por cerca de 50% das captações de água em mananciais superficiais e subterrâneo, assemelhando-se à média global (ANA, 2021). O mesmo acontece no espaço do Distrito Federal (DF), em que a agricultura irrigada e o abastecimento humano são os responsáveis pelas maiores demandas de uso de recursos hídricos da região, segundo o Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal – PGIRH/DF (ADASA, 2012), visto que a demanda total de água no DF é de aproximadamente 400 milhões de m<sup>3</sup>/ano, em que 55% destes são demandados pelo abastecimento humano público e 45% pela atividade de agricultura irrigada (ADASA *et al.*, 2018).

Práticas de manejo conservacionista são consideradas excelentes alternativas de uso eficiente da água e do solo, pois, sua adoção propicia, além da redução do uso consuntivo da água, do assoreamento e da contaminação de mananciais, o aumento das taxas de retenção de água no solo, o que acarreta a melhoria da regularidade de vazões disponíveis, a diminuição de erosões e carreamentos e, ainda, podem proporcionar maior produtividade dos cultivos agrícolas e garantir maior segurança à produção, de modo a contribuir com o desenvolvimento sustentável da agricultura (BONETTI & FINK, 2020).

As bacias hidrográficas rurais do DF enfrentam conflitos históricos entre o uso agropecuário, principalmente quanto ao uso da água para irrigação, e o abastecimento da população urbana. A alocação negociada de água, negociação realizada entre os usuários quanto à forma, horário e tempo de captação, é prática persistente nos períodos de vazões

críticas. Desse modo, a atividade agropecuária presente nessas regiões sofre significativas pressões que impactam diretamente no mercado agropecuário.

Nos anos de 2016 e 2017 o DF passou por uma expressiva crise hídrica. Como instrumento de gestão, o Governo do Distrito Federal (GDF) instituiu o Plano Integrado de Enfrentamento da Crise Hídrica (PICH), o qual versa sobre as diversas ações tomadas para amenizar a crise, como, por exemplo, o racionamento de água na área urbana. Na área rural, diversas práticas de manejo e conservação de solo e água foram previstas e executadas, entre elas destacaram-se: aplicação de novas tecnologias poupadoras de água, campanhas educativas para consumo racional dos recursos hídricos e novos modelos experimentais de manejo de irrigação para agricultores, revitalização de canais de irrigação, adequação de estradas rurais, construção de bacias de retenção e implantação de terraços e, inclusive, ações de preservação e recuperação de vegetação nativa.

Os agricultores irrigantes presentes nas bacias hidrográficas do rio Descoberto e do ribeirão Pipiripau, bacias essencialmente rurais e localizadas a montante de mananciais de abastecimento público, tiveram o uso da água limitado em até 75%, ocasionando perdas na produção, diminuição de área plantada e, conseqüentemente, a redução da renda das famílias. Não obstante, áreas da bacia hidrográfica do rio Preto, grande produtora de grãos, também passaram por restrições no uso da água para irrigação. Contudo, essas não foram resultantes de conflito com o abastecimento humano e sim por conflitos entre irrigantes devido à diminuição na vazão disponível para captação, sendo necessária a adoção de medidas de alocação negociada de água.

Durante esse período, observou-se que os estudos existentes não possibilitaram a mensuração real do impacto e da integração do uso da água na agricultura nas vazões finais dos cursos de água, pois os resultados se mostraram superficiais e empíricos. Notou-se a carência de informações essenciais para a maior confiabilidade e entendimento dessa interação, como dados sobre o consumo real da atividade irrigada, o tipo de manejo de irrigação e de solo utilizados, as áreas de vegetação nativa e em recuperação, bem como sua localização e o seu dimensionamento, além da verificação de dados qualitativos que abrangem aspectos de concentração de nutrientes e transporte de sedimentos.

Diferentes análises foram realizadas em caráter emergencial, mas pouco se aprofundou ou validou-se com maior tenacidade devido à urgência na tomada de decisões. No intuito de avaliar o impacto real de mudanças de uso e ocupação do solo e de adoção de ações conservacionistas no balanço hídrico, é necessária a existência de parâmetros e dados complexos e de maior precisão e confiabilidade, para ponderar os reais impactos da

agricultura como consumidora de recursos hídricos. No entanto, é perceptível a carência atual desses dados e a indefinição de metodologia para seu uso, principalmente no que tange a integração entre agricultura e recursos hídricos.

Técnicas de geoprocessamento vêm sendo utilizadas como um dos principais instrumentos para o auxílio na gestão ambiental, como o uso do sensoriamento remoto, por meio de processamento de imagens aéreas e de satélites, que torna possível caracterizar áreas, identificar seus usos preponderantes e até problemas ambientais, como queimadas e desmatamentos, ou ainda utilizando-se de ferramentas que ajudam na adequação ambiental, como na delimitação de unidades de conservação, áreas protegidas, áreas de transbordo, determinação de declividade, entre outros.

A utilização de imagens temporais para a construção de cenários é considerada ferramenta estratégica para análises prospectivas de sistemas, sendo empregada tanto para realização de diagnóstico, quanto para a averiguação de tendências, de forma a buscar antecipações de episódios prováveis de conflitos e eventos com potencial de impactar diretamente na qualidade e quantidade de água disponível (CORTEZ, 2007).

Dados devidamente processados podem ser empregados como base para estudos hidrológicos e para a compreensão da dinâmica dos fenômenos físicos decorrentes de situações adversas ao ambiente. Atualmente, a modelagem auxilia o entendimento da complexidade e dinâmica do sistema hidrológico e permite analisar comportamentos distintos a partir da variação de cenários de uso e manejo de água e solo.

A modelagem hidrológica oportuniza o melhor entendimento da dinâmica de bacias hidrográficas e de todo o ciclo hidrológico, permitindo a visualização de respostas quali-quantitativas relativas a mudanças climáticas ou de uso e ocupação do solo, bem como permite interpretar seu comportamento hídrico. Dentre diversos modelos, percebe-se a evolução e a adaptação do modelo SWAT para o território brasileiro, estando presente em todos os biomas, com aplicação principal em análises hidrológicas comuns e generalizadas, mas também para a simulação de sedimentos e poluentes (BRESSIANI *et al.*, 2015a). O SWAT+, versão mais atualizada do modelo, foi lançado recentemente, contando com melhorias em sua configuração e a inclusão de unidades de paisagem como novo componente para simulação de bacias hidrográficas.

Assim, é perceptível a necessidade e oportunidade de buscar e gerar dados e parâmetros mais precisos e confiáveis, melhorando a base de dados agropecuários e integrando-os com dados físicos, hidrológicos, pedológicos, climáticos, entre outros, e, a partir dessa integração, utilizando-se de modelos hidrológicos, analisar como as mudanças

do uso do solo e a adoção de práticas conservacionistas impactam e interagem com os aspectos qualiquantitativos de mananciais do DF, de forma que possibilite a replicação da metodologia em outras bacias hidrográficas, aumentando a confiabilidade dos resultados, além de balizar e respaldar as tomadas de decisões do governo.

Para tanto, o presente trabalho foi desenvolvido tendo como objeto de estudo as bacias hidrográficas do córrego Capão Comprido e do ribeirão Rodeador, ambas afluentes ao reservatório do Descoberto, principal manancial de abastecimento público do Distrito Federal.

A organização do texto foi feita por capítulos: (1) introdução (2) objetivos geral e específicos; (3) fundamentação teórica e revisão bibliográfica contemplando tópicos como técnicas de manejo e conservação de água e solo e modelagem hidrológica dando destaque ao modelo SWAT e principalmente à sua versão modernizada SWAT+ e sua abordagem agrícola; (4) metodologia aplicada na busca e preparação de dados, na construção de cenários de uso do solo e ao processo de modelagem, perpassando por calibração e verificação; (5) resultados e discussões; (6) conclusões do trabalho e recomendações; e por fim as referências bibliográficas utilizadas na construção desta pesquisa e os apêndices objetos do estudo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Analisar como a mudança do uso do solo e a aplicação de técnicas e práticas de manejo e conservação de água e solo em bacias predominantemente rurais do Distrito Federal influenciam no balanço hídrico e na qualidade de recursos hídricos.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar e analisar as bacias hidrográficas do córrego Capão Comprido e do ribeirão Rodeador desde a criação de Brasília até os dias atuais.
- Analisar por meio do modelo SWAT+ o comportamento hidrológico frente às mudanças do perfil de uso do solo nas bacias hidrográficas do córrego Capão Comprido e do ribeirão Rodeador desde a criação de Brasília até os dias atuais.
- Incorporar à base de dados do modelo SWAT+ informações regionalizadas relacionadas às características físicas das bacias hidrográficas e às práticas agrícolas empregadas no ambiente, incluindo o uso de fertilizantes, e verificar as alterações nas respostas da simulação.
- Aplicar o modelo SWAT+ e analisar a interferência da modificação do uso do solo e do emprego de diferentes práticas de manejo e conservação de água e solo e das rotinas de irrigação no balanço hídrico das bacias rurais selecionadas em cenários de uso prospectivos.

### **3. REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A revisão teórica e bibliográfica foi desenvolvida de modo a exibir o contexto da necessidade em analisar o impacto de boas práticas agrícolas na disponibilidade hídrica e na qualidade dos mananciais, passando por uma breve explanação das técnicas e práticas de manejo e conservação de água e solo.

Apresenta uma breve classificação dos modelos hidrológicos, seus procedimentos e usos preponderantes. Há o foco no modelo SWAT +, abordando sua aplicação e algumas de suas características, bem como estudos já realizados e sua abordagem agrícola.

#### **3.1 TÉCNICAS DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DE ÁGUA E SOLO**

A área rural do Distrito Federal desempenha importantes funções socioeconômicas e ambientais. No contexto ambiental, apresenta ampla potencialidade para a promoção da biodiversidade e da segurança hídrica. Entretanto, a atividade está, constantemente, sendo afetada devido às restrições hídricas impostas pelos órgãos gestores da água, o que impacta diretamente na diminuição do índice de produção de alimentos, diminuição de renda dos agricultores, tornando-os mais vulneráveis à especulação imobiliária e ao êxodo rural.

Práticas de manejo e conservação de água e solo contribuem positivamente na quantidade e qualidade de água disponível nos rios e córregos do Distrito Federal, inclusive na minimização da degradação de terras agrícolas, evitando a erosão hídrica.

A erosão hídrica é um dos principais processos de degradação de terras agrícolas, comumente é ocasionada por águas pluviais ou pela irrigação. Dá-se início pela chuva, em que parte desta é interceptada pela vegetação de cobertura e outra parte atinge a superfície do solo. O impacto da gota ocasiona a ruptura dos agregados, transformando-os em partículas de menor granulometria que ocasionam a formação de crostas e a selagem do solo, aumentando, assim, a sua compactação. A depender dessa compactação, do volume, da intensidade e da frequência da precipitação, a capacidade de infiltração e retenção de água do solo é excedida, formando poças e iniciando o escoamento superficial e seu fluxo linear, esse escoamento carrega os sedimentos, variando sua velocidade segundo a topografia do terreno.

A formação de microrravinas e ravinas dependem, além da topografia do terreno, de sua classe do solo, formas e tipos de cobertura e configuração de seu manejo, sendo mais suscetíveis os solos descobertos e mal manejados. De tal modo, os sedimentos são carregados

obedecendo a declividade do terreno até o encontro com corpos d'água, o que acarreta no aumento da concentração de sólidos dissolvidos na água superficial e na deposição de sedimentos em seu leito, ocasionando o assoreamento de margens. Portanto, o processo de erosão hídrica resume-se em três fases principais, que acontecem de modo sucessivo e concomitante: desagregação do solo, transporte de sedimentos e deposição de material em pontos mais baixos do relevo.

Os processos de erosão acarretam não só em prejuízos ambientais, mas também financeiros, pois reduzem a capacidade produtiva dos solos, devido à perda de nutrientes e matéria orgânica, além da quantidade de área disponível para a exploração agrícola, por meio do surgimento de ravinas. A partir da diminuição do volume infiltrado, reduz-se tanto o volume de água disponível para as plantas, quanto o volume do lençol freático, impactando no abastecimento de poços subterrâneos e rios. Abala-se também a qualidade de estradas e vias de deslocamento, dificultando ou impossibilitando o escoamento da produção agropecuária para mercados consumidores e o acesso de moradores e trabalhadores rurais.

### **3.1.1 Práticas de manejo e conservação de solo**

As práticas de manejo e conservação de solo constituem alternativas técnicas bem-sucedidas, muitas delas milenares, para prevenir, amenizar e corrigir os problemas relacionados especialmente à perda e carreamento do solo, atuando de forma proativa e integrada na produção e conservação da água e preservação do solo. O planejamento conservacionista deve observar as características intrínsecas do local, como relevo, regime de chuvas e propriedades do solo, de modo a maximizar a produtividade agrícola por meio de sistemas eficientes que respeitem a capacidade produtiva do solo e seu adequado aproveitamento. Portanto, a avaliação da aptidão agrícola deve considerar: (1) susceptibilidade do solo à erosão; (2) capacidade produtiva do solo; (3) potencialidade de mecanização; e (4) condições climáticas (ZONTA *et al.*, 2012).

Bertoni & Lombardi Neto (2012) dividem as práticas de manejo e conservação de solo em vegetativas, edáficas e mecânicas, priorizando as duas primeiras devido sua simplicidade de execução, sendo complementadas pelas práticas de caráter mecânico. Práticas vegetativas são aquelas em que se emprega a cobertura vegetal para proteção do solo, preservando sua integridade contra os efeitos da erosão, quanto mais densa a vegetação de cobertura, mais protegido encontra-se o solo. Práticas edáficas são aquelas em que o sistema de cultivo é modificado de modo a proporcionar o maior controle da erosão e a melhoria ou estabilidade

da fertilidade do solo, de modo a repor elementos nutritivos, diminuir a lixiviação e controlar a combustão da matéria orgânica. De Maria *et al.* (2019) também dividem as práticas conservacionistas nas mesmas três classes, contudo as práticas descritas diferem-se das listadas por Bertoni & Lombardi Neto (2012). Adicionou-se práticas e modificou-se nomenclaturas, de forma a ampliar suas abordagens e até mesmo subdividiu-as.

As práticas conservacionistas precisam agir nas três fases da erosão hídrica: desagregação, transporte e deposição. Assim as principais estratégias são: aumento de cobertura do solo — reduz a desagregação e transporte; aumento da rugosidade e da porosidade — aumenta infiltração e diminui energia do escoamento superficial; e controle do escoamento superficial — redução do transporte por barreiras mecânicas. A Tabela 1 apresenta a divisão das práticas e sistemas pelo seu caráter.

Tabela 1 - Práticas conservacionistas e sistemas de manejo do solo (adaptado de Bertoni Lombardi Neto, 2012 e De Maria *et al.*, 2019).

	<b>Caráter vegetativo</b>	<b>Caráter edáfico</b>	<b>Caráter mecânico</b>
<b>Bertoni &amp; Lombardi Neto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Florestamento e reflorestamento</li> <li>b. Pastagem</li> <li>c. Plantas de cobertura</li> <li>d. Culturas em faixa</li> <li>e. Cordões de vegetação permanente</li> <li>f. Alternância de capinas</li> <li>g. Ceifa do mato</li> <li>h. Cobertura morta</li> <li>i. Faixa de bordadura e quebra-ventos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Controle do fogo</li> <li>b. Adubação verde</li> <li>c. Adubação química</li> <li>d. Adubação orgânica</li> <li>e. Calagem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Distribuição racional dos caminhos</li> <li>b. Plantio direto</li> <li>c. Terraceamento</li> </ul>
<b>De Maria <i>et al.</i></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Cobertura morta</li> <li>b. Cordões ou faixas de vegetação permanente, aleias, quebra-vento</li> <li>c. Cultivo ou culturas em faixa</li> <li>d. Qualidade na população de plantas</li> <li>e. Plantas de cobertura do solo</li> <li>f. Cultivo consorciado</li> <li>g. Pastagem e sua integração com lavouras e florestas</li> <li>h. Manejo das plantas infestantes</li> <li>i. Florestamento, reflorestamento e faixas de bordadura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Controle do fogo</li> <li>b. Correção do solo e adubação</li> <li>c. Adubação verde</li> <li>d. Rotação de culturas</li> <li>e. Sistemas de manejo conservacionista (Semeadura direta e Plantio Direto)</li> <li>f. Operações de preparo de solo, subsolagem e controle da compactação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Distribuição de estradas e carreadores</li> <li>b. Cultivo em contorno com semeadura em nível</li> <li>c. Enleiramento da fitomassa cultural residual em nível</li> <li>d. Terraceamento</li> <li>e. Canais escoadouros e canais divergentes</li> <li>f. Sulcos de infiltração e diques em pastagem</li> </ul>

Quanto às práticas de caráter vegetativo, ressalta-se a importância do florestamento, por meio da conservação da vegetação natural, e o reflorestamento pela revegetação de áreas desmatadas. Ambas são objetos do Código Florestal Brasileiro o qual ressalta a necessidade de áreas protegidas em propriedades rurais, sejam elas as Áreas de Preservação Permanente (APP) ou Reserva Legal (RL). As APP são as áreas protegidas, coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, além de facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas, já a Reserva Legal é a área de uma propriedade ou posse rural com função de assegurar o uso econômico de modo sustentável dos recursos naturais presentes na propriedade, auxiliar a conservação e a reabilitação dos processos ecológicos e promover a conservação da biodiversidade (BRASIL, 2012).

Skorupa (2013) analisa os benefícios das áreas protegidas com respeito à sua importância como componentes físicos do agroecossistema, a partir de sua localização e cobertura. Em encostas acentuadas, a vegetação promove a estabilidade do solo pelo emaranhado de raízes das plantas, evitando sua perda por erosão e protegendo as partes mais baixas do terreno (estradas e cursos d'água); na área agrícola, evita ou estabiliza os processos erosivos, auxiliando na conservação do solo e age como quebra-ventos nas áreas de cultivo; em áreas de nascentes, age como amortecedor das chuvas, evitando o seu impacto direto sobre o solo e a sua compactação, auxilia na porosidade do solo e sua capacidade de infiltração, ocasionando o aumento da vazão do lençol freático e diminuindo escoamento superficial e o carreamento de partículas de solo e resíduos das atividades agropecuárias para os cursos d'água; nas margens de cursos d'água ou reservatórios, a vegetação atua como um filtro, em que evita o carreamento direto para o ambiente aquático de sedimentos, nutrientes e produtos químicos provenientes das partes mais altas do terreno, que podem afetar a qualidade da água e diminuir a vida útil dos reservatórios, das instalações hidroelétricas e dos sistemas de irrigação; no controle hidrológico de uma bacia hidrográfica, regula o fluxo de água superficial e subterrânea, e assim do lençol freático.

Observa-se que De Maria *et al.* (2019) divergem de Bertoni & Lombardi Neto (2012) quanto a classificação do caráter da técnica de plantio direto, estes consideram prática mecânica e aqueles prática edáfica, devido a não necessidade de maquinário para revolvimento do solo. Técnicas de plantio direto vem sendo empregadas no Brasil desde os anos 70, iniciada no Estado do Paraná, partindo da necessidade de mudança da paisagem rural, visto a evolução de processos erosivos e a perda de solos, essas originadas devido ao

uso contínuo e irracional de maquinários para revolvimento do solo, como arados e grades (REGO, 2002).

O Plantio Direto baseia-se na expressão “*no-tillage*” que significa sem preparo, já que esse sistema de plantio evita o revolvimento do solo por meio de implementos agrícolas, limitando a movimentação apenas à linha de semeadura, promove a deposição natural e superficial da cobertura morta (palhada), tornando o processo de decomposição lento e escalonado. O não revolvimento do solo e sua cobertura permanente suscitam o controle da erosão, a conservação da umidade do solo, a redução da temperatura, o controle de plantas daninhas, a melhoria da estrutura e fertilidade do solo e suas condições fitossanitárias (PEIXOTO *et al.*, 1997).

Dentre as práticas conservacionistas de caráter mecânico destaca-se a construção de terraços com o propósito de disciplinar o volume de escoamento das águas da chuva, a fim de proporcionar o aumento da infiltração e a redução do volume e velocidade do escoamento. Entre suas principais vantagens estão: armazenar água e sedimentos no canal (terraços de infiltração) e/ou conduzir a água e os sedimentos para fora da área produtiva (terraços de drenagem), podem ainda auxiliar na orientação para execução de outras práticas de manejo.

Terraceamento consiste na construção de um conjunto de estruturas transversais ao sentido do maior declive do terreno, com a utilização de maquinário agrícola como arados de disco ou aiveca (fixos ou reversíveis), motoniveladoras ou patrol, escavadeiras hidráulicas, terraceadores, entre outros. Seu dimensionamento depende das características da precipitação (quantidade, duração e intensidade), paisagem (comprimento de rampa, rugosidade do terreno, profundidade e permeabilidade do solo) e práticas de manejo (plantio convencional e plantio direto) e podem ser classificados da seguinte forma (DE MARIA *et al.*, 2019):

- Quanto à função: (i) terraços de desnível ou drenagem (interceptam e escoam o excesso de água entre solos) – indicado para solos com permeabilidade moderada a lenta; (ii) terraços em nível ou de infiltração (interceptam e retém a água para posterior infiltração) – indicado para solos de alta permeabilidade, podem ser construídos com as extremidades fechadas ou aberta.
- Quanto ao modo de construção: (i) terraço tipo *Nichols* – canal triangular e de base estreita, para a construção corta-se a terra por movimentos de cima para baixo para formação de dique, recomendado para declives mais acentuados (16 a 18 cm/m); (ii)

terraço tipo *Mangum* – canal trapezoidal ou parabólico e de base média a larga, para a construção movimenta-se a terra de cima para baixo e de baixo para cima, alternadamente, recomendado para declives suaves (até 16 cm/m). A diferenciação pode ser observada na Figura 1.

- Quanto à faixa de movimento da terra: (i) terraço de base estreita – largura de faixa de movimentação de até 3 metros, conhecidos também como “curvas de nível”, utilizado em declives superiores a 16 cm/m; (ii) terraço de base média - largura de faixa de movimentação entre 3 e 6 metros, utilizado em declives de 10 a 16 cm/m; (iii) terraço de base larga - largura de faixa de movimentação entre 8 e 12 metros, utilizado em declives de 6 a 12 cm/m, conforme representado na Figura 2.
- Quanto à forma do perfil: (i) terraço comum – construído de terra, composto de canal e dique e utilizado em áreas com até 18 cm/m de declividade, podem variar em embutido, embutido invertido ou leirão ou murundum; (ii) terraço em patamar – constituído de plataforma, onde são localizadas as culturas agrícolas, e de talude transversal à linha de maior declive, estabilizado por vegetação de cobertura, é recomendado para terrenos muito inclinados (acima de 18 cm/m), como observado na Figura 3.

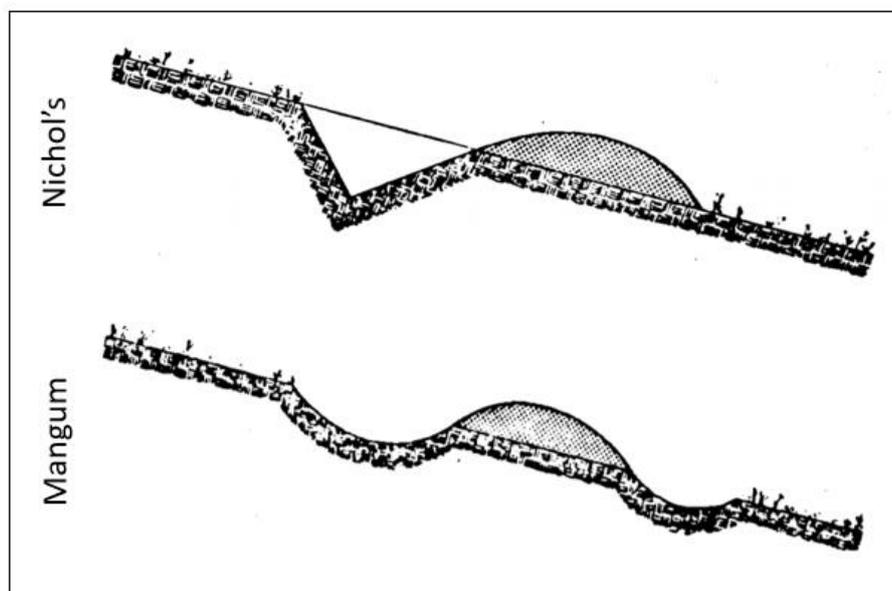


Figura 1 - Terraços quanto ao modo de construção (BIAS, 1992).

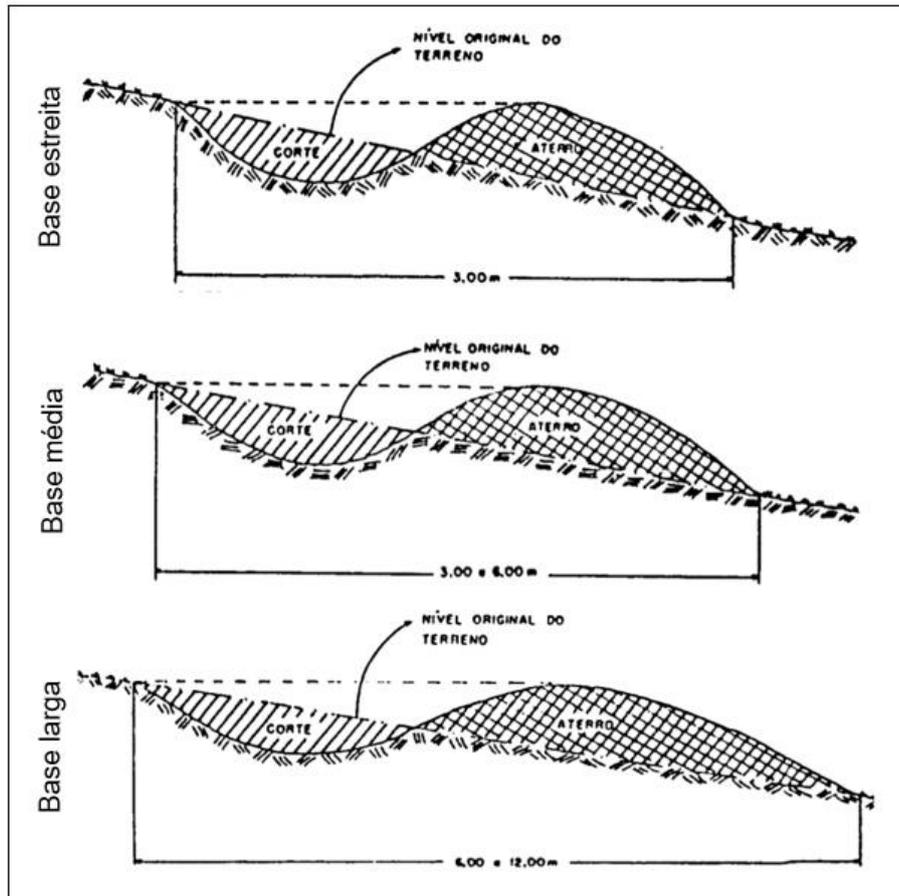


Figura 2- Terraços quanto à faixa de movimentação da terra (BIAS, 1992).

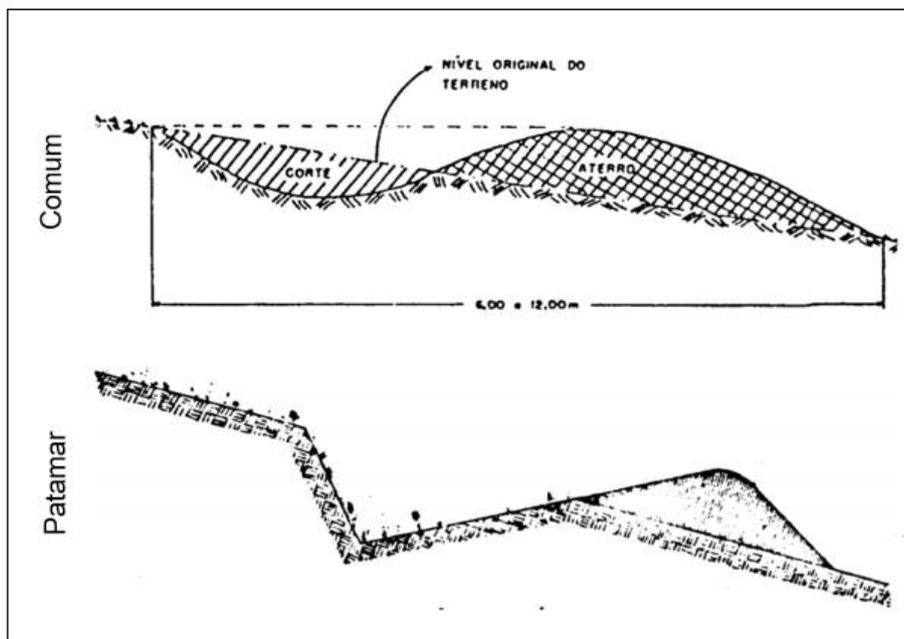


Figura 3 - Terraços quanto à forma do perfil (BIAS, 1992).

A manutenção de terraços deve ser observada de maneira preventiva e corretiva, as medidas preventivas focadas na minimização do processo de degradação dos terraços, e as

corretivas na restauração de suas dimensões, como a elevação de dique e limpeza de canal com retiradas de sedimentos e reposição do camalhão (PRUSKI *et al.*, 2009).

É importante a combinação do terraceamento com práticas edáficas e vegetativas, pois embora tenha elevada eficiência no controle de perda de solo e água, esse somente não controla todos os fatores da erosão hídrica.

De modo recente, notou-se a retirada de terraços em solos sob plantio direto, a partir de argumentos errôneos de que a palhada presente no sistema de plantio é capaz por si só de reter a enxurrada, entretanto, a palha pode aumentar a velocidade de infiltração e diminuir a desagregação do solo, mas não reduz completamente o escoamento. Áreas com plantio direto permitem o maior espaçamento do terraço, mas não sua eliminação por completo (MACHADO & WADT, 2016).

Sabe-se que a eliminação dos terraços também tem sido motivada pela dificuldade de utilização de implementos agrícolas em áreas terraceadas, porém é possível adaptar o tipo de terraço e seu espaçamento a depender também da necessidade de mecanização.

Outra prática mecânica essencial é a revitalização e manutenção de estradas, pois a imprecisão de projetos de drenagem que não observaram o tipo de solo e a declividade do terreno fazem com que as estradas sejam consideradas uma das principais causas de processos erosivos na área rural. Para melhoria de sua estrutura é necessário um controle preventivo. Guerra *et al.* (2006), recomendam medidas que visam a melhoria da captação, condução e dissipação do escoamento, entre elas: a proteção vegetal da área adjacente, como taludes, aterros, valetas e áreas de empréstimo; o revestimento e gramamento de valetas; construção de bueiros de concreto em travessias de drenagem, sejam córregos ou caminhos preferenciais da enxurrada; o abaulamento transversal da pista de modo a impedir o empoçamento ao longo da mesma; a construção de sangras laterais acompanhando o nível do terreno, como bigodes acompanhados de ondulações transversais (peito de pombo), e, por fim, a construção de estruturas dissipadoras de energia.

As bacias de acumulação agem de modo a reter o escoamento superficial proveniente de estradas rurais não pavimentadas, com a finalidade de evitar o empoçamento na pista e auxiliar à infiltração da água desviada. Essas se diferem das barragens de contenção, usualmente conhecidas por “barraginhas”, que agem como dissipadoras de energia e são destinadas à contenção do escoamento superficial em locais de maior declive e onde há a constatação de ravinas e sulcos em áreas de exploração agropecuária (PRUSKI *et al.*, 2009).

### 3.1.2 Práticas de manejo e conservação de água

A melhoria e a promoção de práticas e tecnologias inovadoras, voltadas ao uso sustentável da água na agricultura, como a revitalização de sistemas coletivos de distribuição de água, ampliação e adequação de reservatórios em propriedades rurais e, principalmente, substituição e melhoria de manejo em sistemas e tecnologias de irrigação poupadores de água e energia, contribuem para a segurança hídrica, em suas diversas finalidades, incluindo a restauração florestal em sistemas agropecuários, visando a adequação às normas legais de APP e Reserva Legal.

A irrigação é a prática agrícola que utiliza um conjunto de equipamentos e técnicas para suprir a deficiência total ou parcial de água para as plantas. É considerado um uso consultivo da água, pois a partir de sua captação esta é amplamente consumida pela evapotranspiração das plantas e do solo. O emprego da irrigação tem crescido substancialmente no Brasil, originado pelos resultados de incremento de produtividade e de qualidade.

A escolha do sistema de irrigação adequado é primordial para o sucesso da produção agrícola e deve considerar aspectos técnicos, como a necessidade de irrigação das culturas, quantidade e distribuição de chuvas, requerimento das culturas por água, conhecimento sobre oferta e demanda de água na região, a resposta das culturas à irrigação, a qualidade da água, e também fatores econômicos como: o valor de investimento para aquisição do equipamento, retorno econômico da cultura, custo da água e da terra, custo de mão-de-obra e energia, além de elementos referentes à vida útil e manutenção dos componentes do sistema (ALBUQUERQUE & DURÃES, 2008).

Em qualquer método de irrigação é necessária a condução da água a partir de um ponto de captação até a área de interesse, o tipo de condução deve ser devidamente dimensionado e a estrutura adequada. Os principais condutos utilizados são os canais (condutos livres) e encanamentos (condutos sob pressão).

Os métodos de irrigação se diferem pela forma de aplicação de água às plantas e são divididos em quatro classes, das quais derivam os sistemas: irrigação por superfície, irrigação por apersão, irrigação localizada e irrigação subsuperficial ou subirrigação (SOUSA *et al.*, 2011).

Irrigação por superfície é aquela em que a água escoia sobre a superfície do terreno, ou seja, utiliza-se o solo como o meio de transporte. A água pode ser transportada por gravidade

ou por meio de bombas até a área cultivada. Esse tipo de irrigação divide-se em dois métodos, um em que a água fica parada, cobrindo toda a superfície do solo e outro em que a água permanece em movimento, requerendo escoamento ou empoçamento para o final da área irrigada. Dentre as vantagens do emprego desse método estão o baixo investimento inicial e a possibilidade de reúso da água, contudo, requer alta mão-de-obra e a demanda hídrica é elevada, necessitando de vazões maiores. Os sistemas mais comuns desse método de irrigação são: irrigação por sulcos, bacias em nível, irrigação por faixas e irrigação por inundação.

A irrigação por aspersão é aquela que aplica a água nas áreas de cultivo simulando a chuva. Esse método utiliza-se de aspersores para aplicação na área total, estes podem ser de variadas formas e tamanhos, no entanto sua distribuição é desigual, pois os aspersores tendem a aplicar uma maior quantidade de água próximo ao ponto em que se localiza do que em sua periferia, assim é necessária a sobreposição de aspersores de forma a garantir maior uniformidade da aplicação. Os sistemas de irrigação por aspersão mais comuns são: aspersão convencional, ramal rolante, autopropelido, pivô central, lepa e lesa e os de deslocamento linear.

Os métodos de irrigação localizada aplicam a água diretamente no local de maior concentração radicular da cultura, de forma frequente, porém em baixa intensidade. Devido a alta frequência, o solo é mantido com teores próximos à capacidade de campo, o que pode aumentar a produtividade do cultivo. Os sistemas localizados permitem a automatização total e o uso da fertirrigação. Dentre suas vantagens destaca-se o maior controle da eficiência de irrigação e a necessidade de vazão mais baixa, porém estes métodos requerem uma água filtrada, pois os emissores entopem facilmente. Os sistemas que se baseiam neste método são: gotejamento, gotejamento subsuperficial e microaspersão.

A adoção de práticas de uso racional da água não deve se basear tão somente na adesão de sistemas de irrigação poupadores, mas sim na manutenção e desempenho de seus equipamentos e seu correto manejo e controle. A determinação do momento de irrigar e da quantidade de água a ser aplicada acarretam uma maior eficiência do uso da água, impactando tanto na diminuição da vazão captada e quantidade de água utilizada, quanto na maximização do rendimento econômico dos produtores rurais irrigantes.

Para determinar quando e quanto irrigar Resende & Albuquerque (2002) trazem algumas estratégias de manejo de irrigação, como: (i) observação de sintomas visuais de déficit hídrico nas plantas, como coloração, enrolamento e ângulo foliar, para estimar o

momento de irrigar, porém quando observados tais efeitos já há o comprometimento da produção; (ii) construção de calendário de irrigações, estimando as datas e as lâminas a serem aplicadas ao longo do ciclo da cultura, considerando o tipo de solo, cultura e fatores climáticos; (iii) aplicação do método do balanço da água no solo, que considera a equação do balanço hídrico, identificando a entrada de água (precipitação e irrigação) e as saídas (evapotranspiração da cultura), se o saldo chegar a zero significa que se faz necessária a irrigação naquele dia; (iv) utilização de instrumentos que proporcionam o monitoramento direto ou indireto do teor de umidade do solo, sendo o uso de tensiômetros o mais habitual.

Os tensiômetros são aparelhos que medem a tensão com que a água está retida pelas partículas do solo, também conhecido como potencial matricial, auxiliando na determinação do teor de umidade atual do solo e da quantidade de água armazenada nesse. Constituem-se de uma cápsula porosa permeável, de cerâmica ou porcelana, conectada a um medidor a vácuo, geralmente um vacuômetro metálico ou um manômetro de mercúrio (AZEVEDO & SILVA, 1999).

Os tipos de tensiômetros frequentemente utilizados são os de punção e os de vacuômetro, e esses podem ser de leitura automática ou analógica. Os tensiômetros de mercúrio entraram em desuso devido a dificuldade de manuseio e de aquisição do componente. A instalação deve considerar o sistema radicular da cultura e também do tipo de sistema de irrigação, modificando sua profundidade segundo o ciclo de crescimento da cultura. A leitura baseia-se no equilíbrio de energia potencial, isto significa que quando o solo estiver “seco” a água do tubo passa para o solo pela cápsula porosa criando vácuo no tensiômetro, já quando o solo está “úmido” a água entra pela cápsula, diminuindo o vácuo. Assim, a partir da determinação prévia da curva característica de água no solo, é possível concluir se é necessária a irrigação ou não da cultura (BRAGA & CALGARO, 2010).

Devido ao custo elevado destes aparelhos e a necessidade de manutenção constante, o acesso a essa tecnologia ficou limitado a grandes e médios produtores. Dessa forma, a Embrapa desenvolveu um “sistema gasoso de controle de irrigação” patentado com o nome Irrigas®, considerado durável e de baixo custo e que pode ser mais facilmente acessado por pequenos produtores rurais, de forma a auxiliar o manejo eficiente da irrigação, principalmente de hortaliças. Este consiste em uma cápsula porosa, que pode ser de diferentes medidas de pressão (kPa), conectada por um tubo de plástico flexível, uma cuba de leitura e um frasco com água, onde a cápsula deve ser introduzida no solo considerando o sistema radicular da planta e seu ciclo. Difere-se do tensiômetro pois é um sistema aberto,

atuando a partir do equilíbrio entre a água e ar presente no solo e sua cápsula porosa. A leitura é realizada introduzindo a cuba de leitura em um frasco de água, se a água ocupar o espaço da cuba, significa que o solo está “seco”, mas se não ocupar significa que o solo está “úmido”. A instalação deve ser realizada aos pares, sendo um mais raso, que indica quando irrigar e um mais profundo para indicar se a irrigação não foi excessiva. Recomenda-se a utilização de pelo menos três pares de Irrigas® por talhão plantado (MAROUELLI & CALBO, 2009; MAROUELLI *et al.*, 2015).

Sabe-se da existência dos impactos das atividades agropecuárias no ciclo hidrológico como um todo, desde a captação direta nos cursos d’água para uso consutivo do recurso, até as contribuições indiretas referente à concentração de nutrientes e assoreamento de ambientes naturais. Entretanto, a quantificação e a observação do impacto de mudanças no manejo em áreas agrícolas são complexas, pois perpassa por diversos processos e parâmetros. A modelagem hidrológica, de forma que congregue toda essa dinâmica, pode auxiliar no entendimento de tal comportamento hidrológico, inclusive no que tange aos aspectos qualiquantitativos.

### **3.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA**

O comportamento da água no ciclo hidrológico é extremamente complexo, o que dificulta as análises de seu comportamento e o entendimento de seus processos. Contudo, diversos modelos têm sido desenvolvidos, calibrados e aprimorados, possibilitando a confecção de diagnósticos e simulação de cenários hidrológicos por meio da utilização de parâmetros heterogêneos, direcionados e dinâmicos.

O comportamento hídrico de uma bacia hidrográfica é resultado de processos naturais, seu monitoramento contínuo se faz necessário para permitir o entendimento de sua dinâmica e a previsibilidade de respostas a perturbações, mesmo que localizadas. Os modelos hidrológicos visam atender a necessidade de representação, simulando e prevendo condições diferentes das observadas. Contudo, sua resposta é limitada, devido a aspectos físicos e processos intrínsecos, bem como à quantidade de dados observados e disponíveis, o que aumenta os graus de incerteza (TUCCI, 1998).

Tucci (1998) observa que o erro envolvido no uso de modelos, geralmente correlacionado com sua complexidade ou simplificação, deve ser observado na escolha do modelo ideal, segundo critérios pré-estipulados. Os modelos podem ser diferenciados em função dos elementos utilizados, da discretização, das prioridades da representação dos

processos, da escala espacial e temporal e dos objetivos a serem alcançados. A classificação de modelos deve verificar diversos critérios, como elucidado na Tabela 2.

Assim, modelos hidrológicos são capazes de simular resultados mais globais de comportamento ou até mesmo de gerar respostas mais específicas. Podem, ainda, idealizar respostas apenas quantitativas, como na simulação e entendimento do balanço hídrico, ou em respostas voltadas para a qualidade da água, como o impacto nos mananciais devido à utilização de fertilizantes e produtos fitossanitários como pesticidas e agrotóxicos.

Tabela 2 - Classificação de modelos para gerenciamento dos recursos hídricos. Fonte: (TUCCI, 1998).

Tipo de modelo	Objetivo
Comportamento	Visa prognosticar a resposta de um sistema, descreve seu comportamento a partir de especulação de alternativas.
Otimização	Busca as melhores soluções de um sistema específico.
Planejamento	Simula condições mais globais, generaliza e busca a quantificação socioeconômica e ambiental.

A classificação dos modelos hidrológicos varia segundo diversos aspectos e conceitos. A depender das variáveis utilizadas classificam-se como modelos estocásticos, quando pelo menos uma variável possui comportamento aleatório descrito em função de probabilidade, ou modelos determinísticos, quando negligencia-se os conceitos de probabilidade na elaboração do modelo e o comportamento da variável é determinado por equações. Considerando a relação entre as variáveis, podem ser modelos empíricos, quando não se baseia em processos físicos e sim em análises estatísticas, ou conceituais, quando se baseiam nos processos físicos do sistema. Já quanto à forma de representação de dados, podem ser modelos discretos, aqueles que modelam períodos isolados da série e buscam representar eventos de cheia e recessão, ou modelos contínuos, que representam longos períodos e comportamentos hidrológicos diferentes. Segundo a existência ou não de relações espaciais, podem ser modelos concentrados, quando não consideram a variabilidade espacial dos fatores hidrológicos, ou modelos distribuídos, que representam a variabilidade espacial das características físicas da bacia hidrográfica. E ainda podem ser classificados considerando se há ou não dependência temporal, em modelos estacionários, onde as variáveis não variam com o tempo, ou modelos dinâmicos, quando essas variam em função do tempo (MARINHO FILHO *et al.*, 2012).

Segundo von Sperling (2007), o procedimento de modelagem é iterativo, sendo necessário o retorno de etapas para reajustes. O fluxograma presente na Figura 4 apresenta as principais etapas para o desenvolvimento de um modelo matemático.



Figura 4 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento de modelo matemático (adaptado de von Sperling, 2007)

- **Objetivos** – definição do que se quer alcançar, da estrutura do modelo e dos esforços necessários que serão alocados para a concepção do trabalho.
- **Concepção** – representação do sistema, constando as variáveis a serem medidas e modeladas.
- **Seleção do tipo de modelo** – escolha do modelo ideal, complexo ou não, que atenda ao objetivo pré-definido.
- **Representação computacional** – estruturação das equações matemáticas com soluções analíticas ou numéricas.
- **Calibração e verificação** – ajuste entre os dados observados (medidos) e os estimados (calculados) a partir da variação dos parâmetros do modelo.
- **Validação** – avaliação do ajuste do modelo submetido a condições diferentes das usadas na calibração, inclusive com dados experimentais independentes e não utilizados em etapas anteriores. Caso os valores obtidos na validação não sejam o desejado, deve-se reavaliá-los e realizar nova calibração até se obter valores aceitos.

- Análise de sensibilidade – avaliação da estrutura e conjunto de parâmetros do modelo e quanto sua resposta é influenciada pelo valor de um dado de entrada.
- Aplicação – modelo apresenta as condições necessárias para sua aplicação, com estrutura e valores de coeficientes adequados.

Moriasi *et al.* (2015) analisaram medidas de desempenho e critérios de avaliação de desempenho de variadas bibliografias referentes a modelos hidrológicos, entre eles o SWAT. Observou-se que é mais frequente o emprego do NSE – *Nash-Sutcliffe* (Eq. 1), do coeficiente de determinação  $R^2$  (Eq. 2) e PBIAS – Percentual de viés (Eq.3), sendo esses suficientes para avaliação do desempenho de um modelo.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que  $O$  refere-se aos valores observados e  $P$  aos valores previstos. Os valores de NSE variam de menos infinito a 1, sendo 1 o seu valor ótimo. Dentre suas vantagens ressalta-se o seu uso para simulações contínuas a longo prazo e pode ser utilizado para avaliar o desempenho para variadas respostas de saída, como sedimentos, nutrientes e pesticidas.

O coeficiente de determinação  $R^2$  varia de 0 a 1, sendo 1 o seu valor ideal. É amplamente utilizado em estudos hidrológicos para avaliação de desempenho, porém possui limitação por ser sensível a valores extremamente elevados.

O PBIAS expressa em porcentagem o desvio dos valores observados em comparação com os simulados, varia de menos infinito a mais infinito, tendo 0 (zero) como valor ideal e pode ser usado para simulações contínuas e a longo prazo.

Moriasi *et al.* (2015) recomendam ainda a adoção de critérios de avaliação dos coeficientes sugeridos, os quais, a partir de seu valor obtido, podem ser classificados como muito bom, bom, satisfatório e não satisfatório. Essa classificação considera a escala

temporal e também o componente avaliado, variando desde a vazão do fluxo do escoamento até sedimentos e nutrientes, como pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3 - Critérios de avaliação de desempenho para medidas estatísticas para modelos em escala de bacias hidrográficas com base na distribuição dos dados existentes. (Adaptado e traduzido de Moriasi *et al.*, 2015)

Medida	Resposta de saída	Escala Temporal	Critérios de avaliação de desempenho			
			Muito bom	Bom	Satisfatório	Insatisfatório
<b>Escala da bacia hidrográfica</b>						
R <sup>2</sup>	Fluxos	D-M-A	R <sup>2</sup> > 0.85	0.75 < R <sup>2</sup> ≤ 0.85	0.60 < R <sup>2</sup> ≤ 0.75	R <sup>2</sup> ≤ 0.60
	Sedimentos / P	M	R <sup>2</sup> > 0.80	0.65 < R <sup>2</sup> ≤ 0.80	0.40 < R <sup>2</sup> ≤ 0.65	R <sup>2</sup> ≤ 0.40
	N	M	R <sup>2</sup> > 0.70	0.60 < R <sup>2</sup> ≤ 0.70	0.30 < R <sup>2</sup> ≤ 0.60	R <sup>2</sup> ≤ 0.30
NSE	Fluxos	D-M-A	NSE > 0.80	0.70 < NSE ≤ 0.80	0.50 < NSE ≤ 0.70	NSE ≤ 0.50
	Sedimentos	M	NSE > 0.80	0.70 < NSE ≤ 0.80	0.45 < NSE ≤ 0.70	NSE ≤ 0.45
	P / N	M	NSE > 0.65	0.50 < NSE ≤ 0.65	0.35 < NSE ≤ 0.50	NSE ≤ 0.35
PBIAS (%)	Fluxos	D-M-A	PBIAS < ±5	±5 ≤ PBIAS < ±10	±10 ≤ PBIAS < ±15	PBIAS ≥ ±15
	Sedimentos	D-M-A	PBIAS < ±10	±10 ≤ PBIAS < ±15	±15 ≤ PBIAS < ±20	PBIAS ≥ ±20
	P / N	D-M-A	PBIAS < ±15	±15 ≤ PBIAS < ±20	±20 ≤ PBIAS < ±30	PBIAS ≥ ±30
<b>Escala de campo</b>						
R <sup>2</sup>	Fluxos	M	R <sup>2</sup> > 0.85	0.75 < R <sup>2</sup> ≤ 0.85	0.70 < R <sup>2</sup> < 0.75	R <sup>2</sup> ≤ 0.70
d	Fluxos	M	d > 0.90	0.85 < d ≤ 0.90	0.75 < d < 0.85	d ≤ 0.75

D - Diárias / M - Mensais / A - Anuais

### 3.2.1 Evolução dos modelos

Segundo Tucci (1998), até a década de 50 os métodos utilizados para simulação hidrológica baseavam-se apenas em indicadores estatísticos. Contudo, a partir da popularização de operações computacionais e das inovações tecnológicas, ocorreu o acentuado desenvolvimento dos modelos, principalmente daqueles baseados no conceito de Precipitação-Vazão, que representam os principais processos do ciclo hidrológico. A evolução dos modelos baseia-se sobretudo no maior detalhamento e representação do ciclo hidrológico e suas equações empíricas alternativas.

Os modelos hidrológicos surgiram como forma de resposta ao que acontece com a água, em todo seu ciclo, e a partir da obtenção desse entendimento, viabilizou-se o melhoramento do planejamento e a operação de sistemas, bem como a otimização da utilização e da conservação do recurso hídrico. Historicamente, são utilizados de variadas formas, porém o início se deu pela necessidade do planejamento de ações voltadas para engenharia civil, como projeções de estradas, canais, esgotamento urbano, sistemas de drenagem, represas, bueiros, pontes e sistemas de abastecimento de água. Contudo, atualmente também são utilizados para planejar e projetar práticas de conservação do solo, gestão da água de irrigação, restauração de áreas úmidas e gerenciamento de uso de águas superficiais e subterrâneas. (SINGH & WOOLHISER, 2002).

Singh & Woolhiser (2002) ainda descrevem que a origem do modelo matemático se deu a partir do desenvolvimento do Método Racional por Mulvany no ano de 1850 e pelo modelo criado por Imbeau em 1982, que relacionava o pico de cheia de um dado escoamento

superficial com a intensidade da precipitação. A evolução perpassou por variadas teorias e metodologias ao longo do tempo, como por exemplo o desenvolvimento das leis de Horton nas décadas de 30 e 40, a qual trazia teorias referente à infiltração e ao escoamento, Thornthwaite e Penman, no ano de 1948, fizeram contribuições para modelos de evapotranspiração, o Serviço de Conservação do Solo, em 1956, desenvolveu o método SCS, que considera as condições do uso da terra no cálculo do deflúvio, entre outros. Todavia, a primeira tentativa de modelar virtualmente o ciclo hidrológico foi por meio do *Stanford Watershed Model-SWM*, criado por Crawford e Linsley no ano de 1966, o qual inspirou a criação de diversos outros modelos fisicamente baseados, como: SWMM - 1971; PRMS - 1983; Sistema de Previsão do Rio NWS - 1973; SSARR - 1982; Sistema Hidrológico Europeen (ELA) - 1986; TOPMODEL - 1979, e IHDM - 1980.

É perceptível a evolução dos modelos e o detalhamento de seus componentes, bem como a abrangência de sua área de utilização, sendo capazes de simular não apenas a quantidade de água, mas também aspectos referentes à qualidade. Esse melhoramento vem de forma convergente à melhoria das estruturas tecnológicas, que facilitam desde a coleta e armazenamento de dados até o processamento e otimização do tempo de resposta.

Almeida & Serra (2017) indicam quatro principais aplicabilidades da modelagem hidrológica atual. A primeira é a análise de consistência e preenchimento de falha, pois modelos possibilitam a extensão de séries não observadas utilizando-se de dados observados e ainda analisam a consistência dos mesmos. A segunda aplicabilidade é a estimativa de vazão visando o controle de cheia, navegação, operação de barragens, entre outros, e essa pode ser estimada com base, por exemplo, na precipitação já conhecida. A terceira é o dimensionamento e previsão de cenários de planejamento, em que é possível estimar vazões resultantes de diversos cenários e planejar adaptações na bacia. A última aplicabilidade indicada é a observação de efeitos resultantes da modificação do uso do solo, onde é possível conjecturar como mudanças de atividades antrópicas na bacia podem impactar o balanço hídrico.

### **3.2.2 Utilização de Sistemas de Informações Geográficas e Cenarização em modelagem**

Outra evolução observada é que o desenvolvimento de modelos hidrológicos vem sendo conectado a Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e técnicas de geoprocessamento como forma de unir as distintas séries de dados e informações disponíveis em multiescalas, permitindo a distribuição espacial de informações e visualização e análise de interações hidrológicas por áreas de estudo (FERRIGO *et al.*, 2012).

A utilização de SIG é considerada uma excelente ferramenta do geoprocessamento para investigação de fenômenos diversos, relacionados à engenharia urbana, meio ambiente, pedologia, vegetação e bacias hidrográficas. Além disso, na área ambiental, a tomada de decisões requer um conhecimento multidisciplinar. Desta forma, os softwares de SIG vieram resolver significativa parte dos problemas de tempo, mão-de-obra e da pouca precisão quando o volume de informações é amplo.

Assim, o emprego do geoprocessamento mostra-se uma alternativa viável e confiável para determinação e visualização espacial de áreas e suas interações. Por ser uma tecnologia que apresenta um custo relativamente baixo, o geoprocessamento está sendo utilizado em países de grande dimensão territorial e com poucas informações em escalas adequadas, já que para tomada de decisões sobre planejamento ambiental, esses estudos mostraram-se de relevante eficiência (FLORENZANO, 2002; ALMEIDA & SERRA, 2017).

Ainda considerando a modelagem como ferramenta de planejamento, sua utilização permite realizar análises prospectivas fundamentadas em tendências. Tais análises contribuem para a compreensão do funcionamento de um sistema e no planejamento estratégico de ações e tomadas de decisões, tanto por parte do poder público como da própria comunidade, de forma a prever e antecipar prováveis eventos.

Segundo Lima & Ponte (2009), estudos prospectivos direcionados à utilização de recursos hídricos devem ser iniciados por meio do diagnóstico geral da bacia hidrográfica, retratando desde fatores físicos e hidrológicos até os socioeconômicos. Após a caracterização, é necessário interpretar o comportamento da bacia, seus graus de dependência e independência a fatores observados e a capacidade de resiliência do sistema. Por fim, é preciso realizar a estruturação de tendências, examinando a dinâmica e a evolução da bacia hidrográfica, e, desta maneira, apontar e descrever estratégias futuras.

Dentre as técnicas de análises prospectivas destaca-se a cenarização, que consiste na formulação de cenários conjecturais de modo a auxiliar na visualização e no entendimento do comportamento de um sistema e, com isso, pressupor situações e efeitos futuros.

A construção de cenários com o propósito de assimilar um presumível comportamento de uma bacia hidrográfica contribui na compreensão de como o planejamento de ações e decisões a serem praticadas podem impactar diretamente na qualidade e quantidade de água da bacia futuramente. Essa oferta de antecipações contribui efetivamente na tomada de decisões de gestores, sendo uma importante ferramenta referencial para o planejamento

regional sustentável, análise integrada e gestão de conflitos pelo uso da água. (CORTEZ, 2007)

No âmbito nacional, diversos trabalhos têm sido realizados para a modelagem hidrológica, como: Cabral *et al.* (2017) que verificaram as incertezas e erros na estimativa de vazões usando modelagem hidrológica e precipitação por RADAR; Machado *et al.* (2017) avaliaram a aplicação e comportamento do modelo J2000/JAMS para modelagem hidrológica em bacias hidrográficas brasileiras; Hollanda *et al.* (2015) que utilizaram o modelo TOPMODEL na estimativa do escoamento superficial em microbacia hidrográfica em diferentes usos e na avaliação das estratégias de modelagem guiada por dados para previsão de vazão em rio sergipano.

No âmbito do DF, parte das pesquisas realizadas pelo Programa de Pós Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH) da Universidade de Brasília, tem seu foco na região, onde estudos têm sido desenvolvidos para caracterização e monitoramento dos processos hidrológicos, entre eles Ferrigo (2014) que analisa a consistência de parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática – estudo de caso da bacia do Descoberto – DF, observou-se boa adaptação do modelo SWAT à modelagem hidrológica em áreas rurais no DF.

### **3.3 SWAT - SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL**

O modelo SWAT foi concebido para a simulação em bacias rurais, principalmente no que tange ao entendimento do ciclo da água e características do solo, com o objetivo de prognosticar o impacto das práticas de gestão do uso do solo, produção de sedimentos e a aplicação de produtos químicos devido a cultivos agrícolas. É um modelo de tempo contínuo (longo prazo) e de base física que requer como dados de entrada informações sobre clima, solo, topografia, vegetação, uso do solo e suas práticas.

O SWAT originou-se a partir do modelo SWRRB (*Simulator for Water Resources in Rural Basins*), criado nos anos 80, o qual proporcionava a simulação da produção hídrica em bacias rurais, abordando fatores como águas subterrâneas, reservatórios, crescimento vegetal, propagação de cheias, transporte de sedimentos entre outros. O SWRRB foi aperfeiçoado para recepcionar e auxiliar à gestão da qualidade da água, introduzindo componentes relativos a pesticidas e estimativas mais aprimoradas de taxas de escoamento e produção de sedimentos. Apesar do modelo simular áreas de centenas de quilômetros, limitava-se a um número máximo de divisão de sub bacias. A partir da necessidade de um

modelo que atendesse áreas de maiores dimensões e aceitasse a divisão em maior número de sub-bacias, desenvolveu-se o modelo ROTO (*Routing Outputs to Outlet*), no começo dos anos 90, o qual possibilitou a conexão de múltiplas análises do SWRRB, porém essa interação demandava demasiado tempo e espaço de armazenamento de dados, tornando seu uso impraticável. De forma que viabilizasse a simulação de grandes áreas, fundiu-se os dois modelos (ROTO e SWRRB), surgindo o modelo SWAT (GASSMAN *et al.*, 2007; NEITSCH, *et al.* 2011).

O SWAT passou por constantes melhoramentos e expansões desde seu surgimento. Neitsch, *et al.* (2011) apresentam algumas das melhorias realizadas até a chegada da atual versão SWAT+, sendo elas: SWAT 94.2 - inclusão das Unidades de Respostas Hidrológicas (HRU); SWAT 96.2 - adição de opções de gerenciamento de irrigação e fertilização, adição da equação de *Penman-Monteith* para cálculo de evapotranspiração e de equações do QUAL2E para fluxo de nutrientes; SWAT 98.1 - melhoria da ciclagem de nutrientes, aplicação de adubos e adaptação para uso no hemisfério sul; SWAT 99.2 - inclusão de rotas de metais, de equações do SWMM e aprimoramento do processo de decantação para remoção dos nutrientes; SWAT 2000 - inserção da equação de *Green & Ampt*, melhoria do gerador de clima e leitura de radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento; SWAT 2009 - integração de cenários de previsão do tempo, introdução de parâmetros de CN em função de saturação do solo ou evapotranspiração de plantas, modelagem de sistemas de esgotamento e aprimoramento do uso de filtro por faixas de vegetação.

Atualmente, o modelo é interligado a ambientes de SIG como o ArcGIS, por meio do ArcSWAT, e o QGIS, por meio do QSWAT, o que auxilia na visualização espacial das informações. A partir de elementos iniciais, gera-se bacias e sub bacias que são correlacionadas com os demais dados de entrada, formando-se assim as HRUs (*Hidrologic Response Units*) ou URH (Unidades de Respostas Hidrológicas), respostas unitárias e homogêneas das características processadas, porém essas não são identificadas espacialmente. Com isso, se faz possível a simulação da dinâmica do ciclo hidrológico, sobretudo quanto à quantidade de água (vazões superficiais, reservação subterrânea, entre outros), ao comportamento e transporte de sedimentos e nutrientes, e à movimentação e plumas de contaminação de produtos fitossanitários e agrotóxicos.

A nova versão do modelo, o SWAT+, é resultante de diversas modificações, incremento e manutenção em seu código. Oferece suporte à disponibilidade, análise e visualização de dados e aprimora a capacidade do modelo em termos de representação

espacial de elementos e processos nas bacias hidrográficas.

Silva *et al.* (2021) realizaram um levantamento de artigos científicos que versam sobre o SWAT+, identificando os principais aprimoramentos da nova versão do modelo, quando comparado com sua versão anterior, e suas aplicações. A Tabela 4 apresenta as melhorias de funcionalidades observadas, as quais perpassam desde aspectos de desenvolvimento do software, com a diminuição de número de arquivos resultantes, até novas alternativas de fluxos hidrológicos.

Tabela 4 - Melhorias de funcionalidades do SWAT+ (Silva *et al.*, 2021).

<b>Categoria</b>	<b>Funcionalidades SWAT+</b>
Suporte na Calibração	Os usuários podem calibrar manualmente o SWAT+ usando o <i>calibration.ca</i> , o que não era possível na versão antiga.
Arquivos de entrada	Redução do número de arquivos de entrada e conseqüentemente diminuição do tempo de leitura e processamento.
Arquivos de saída	É possível definir os arquivos de saída que serão impressos de acordo com as necessidades dos usuários
Flexibilidade na codificação	Fácil de modificar/atualizar estrutura de codificação modularizada.
Softwares de apoio	Uso de softwares gratuitos e de código aberto, como o caso do uso SQLite ao invés do Microsoft Access.
Córregos e canais	As sub-bacias continuam sendo formadas com base na área de drenagem, mas podem agora conter diversos canais para onde as HRU drenam.
Lagos	Podem ser adicionados lagos, a partir de sua delimitação em arquivo do tipo <i>shapefile</i> .
Uso e manejo do solo	Possibilidade de definição de um número ilimitado de culturas cultivadas e crescendo ao mesmo tempo (comunidade de plantas e competição). Agendamento de operações baseadas em datas, unidades de calor e configuração de tabelas de decisão.
Unidades de Paisagem	Adição de divisão baseada na declividade, divididas em áreas de várzea ( <i>floodplain</i> ) e áreas de encostas ( <i>upslope</i> ).
Limite do Aquífero	Pode ser definido de forma flexível sem limitações, já sua versão antiga vinculava às HRU. Facilita a utilização do link SWAT-MODFLOW.
Conectividade	Os usuários podem definir os objetos individualmente na bacia hidrográfica.
Modelos de grade ( <i>grid</i> )	Possibilita a criação de modelos de grade.
Parâmetros	Uma maior gama de parâmetros pode ser definida.

Fluxos ambientais	Possibilita a criação de fluxos ambientais.
Operação do Reservatório	Os usuários podem atribuir regras na operação.

Dentre as mudanças ocorridas entre as últimas versões, sobressaem-se a implementação de unidades da paisagem (LSU) e o fluxo e roteamento de poluentes por ela (SILVA *et al.*, 2021; BIEGER *et al.*, 2017). O SWAT+ fornece uma representação espacial mais flexível das interações e processos dentro de uma bacia hidrográfica, em especial no que tange à definição de cronogramas de gerenciamento, à definição de componentes de roteamento e à conexão de sistemas de fluxo gerenciado à rede de fluxo natural. As modificações realizadas visam facilitar a manutenção do modelo além de proporcionar modificações no código e a integração de diversos colaboradores com o modelo (BIEGER *et al.*, 2017).

Bieger *et al.* (2017) apresentaram os novos recursos do modelo SWAT+ a partir de sua aplicação em uma bacia experimental nos Estados Unidos. Observaram que há a continuidade da divisão por meio de HRUs, contudo, essas ainda não são espacialmente referenciadas, porém a sua determinação é mais flexível, permitindo a discretização pelo usuário. A representação das LSU se dá segundo as características topográficas do terreno e auxiliam no cálculo mais preciso do tempo de concentração. O SWAT+ possibilita, ainda, uma definição mais aprimorada de aquíferos, reservatórios, canais de irrigação, emprego de bombas e até mesmo a utilização de água por rebanhos de animais. Permite, além disso, a utilização do modelo de águas subterrâneas MODFLOW como componente regular do SWAT+, onde o usuário pode optar por representar aquíferos conforme as configurações do SWAT ou então pelas configurações do MODFLOW para simulação dos processos subterrâneos. A nova versão do modelo conta com a implementação de tabelas de decisão, que propiciam a definição de conjuntos de regras a fim de programar operações de gerenciamento. Para isso, utiliza-se critérios definidos pelo usuário, considerando diversas variáveis que tornam mais realista os cronogramas de gerenciamento em uma bacia hidrográfica.

O SWAT+ apresenta novo componente de distribuição espacial, já mencionado, as unidades de paisagem (LSU). Ressalta-se que as bacias geradas pelo modelo ainda contam com a subdivisão em sub-bacias, a partir dos cursos d'água principais, contudo, na versão anterior, essas eram posteriormente fragmentadas em HRU, agora, no SWAT+, as sub-bacias passam anteriormente por subdivisão em LSU, conforme ilustrado nas figuras 5 e 6,

para em seguida gerarem as HRUs. Destaca-se, ainda, que a componente “água” atualmente é considerada um componente à parte.

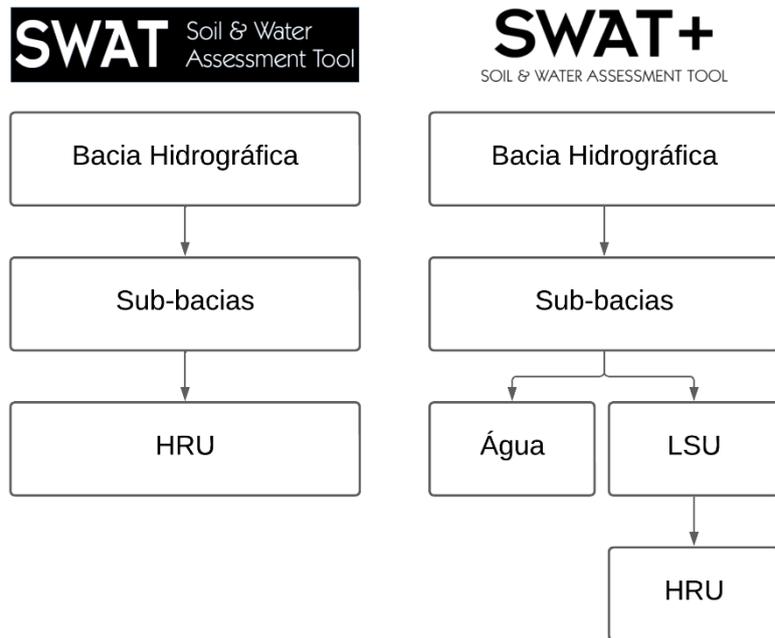


Figura 5 - Esquema de delimitação do SWAT+ e sua versão anterior (Adaptado de Arnold *et al.*, 2021).

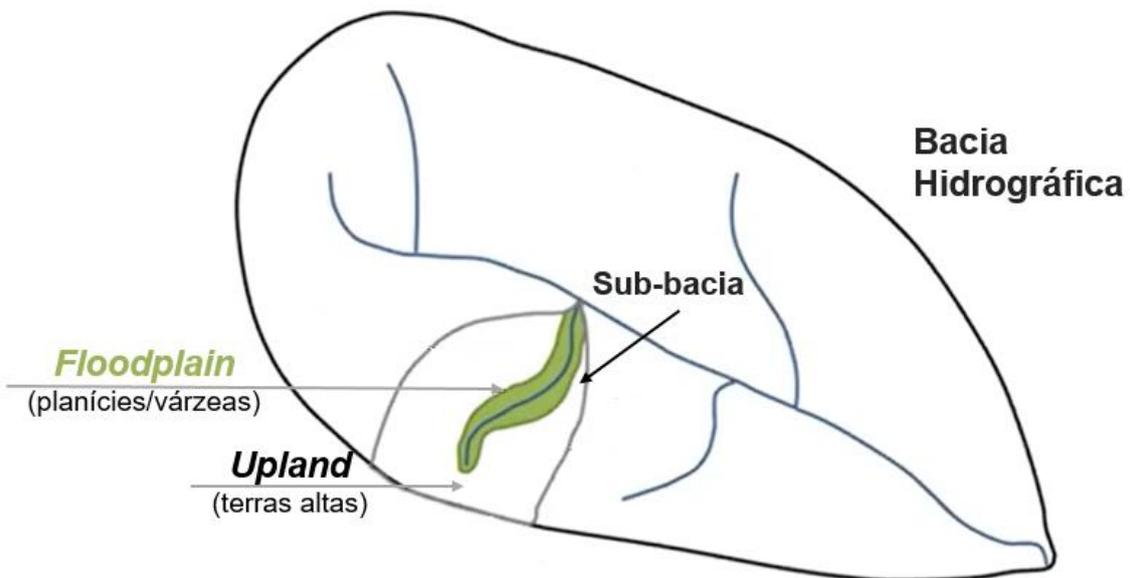


Figura 6 - Representação da bacia hidrográfica e as subdivisões em sub-bacia e unidades de paisagem (*floodplain* e *upland*) (Adaptado de Srinivasan, 2021).

Assim, a nova versão do modelo possibilita a divisão da bacia segundo suas características topográficas em duas unidades de paisagem: *floodplain* (planícies/várzeas) e

*uplands* (terras altas). A inserção desse componente justifica-se devido a interferência das características topográficas nos processos e funções hidrológicas de uma bacia hidrográfica, o que ocasiona a melhoria da capacidade preditiva da simulação hidrológica. Dentre as principais diferenças entre as unidades de paisagem que impactam no processo hidrológico estão: o nível dos lençóis freáticos, tipo de solo, conteúdo de matéria orgânica, níveis de oxigênio, sedimento, armazenagem hidrológica, entre outros (RATHJENS *et al.*, 2016).

A Figura 7, retirada de Bieger *et al.* (2017), ilustra a nova representação presente no SWAT+ das conexões e o fluxo hídrico entre as unidades de paisagem (LSU), as unidades de respostas hidrológicas (URH /HRU), aquíferos e canais.

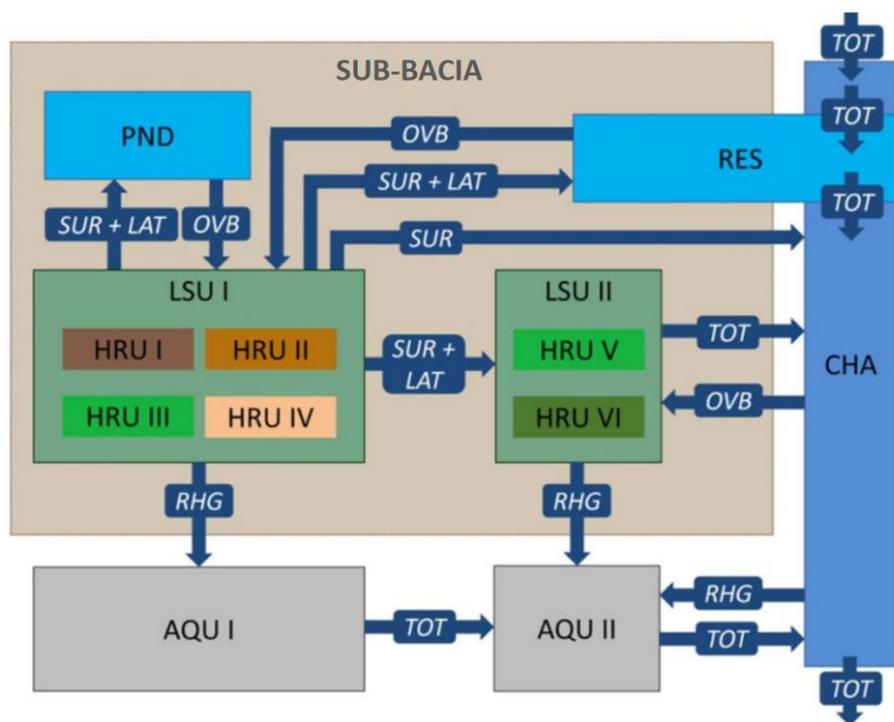


Figura 7 - Fluxo conceitual da água dos principais objetos geográficos abordados no SWAT+. (BIEGER *et al.*, 2017)

As abreviaturas citadas na Figura 7 equivalem aos seguintes componentes: AQU - aquífero; CHA - canal ou curso d'água; HRU - unidade de resposta hidrológica; LSU - unidade de paisagem; PND - reservatórios sem regulação de vazão (reservatórios agrícolas, lagos naturais); RES - reservatórios com regulação de vazão (barragens); LAT - fluxo lateral; OVB - vazões de extravasamento; RHG - recarga; SUR - escoamento superficial; TOT - fluxo total. O SWAT+ possibilita configurar a porcentagem do fluxo que vai para o aquífero ou para o canal. Enfatiza-se que no SWAT+ existe um aquífero raso para cada uma das classes de unidade de paisagem (*floodplain* e *upland*), porém apenas um aquífero profundo para a bacia.

Rathjens *et al.* (2016) compararam quatro métodos de delimitação das unidades de paisagem baseados na representação a partir do DEM e parâmetros físicos significativos da área em questão. Testou-se em 3 bacias hidrográficas dos Estados Unidos com características climáticas, hidrológicas e geomorfológicas diversas, porém de tamanhos semelhantes. Os métodos testados e atualmente disponíveis no modelo são: *TWI - Topographic Wetness Index*, que combina a área de contribuição da encosta e a declividade; *SP - Slope Position*, que considera a posição relativa entre a maior (vale) e a menor (cume) altitudes do terreno; *UFS - Uniform Flood Stage*, que realiza a divisão considerando a elevação da rede de drenagem e o DEM, e *VFS - Variable Flood Stage*, o qual considera o DEM e as características hidrológicas da bacia, utilizando-se de algoritmos. Os métodos SP e VFS funcionaram muito bem em todas as bacias e obtiveram melhor desempenho do que o TWI e UFS, pois estes subestimaram e superestimaram a extensão do *floodplain*. O método SP demonstrou melhor desempenho ao longo de cursos d'água de primeira ordem e o VFS em cursos de ordem superior, porém em áreas de nascentes a resolução do DEM poderá interferir diretamente na precisão dos resultados.

Quanto a estruturação e organização dos arquivos no SWAT+, há diferenças substanciais. Os dados de cobertura e manejo do solo, por exemplo, contam com um arquivo principal de uso do solo com parâmetros gerais e também com arquivos referentes à comunidade de plantas, cronograma de manejo e práticas de conservação, possibilitando, inclusive, a simulação do crescimento de duas ou mais plantas ao mesmo tempo.

Outro ponto importante é que o SWAT+ oferece maior flexibilidade na impressão dos arquivos de saída, pois permite que o usuário especifique qual HRU, LSU ou bacia deseje-se imprimir o resultado da simulação e em qual intervalo de tempo. Para calibração, há um novo arquivo incluído no SWAT+ que pode ser usado para atualizar os parâmetros sem ter que alterá-los em seus respectivos arquivos de entrada.

Cabe ressaltar que o SWAT+ é um modelo de domínio público desenvolvido em conjunto pelo Serviço de Pesquisa Agrícola do USDA (USDA-ARS) e pelo *Texas A&M AgriLife Research*, parte integrante do *Texas A&M University System* e é amplamente utilizado na avaliação da prevenção e controle da erosão do solo, controle de poluição não pontual e gerenciamento regional em bacias hidrográficas (TECH, 2019).

### **3.3.1 Aplicações do modelo SWAT e SWAT+**

Bressiani *et al.* (2015a) verificaram o uso e aplicação da ferramenta SWAT no Brasil

ao longo do período de 1999 a 2015. Realizou-se levantamento bibliográfico de 113 estudos desenvolvidos no território e publicados em revistas, simpósios e também em formato de teses e dissertações. Percebeu-se a evolução no uso do modelo em todos países, o qual é utilizado principalmente em análises hidrológicas gerais, e em menor escala em análise de transporte de sedimentos e de poluentes como nutrientes e pesticidas. A aplicação do modelo foi bastante heterogênea no que tange às regiões e biomas do país, sendo que mais de 60% referem-se à região Sul e Sudeste, contudo identificou-se o crescimento gradual da aplicação do modelo nas demais regiões ao longo dos anos. Os autores observaram que os estudos são em sua grande maioria objetos exclusivamente de estudos acadêmicos, o que indica que a ferramenta ainda não havia sido efetivada como instrumento de auxílio às tomadas de decisão na gestão governamental de recursos hídricos, o que pode ser consequência da indisponibilidade de dados ou da complexidade do acesso a esses, bem como da necessidade de adaptação do modelo à realidade brasileira. Contudo, verificou-se a alta potencialidade de aplicação do SWAT no âmbito de gestão hidrológica, visando o melhor entendimento do sistema hídrico, abarcando o ciclo hidrológico e o transporte de sedimentos, nutrientes, pesticidas, entre outros.

Quanto à qualidade e quantidade de dados de entrada no SWAT, Bressiani *et al.* (2015b), mostrou que mesmo em bacias com dados hidrológicos escassos é possível utilizar-se de sistemas de previsões globais para simulações hidrológicas, acopladas com dados pontuais de precipitação e com a geração de dados faltantes pelo próprio modelo SWAT. O estudo analisou uma bacia hidrográfica na região do semiárido brasileiro com o objetivo de verificar as variadas respostas hidrológicas resultantes de diferentes dados de entradas, com variação de escalas temporais e de resoluções espaciais. Ponderou-se os impactos de quatro combinações diferentes de fontes de dados do clima sobre as estimativas de vazão simuladas no modelo, desde dados locais por meio de pluviômetros até a utilização de dados provenientes de sistema global de previsão climática, como o CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*). Os dados foram divididos da seguinte forma: Grupo 1 – dados climáticos mensais de pequenas estações meteorológicas locais e dados diários de pluviômetros locais; Grupo 2 – dados diários de pluviômetros locais e de estações meteorológicas nacionais (INMET); Grupo 3 – dados climáticos diários provenientes do sistema CFSR; e Grupo 4 – dados locais diários de pluviômetros associados aos dados climáticos diários do CFSR. Utilizou-se o *SWAT Weather Generator* para a geração de dados faltantes em todos os grupos, como por exemplo dados em falta referente à precipitação. Avaliou-se o desempenho

das simulações utilizando os coeficientes de Nash-Sutcliffe (NSE), de determinação ( $R^2$ ), a relação entre o quadrado médio da raiz para o desvio padrão dos dados observados (RSR), e o percentual de viés (PBIAS). O grupo 4, que contou com a utilização do sistema CFSR, obteve o melhor desempenho global com bons resultados em todas as métricas de eficiência, seguido do grupo 1. O grupo 2 e 3 mostram resultados insatisfatórios, sugerindo que os dados climáticos globais por si só possuem limitações para uma simulação razoável, mas que a utilização de dados CFSR para outros fins, juntamente com dados de precipitação de chuva locais calibres, pode fornecer respostas hidrológicas plausíveis.

Strauch *et al.* (2013), analisaram o fluxo e carga de sedimentos através do SWAT. Cenários foram simulados e demonstrou-se que determinados tipos de práticas de manejo mecânicas do solo, como terraços e “barraginhas”, podem ocasionar reduções de até 40% da carga de sedimentos. Zhang & Zhang (2011), analisaram a eficácia da modelagem de BMPs agrícolas na redução da carga de sedimentos e pesticidas organofosforados no escoamento superficial na Bacia Hidrográfica de Orestimba Creek, Califórnia - EUA, também se utilizando do SWAT, o qual foi calibrado e passou por processo de análise de sensibilidade. A simulação indicou que as lagoas de sedimentos retêm 54–85% do sedimento escoamento de campo, mas retêm menos de 10% de alguns princípios ativos de pesticidas dissolvidos. Concluiu que valas e tampões de vegetação, suas dimensões físicas e a combinação com outras BMPs proporcionam a mitigação mais aprimorada dos efeitos da sedimentação e até retenção de cargas de pesticidas, sugeriu ainda que o SWAT prevê razoavelmente a eficácia da BMP na escala da bacia hidrográfica e que pode auxiliar na tomada de decisões na implementação de BMPs para reduzir as cargas de pesticidas no escoamento superficial.

Teshager *et al.* (2017), simularam, através do SWAT, cenários de gestão a partir da inserção de BMPs, como: manejo de fertilizantes e adubo, mudanças de uso do solo de lavoura convencional para pastagem, inserção de filtros vegetativos nos talhões e até mesmo a utilização de drenos rasos para redução de nitrato. Os resultados indicaram que para a redução de teores de nitrato e de aporte de sedimentos em cursos d’água se faz necessária a implementação de múltiplas BMPs associadas. Analisou-se também o impacto das mudanças climáticas na adoção e funcionamento efetivo das BMPs, reduzindo substancialmente sua eficiência, o que corresponderia a maiores teores de nitrato e sedimentos.

Quanto a utilização da modelagem integrada com irrigação e nutrientes, Dechmi *et al.* (2012) modificaram o SWAT 2005 de forma que este pudesse simular os principais

processos hidrológicos presentes na irrigação e concentração de nutrientes, principalmente quanto à carga de fósforo total, assim concebeu o SWAT-IRRIG o qual previu adequadamente a carga total de fósforo (TP), ainda sugeriu a utilização do modelo na avaliação dos impactos de diferentes práticas de gestão nas perdas não pontuais de fósforo em sistemas irrigados. Chen *et al.* (2018) melhoraram as funções de autoirrigação presentes no SWAT, de forma a simular o gerenciamento da irrigação agrícola. Comparou-se os resultados obtidos com dados de campo provenientes de lisímetro, e concluiu-se que o modelo mostrou melhor desempenho para simulações de quantidade e frequência de irrigação, e também de evapotranspiração real. Verificou-se diferenças mínimas no índice de área foliar e de produtividade, isto devido a correta irrigação, onde os cultivos não entraram em estado de stress hídrico devido ao correto manejo.

Quanto ao transporte de nitrogênio, Moriasi *et al.* (2013) utilizaram o modelo SWAT para a avaliação da sensibilidade e de efeitos à longo prazo de diferentes taxas de aplicação de nitrogênio (proveniente de fertilizantes nitrogenados), observando o comportamento nitrato-nitrogênio ( $\text{NO}_3 - \text{N}$ ), importantes no crescimento da planta, e a perda de sua concentração no solo, devido a lixiviação. A partir da simulação verificou-se que as perdas de  $\text{NO}_3 - \text{N}$  estão ligadas às taxas de aplicação, sendo que quando essa é muito elevada a perda de nitrogênio disponível é maior. Contudo, se as taxas de aplicação forem melhores calculadas e avaliadas, de forma a disponibilizar o que realmente a planta necessita, as perdas diminuem em até 50%. O autor comparou os resultados obtidos pelo SWAT com o do modelo ADAPT (*Agricultural Drainage and Pesticide Transport*).

Arnold *et al.* (2018), adaptaram o SWAT + para desenvolver tabelas de decisão de modo a aprimorar a simulação da automatização da irrigação e da gestão de reservatórios. A automação da irrigação baseou-se no estresse hídrico da planta cultivada (milho) no estado do Texas – EUA. A simulação da irrigação só aconteceria caso o cultivo apresentasse níveis de estresse hídrico que a justificasse, baseado em dados da umidade do solo. Concluíram que o uso de tabelas de decisão possibilita representar, com maior precisão, decisões complexas e reais e que a metodologia possui código eficiente, de fácil manuseio e possibilita modificações para otimização, sendo facilmente replicada e adaptada.

Ainda quanto a utilização recente do SWAT+, White *et al.* (2017) optaram pela utilização do SWAT+ em substituição ao SWAT, a fim de examinar o Conjunto de Dados Hidrográficos Nacionais dos Estados Unidos (NHD) de forma a resumi-los a canais representativos e conexões referentes a uma sub unidade hidrográfica. As versões anteriores

do SWAT exigem um delineamento de sub-bacia muito específico no que tange a simulação de processos que ocorriam em córregos de cabeceira, o que o tornam inviável operacionalmente quando aplicados a escala nacional. Contudo o SWAT+ mostrou-se efetivo quanto a modelagem mais aprimorada mesmo em escala nacional mais detalhada, possibilitando o equilíbrio entre a complexidade computacional e a representação correta do sistema hidrológico.

Merwade *et al.* (2017), apresentam série de estudos que realçam a ampla aplicabilidade e versatilidade do SWAT+, abordando questões hidrológicas tradicionais e emergentes, bem como os novos avanços no modelo. Perpassa por estudos de avaliação de efeitos no uso da terra, clima e melhores práticas de gestão na hidrologia, bem como aplicações mais atuais como bioenergia, serviços ecossistêmicos e até mesmo sobre efeitos do desenvolvimento de gás natural na hidrologia e na qualidade da água. Diversos estudos abordam temas como calibração, análise de sensibilidade e incerteza e o acoplamento do SWAT com outros modelos como CE-QUAL-W2. Por fim, ressalta que o modelo continua se desenvolvendo constantemente, como no caso do SWAT+ que deve apresentar uma mudança de paradigma ao subdividir as sub-bacias em unidades de paisagem e direcionar o fluxo e os poluentes através dessas.

Wu *et al.* (2020), aproveitando a estrutura modular do SWAT+, objetivaram desenvolver um módulo de reservatório mais realista para o modelo, com intervalos de parâmetros recomendados para avaliações ambientais nos Estados Unidos e também para a comunidade de usuários a partir da simulação de 120 reservatórios. Consideraram que a principal contribuição do SWAT + é que os objetos espaciais foram construídos como módulos independentes facilitando a manutenção do modelo e o desenvolvimento correspondente, como por exemplo os limites dos aquíferos correspondentes podem ser definidos de forma flexível sem seguir as limitações de HRUs. As novas funções de reservatório propostas em SWAT + oferecem uma abordagem fácil e simples para resolver o problema correspondente. Além disso, pela ampla utilização do modelo em todo mundo, a simulação de reservatório em todo o EUA pode fornecer um valor de referência prático para os pesquisadores que se concentraram no ciclo hidrológico no modelo SWAT. O estudo conclui que embora o número de reservatórios não tenha sido suficiente (dados de 123 reservatórios foram coletados para validar os resultados da simulação), e a simulação diária não foi muito satisfatória para todos os reservatórios, os resultados ainda podem ser servidos como um guia referencial útil para a calibração SWAT +, podendo ser revisado e atualizado

futuramente.

Arnold *et al.* (2021) utilizaram o SWAT+ para a construção de um modelo nacional de agroecossistemas para os Estados Unidos, no qual dividiram o território em cinco domínios específicos a partir de características como área de drenagem, conectividade hidrológica, processos erosivos, práticas de manejo agropecuárias, entre outros, de forma que essa nova classificação possibilite a simulação de cenários de planejamento e desenvolvimento de políticas públicas, bem como a previsibilidade da disponibilidade hídrica futura. Assim, a partir da modelagem de processos e práticas de gerenciamento hidrológico, permita-se simular fluxo, processos de transporte, conectividade e interação hidrológica entre cada um dos domínios, reconhecendo quais técnicas e formas de gestão agrícola são mais apropriadas para cada domínio. Os autores verificaram que, mesmo dentre vários desafios, a estrutura de conectividade mostrou potencial para a melhoria acentuada da conservação nacional do meio ambiente.

### **3.3.2 Aplicação do SWAT para a simulação de áreas agrícolas**

O SWAT+ possibilita a realização de simulações diversas, referente a variados processos diretos e indiretos do ciclo hidrológico, observando o impacto da interferência antrópica no sistema. As atividades agropecuárias modificam o comportamento natural do ambiente, seja pela adição de nutrientes no solo, modificando concentrações naturais, seja pela retirada da água das vazões naturais dos rios para utilização na irrigação, ou até mesmo na retirada de cobertura do solo que ocasiona assoreamentos em cursos d'água. O modelo possui uma abordagem específica para atividades agrícolas, determinados processos possíveis de simulação encontram-se melhor explicados em manual próprio do software e encontram-se elucidados nos tópicos seguintes (NEITSCH *et al.*, 2009).

#### **3.3.2.1 Nutrientes**

Entre as simulações/equações presentes no SWAT estão as dos ciclos dos nutrientes, onde é abordado o ciclo do nitrogênio e o ciclo do fósforo.

Na área rural, os nutrientes possuem alta significância, pois estão diretamente conectados com o crescimento de plantas e sua falta pode limitar o desenvolvimento de culturas. Altas taxas de concentração desses nos mananciais estão diretamente ligadas à perturbação da qualidade de ambientes lóticos, principalmente no que tange aos processos de eutrofização e de anoxia de zonas de reservatórios e lagos.

O nitrogênio apresenta-se de três formas em solos minerais: os associados ao húmus (orgânico) e os que se encontram presos por coloides no solo ou em solução (minerais).

A adição do nutriente no solo pode ser realizada por meio de adição de fertilizantes (minerais ou orgânicos), pela fixação de bactérias e pelo carreamento realizado pela chuva. Já a sua remoção se dá pela própria absorção das plantas, mas também pelos processos de lixiviação, volatilização, nitrificação e até por processos erosivos. A Figura 8 ilustra o ciclo do nitrogênio.

É importante ressaltar que o nitrogênio é altamente reativo e seu estado de valência pode ser variado facilmente, o que o torna um elemento altamente móvel.

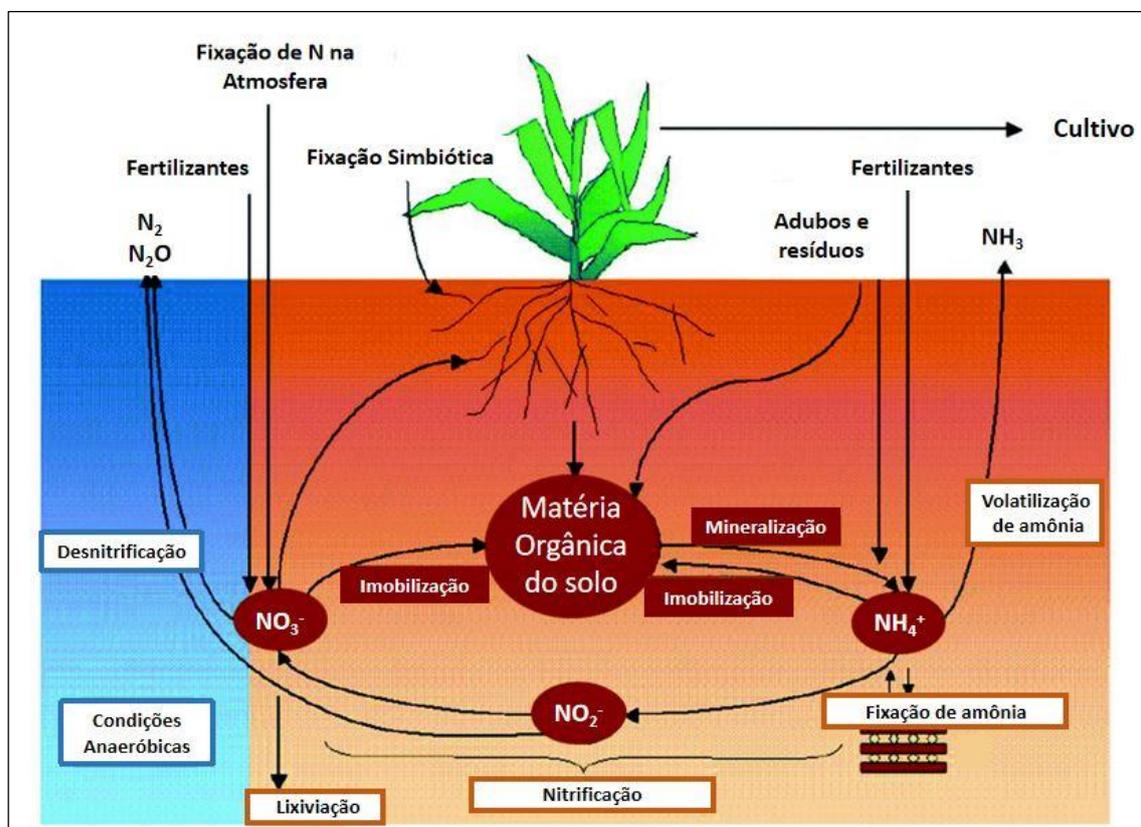


Figura 8 - Ciclo do nitrogênio - adaptado de Neitsch *et al.* (2009).

A representação e simulação no SWAT considera reservatórios de nitrogênio no solo (Figura 9), sendo dois referentes a sua forma inorgânica ( $NH_4^+$  e  $NO_3^-$ ) e três a sua forma orgânica, sendo dois deles associados ao húmus do solo e um aos resíduos e massa microbiana.

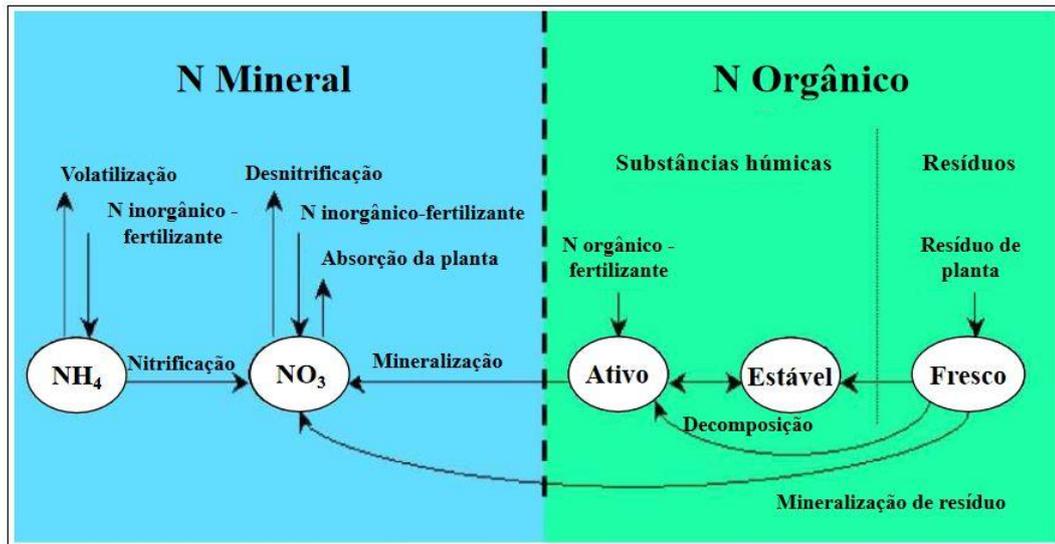


Figura 9 - Dinâmica dos reservatórios de nitrogênio no SWAT - adaptado de Neitsch *et al.* (2009).

Aos usuários do SWAT é possível a definição inicial das concentrações de nitrogênio e nitrato em todas as camadas do solo, contudo se esses valores não forem definidos, o próprio modelo irá inicializar seus níveis nos diferentes reservatórios por meio de um valor padrão.

Os níveis de nitrato variam pela profundidade a partir da superfície do solo, já o nitrogênio orgânico varia a partir da relação C:N (Carbono – Nitrogênio), sendo que no reservatório orgânico fresco todos seus valores são zerados, exceto na camada dos primeiros 10 mm de solo. Igualmente, o próprio modelo converte os dados de concentrações em dados de massa.

O modelo considera processos de transporte de compostos nitrogenados entre os reservatórios, sendo os principais processos:

1. Imobilização – conversão, por meio de atividade microbiana, de nitrogênio disponível no solo para crescimento de plantas.
  - a. Mineralização do húmus se dá pela conversão microbiana de nitrogênio orgânico não disponível para nitrogênio disponível para plantas. O nitrogênio mineralizado proveniente do reservatório ativo de substâncias húmicas é adicionado ao reservatório de nitrato.
  - b. Mineralização e decomposição de resíduos – conversão de resíduos orgânicos complexos em resíduos mais simples e de fácil acesso para as plantas. O

nitrogênio passa do reservatório de resíduo fresco para o ativo de substâncias húmicas.

2. Nitrificação e Volatilização da Amônia – nitrificação baseia-se na oxidação bacteriana do amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) em nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), a partir de valores da temperatura e da umidade do solo. Já a volatilização se dá pela perda gasosa proveniente da reação do amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) aplicado ao solo (ureia ou calcário), ponderada também por valores de temperatura, profundidade e da capacidade de troca catiônica do solo (valor constante no modelo).
3. Desnitrificação – redução, por meio de atividade bacteriana anaeróbica, de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) para nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) e/ou óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Considera além da umidade do solo e temperatura, a presença de carbono. Ocorre geralmente quando a saturação do solo é de mais de 60%, proporcionando assim condições anaeróbicas.
4. Deposição Atmosférica – deposição de substâncias químicas do ar na superfície da terra ou da água. Divide-se em úmida e seca, sendo que a úmida possui maior número de estudos e noções.
  - a. Úmida – absorção através da chuva, transporta-se nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e amônio ( $\text{NH}_4^+$ ). O número de descargas elétricas durante a precipitação converte o nitrogênio atmosférico ( $\text{N}_2$ ) em ácido nítrico que é transferido para o solo ( $\text{HNO}_3$ ).
  - b. Seca – baseia-se na absorção direta de compostos à camada superficial do solo, considera a deposição de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) média diária.
5. Fixação – rizóbios em associação com plantas leguminosas são capazes de fixar o nitrogênio atmosférico ( $\text{N}_2$ ), os quais ficam disponíveis para o crescimento foliar e desenvolvimento das plantas.
6. Movimento Ascendente de Nitrato na Água – os compostos de nitrogênio dissolvidos presente em regiões mais profundas movimentam-se em direção à superfície do solo devido à evaporação dessa camada superficial e diferença no gradiente de seu perfil.
7. Lixiviação – o nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), devido a ser um ânion, é altamente móvel e susceptível a lixiviação, visto que as partículas do solo retêm concentração de cátions.

8. Nitrato no Aquífero Raso – o nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) pode ser transportado até o aquífero raso, podendo permanecer nesse, e mover-se para o aquífero profundo ou sair do aquífero por meio de descarga em canais superficiais. Assim, o nitrato pode ser perdido devido a absorção microbiana ou até mesmo transformações químicas. Essa perda pode ser contabilizada através da determinação da meia-vida do nitrato, considerando os dias necessários para redução pela metade de sua concentração.

O ciclo do fósforo, representado na Figura 10, tem função essencial para o crescimento vegetal e está presente em fertilizantes e adubos químicos e orgânicos. Apresenta-se no solo em três formas principais: orgânico associado com húmus, mineral insolúvel e dissolvido, o qual é disponível para plantas. Ressalta-se que sua solubilidade e mobilidade são limitadas, o que faz com que aumente sua concentração na camada mais superficial do solo, facilitando seu escoamento junto às águas superficiais.

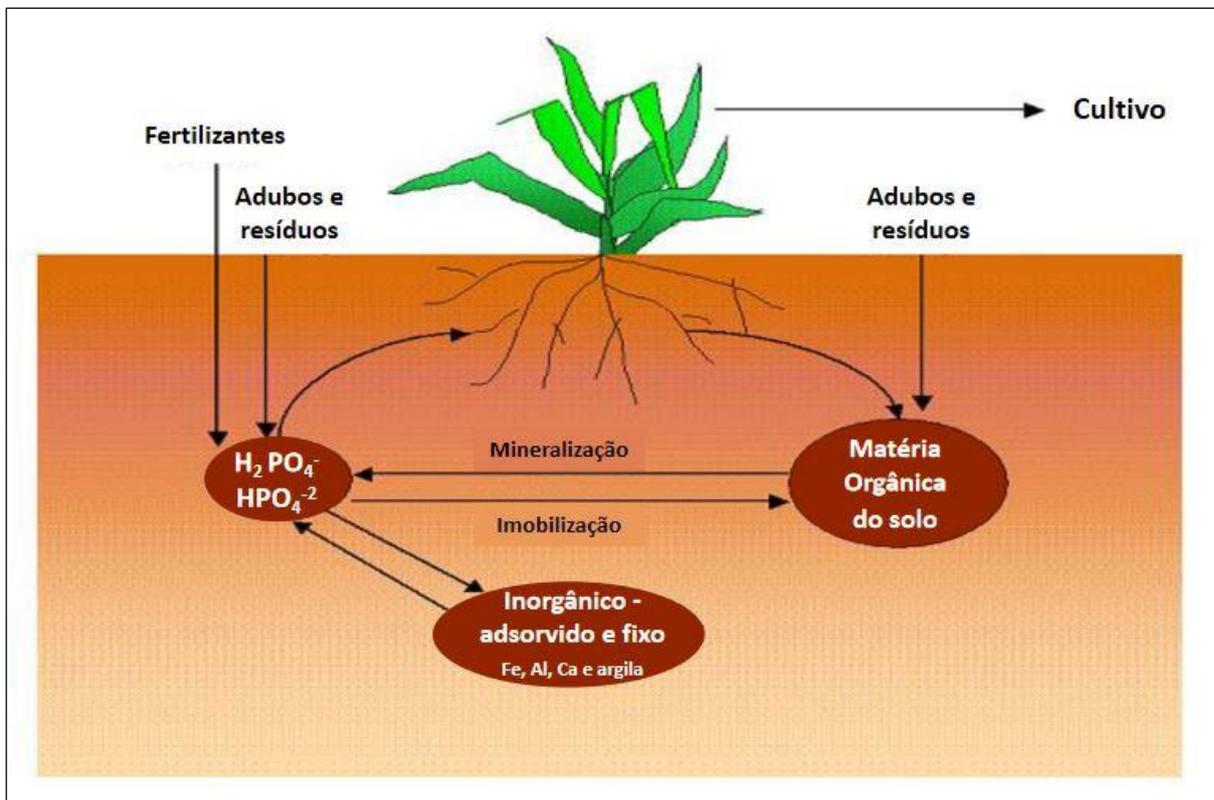


Figura 10 - Ciclo do fósforo - adaptado de Neitsch *et al.* (2009).

A representação e simulação no SWAT considera, como no caso do nitrogênio, diferentes reservatórios de fósforo no solo, sendo três inorgânicos e três orgânicos (Figura 11). As formas de fósforo orgânico são divididas em orgânico fresco (relacionado à resíduos de safra e biomassa microbiana), orgânico estável e orgânico ativo (ambos associados ao húmus do solo). Já as formas inorgânicas dividem-se em: solução, ativo e estável.

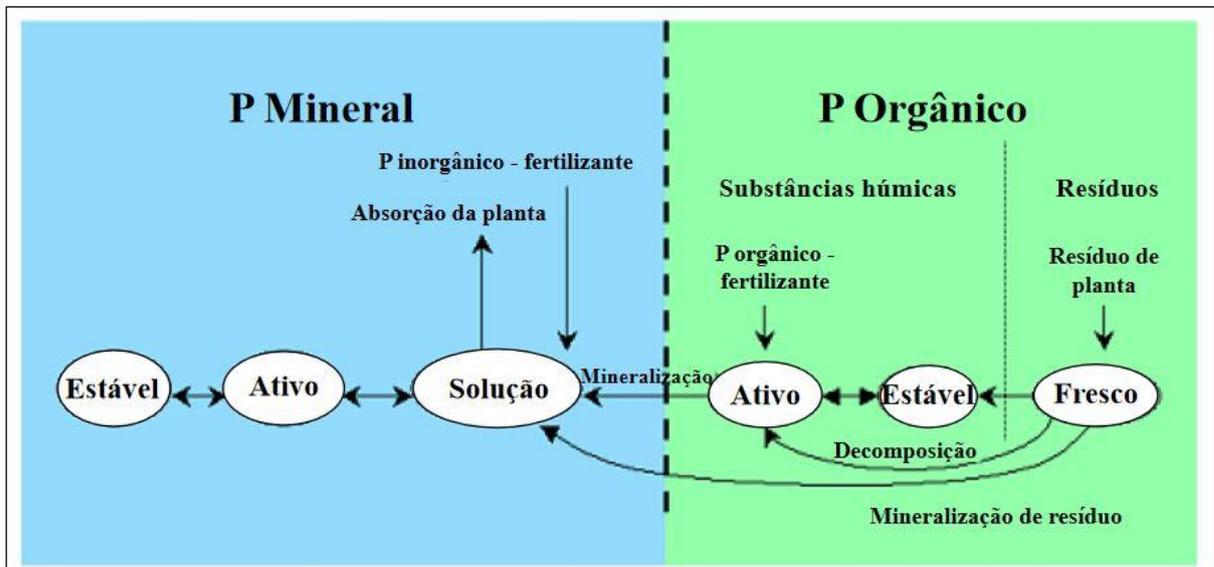


Figura 11 - Reservatórios de fósforo SWAT - adaptado de Neitsch *et al.* (2009).

É permitida a definição manual dos níveis de fósforo iniciais, contudo se não forem fornecidos os valores serão determinados automaticamente pelo modelo, segundo as condições locais.

Assim como com o nitrogênio, considera-se processos múltiplos de transporte de compostos entre os reservatórios, sendo eles:

1. Imobilização – conversão microbiana de fósforo inorgânico disponível para orgânico indisponível.
  - a. Mineralização com húmus – referente aos reservatórios orgânicos estável e ativo, os quais possui um coeficiente de mineralização que considera a quantidade dos compostos fosforados, teor de água e temperatura.
  - b. Decomposição de resíduos e mineralização – acontece apenas na camada mais superficial do solo, possui uma taxa de decomposição diária considerando as razões C:N (carbono – nitrogênio) e C:P (carbono – fósforo) presente no resíduo, bem como a temperatura e a umidade do solo.
2. Sorção de Fósforo Orgânico – após a adição de fósforo solúvel no solo, a concentração inicial é reduzida muito rapidamente, porém é seguida de uma diminuição lenta nos níveis que podem levar elevados períodos de redução. O SWAT considera ambos comportamentos, onde se analisa um rápido equilíbrio entre o reservatório de solução para o reservatório ativo e um lento equilíbrio entre o reservatório ativo e o estável.

3. Lixiviação – como o fósforo possui baixa mobilidade, sua taxa de lixiviação é baixa. O modelo considera a lixiviação apenas de parte do fósforo solúvel encontrado na camada superficial do solo (10mm).

Fósforo nos aquíferos rasos – ainda devido a sua baixa mobilidade, o SWAT não modela diretamente a presença de fósforo em aquíferos rasos, contudo, o usuário pode inserir cargas específicas caso necessário que permanecerão as mesmas durante toda a simulação.

#### 3.3.2.2 Sedimentos e Erosão

O SWAT simula a movimentação de sedimentos, nutrientes e pesticidas dos terrenos para os corpos hídricos, como resultante dos processos de intemperismo e erosão. Os processos erosivos podem ser naturais (erosão geológica) ou acelerados devido às atividades antrópicas.

A erosão proveniente do impacto das gotas da chuva e o carreamento de sedimentos e nutrientes é computada por meio da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS) com modificações, conhecida como MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*), a diferenciação entre as equações se dá, pois, a EUPS considera a força da chuva e seu impacto no solo, já a MUSLE substitui esse fator pelo fator escoamento.

De tal modo, a MUSLE contabiliza a produção de sedimentos em um determinado dia considerando o volume do escoamento superficial, seu índice máximo, a área referente à HRU e fatores como:

- Erodibilidade do solo: diferenciado pelo tipo de solo e seu teor de silte, areias finas e argila (WISCHMEIER & SMITH, 1978)
- Cobertura do solo: interfere na redução do impacto da chuva por meio da interceptação das gotas e redução da velocidade do impacto.
- Manejo e práticas de uso: práticas adotadas em cultivos agropecuários que visam a diminuição de processos erosivos, como terraços, cultivos em faixas, e outros.
- Topografia: diferenciada pelo ângulo de inclinação do terreno e o impacto na velocidade do escoamento e processos erosivos.

Ressalta-se que apesar do modelo SWAT utilizar os dados de sedimentos gerados pela equação MUSLE, ele também calcula a EUPS, porém sua resposta não é utilizada durante a modelagem, possibilitando apenas a comparação dos valores obtidos em ambas equações.

Ainda quanto ao transporte de sedimentos, o modelo incorpora recursos de *delay* no escoamento superficial, considerando o tamanho da bacia e seu tempo de concentração, além da interação entre os sedimentos presentes na água subterrânea e seu aporte no canal principal.

### 3.3.2.3 Gestão geral da produção agrícola

O SWAT possui operações específicas referente à gestão de crescimento de plantas, utilização de fertilizantes e pesticidas e remoção de biomassa vegetal.

#### *Ciclo de Crescimento*

O modelo permite a inserção de informações que designam o tempo de plantio ou o início do ciclo de crescimento, a depender da espécie de cultivo. Entre as informações necessárias estão: o tipo de cobertura de solo (cultura), o momento do início do plantio (data) e o número de unidades de aquecimento necessárias para o atingimento de fase de maturação. As unidades de aquecimento são resultantes da teoria que afirma que as plantas têm necessidade de aquecimento que podem ser quantificadas e associadas ao tempo até sua maturidade, é ponderada pelo acúmulo da temperatura média diária e temperatura de base da planta. Assim, o ritmo de crescimento é diretamente proporcional ao aumento da temperatura. O SWAT ajusta os valores diariamente, modificando índices de concentração de água e taxas de evapotranspiração vegetal.

A simulação de colheita parte da premissa que a biomassa vegetal será retirada, todavia a planta continuará ativa. Dados referente à data de colheita são necessários e índices de eficiência podem ser definidos, porém se esse não for especificado, o modelo utiliza-se de valores padrão pré-estabelecidos. Os índices de eficiência determinam quanto de biomassa é efetivamente retirada e quanto é convertida como resíduo na superfície do solo. Este processo deve ser considerado para culturas perenes ou que possuam mais de uma safra.

Em culturas de uma única safra, o processo a ser simulado é o de colheita e eliminação, que interrompe o crescimento das plantas na HRU, considera parte da biomassa vegetal retirada pela colheita e o restante convertido como resíduo no solo.

Já quanto às pastagens, as operações envolvem a remoção de biomassa pelo pastoreio e a adição de esterco ao longo do talhão. São necessários dados de início da pastagem, duração, previsão de quantidade de biomassa retirada e esterco depositado, e ainda biomassa pisoteada (convertida em resíduo). Pode ser especificada uma biomassa vegetal mínima, a partir da qual o modelo considera que se atingida não haverá pastoreio ou aplicação de

esterco na HRU.

Todo o processo de cultivo considera os nutrientes, resíduos, pesticidas e bactérias no perfil do solo. Dados como o tipo e tempo de operação são essenciais, além de informar as condições de umidade.

Quanto às operações do plantio e manutenção, deve-se informar o tipo e a eficiência de mistura do implemento agrícola e em quais profundidades ocorreram a mistura de insumos. Ainda é diferenciado os sistemas de plantio, a concentração e redistribuição de atividade biológica (por exemplo, minhocas) na camada de até 300 mm de solo.

#### *Utilização de fertilizantes*

A aplicação de fertilizantes químicos e orgânicos é simulada a partir da inserção da data de aplicação, tipo e quantidade aplicada, além da profundidade da incorporação. O modelo assume automaticamente a interação com os 10 mm mais superficiais do solo, tornando-os disponíveis para transporte por meio de escoamento artificial. Os principais componentes analisados baseiam-se na quantidade de nitrogênio e fósforo produzidos, dividindo-os conforme os reservatórios orgânicos e minerais, e são também consideradas as cargas bacterianas provenientes da adição de adubo orgânico (esterco).

A fertilização pode ser programada pelo usuário ou automatizada pelo SWAT. Em casos de auto aplicação deve-se inserir o tipo de fertilizante, a fração total aplicada, a quantidade máxima de aplicação por fração específica de tempo e também a máxima anual, e, por fim, a eficiência das aplicações. É possível, também, simular a fertilização de forma contínua, como no caso de pastoreio de áreas de pecuária intensiva e também engorda de animais confinados.

#### *Irrigação*

Dados sobre a irrigação podem ser inseridos pelo usuário ou automatizada em resposta a observação de déficit hídrico no solo. A fonte de captação de água deve ser diferenciada por tipo, como as superficiais (rio, reservatório, nascentes) e subterrâneas (aquífero raso e aquífero profundo), e por sua localização (dentro ou fora da bacia ou sub-bacia hidrográfica). Quanto às quantidades captadas podem ser determinadas a mínima e a máxima, identificando a vazão do curso d'água que deverá ser mantida no ambiente. Consideram-se índices de infiltração e índices de escoamento superficial, bem como a eficiência do sistema de irrigação utilizado e a possível lixiviação de nutrientes e sais.

Opta-se por utilizar a inserção de dados de forma manual, planejada por data ou

unidades de aquecimento, ou automatizada, de forma que a aplicação seja desencadeada por limiares de *déficit* de água no solo ou de estresse hídrico, em função do potencial de crescimento da planta.

Outras práticas de gestão hídricas podem também ser modeladas como, por exemplo, a influência das áreas represadas para cultivos de espécies em sistemas alagados, a utilização de drenos tubulares, a transferência hídrica entre corpos d'água e a retirada de água para consumo.

#### *Manejo do solo*

O modelo é capaz de simular o impacto de variadas práticas de conservação e de manejo de solo e de água, diferenciadas por tipo de culturas agrícolas, forma e tempo de colheita, e, além disso, informações referentes à forma de aplicação de irrigação e uso de nutrientes. As condições iniciais são divididas em duas classes: a primeira abrange práticas que não sofrerão mudanças durante a simulação e a segunda as práticas que ocorrerão em tempos específicos, o que possibilita a configuração de cenários. Waidler *et al.* (2009) caracterizaram certas práticas passíveis de serem inseridas no SWAT, distinguindo-as em estrutural, não estrutural e de canal. O autor recomenda índices prováveis de remoção de poluentes, caso essas sejam exercitadas, estes baseados por taxas de remoção de sedimento, nitrogênio e fósforo (Tabela 5).

Tabela 5 - Técnicas de conservação e remoção de poluentes disponíveis para a simulação nos modelos SWAT e APEX - adaptado Waidler *et al.* (2009).

Práticas Conservacionistas SWAT/APEX						
	Utilidade	Aplicação		Remoção de Poluentes (%)		
		Rural	Urbana	Sed	N	F
<b>ESTRUTURAL</b>						
<b>Barragem de Checagem</b>	Estruturas de contenção temporárias usadas para reduzir a velocidade do fluxo da água e acumular sedimentos.			57,5	30	26
<b>Dique de Desvio</b>	Barreira para controle do nível e velocidade da água.			35	10	30
<b>Faixas Filtráveis</b>	Áreas vegetadas ao longo de cursos d'água que filtram concentrações de nutrientes, sedimentos, etc.			65*	70	75
<b>Estabilização de Nível</b>	Estrutura construída em declividade de reservatórios ou cursos d'água para estabilizar o nível, prevenindo erosão, assoreamento e qualidade da água			75	75	75
<b>Hidrovias Gramadas</b>	Via fluvial instalada no talvegue do terreno e vegetada, direciona a água reduzindo a sedimentação e concentração de poluentes.			65	70	75
<b>Telhados Verdes</b>	Telhados vegetados que reduzem o escoamento de águas pluviais de áreas residenciais e comerciais.			-	-	-
<b>Vala de infiltração</b>	Vala construída e coberta por seixos que auxiliam na infiltração de águas pluviais			75	55	60
<b>Jardim de Chuva</b>	Canal vegetado que coleta a água da chuva e auxilia em sua infiltração.			65	10	25
<b>Filtro Elevado de Compostos Orgânicos</b>	São elevações trapezoidais de compostos orgânicos (resíduos, bio sólidos, adubo, terra) construídas perpendicularmente ao escoamento de enxurradas para controle de erosão, sedimentos e poluentes.			86	68,5	55
<b>Dreno tubulado em inclinação</b>	Transporte de águas pluviais em declive por tubo enterrado			37	9	20
<b>Pavimento Poroso</b>	Pavimento em estrutura permeável que possibilita a infiltração de águas pluviais			90	65	85
<b>Pavimento Poroso Gramado</b>	Pavimento tradicional acoplado com áreas vegetadas com grama, aumentando a infiltração			90	90	90

(\*) Sólidos em Suspensão; Sed – Sedimentos; N – Nitrogênio; P – Fósforo

Tabela 5 - Técnicas de conservação e remoção de poluentes disponíveis para a simulação nos modelos SWAT e APEX - adaptado Waidler *et al.* (2009) (continuação).

Práticas Conservacionistas SWAT/APEX						
	Utilidade	Aplicação		Remoção de Poluentes (%)		
		Rural	Urbana	Sed	N	F
<b>ESTRUTURAL</b>						
<b>Baciões / Bacia de Sedimentos</b>	Bacias construídas em lugares estratégicos para retenção de detritos e sedimentos, para que esses não alcancem reservatórios ou cursos d'água à jusante			86	55	68
<b>Cerca de Silte</b>	Barreira em material sintético que impedem a passagem de materiais proveniente de construções como silte e sedimentos.			85*	20	70
<b>Represa de Fundo Rochoso</b>	Reservatório temporário com fundo de pedras para retenção de sedimentos e entulhos.			90*	50	50
<b>Terraços</b>	Aterro construído nas curvas de nível do terreno e visa a redução da erosão pela diminuição da velocidade da água em declives acentuados e auxilia na infiltração.			85*	20	70
<b>Dique Triangular</b>	Dique triangular para interceptação e acúmulo de sedimentos provenientes de construção civil.			35*	10	30
<b>Zonas Úmidas</b>	Criação de áreas úmidas para retenção de sedimentos e remoção de nutrientes a partir de processos naturais.			77,5	44	20
<b>NÃO ESTRUTURAL</b>						
<b>Adição de Sulfato de Alumínio</b>	Adição do composto alume como tratamento químico para remoção de poluentes e sedimentos			90*	60	80
<b>Conversão de lavouras em pastagens</b>	Conversão de áreas utilizadas em lavouras para áreas de pastagem			71		
<b>Incorporação de adubos orgânicos</b>	Incorporação de adubo, principalmente de animais, para aproveitamento de nutrientes.			-	-	-
<b>Plantio Direto e Semeadura Direta</b>	Adoção de práticas que evitem o revolvimento do solo, limitando a apenas àquelas necessárias para colocar os nutrientes e condicionar os resíduos e plantas.			75	55	45

(\*) Sólidos em Suspensão; Sed – Sedimentos; N – Nitrogênio; P – Fósforo

Tabela 5 - Técnicas de conservação e remoção de poluentes disponíveis para a simulação nos modelos SWAT e APEX - adaptado Waidler *et al.* (2009) (continuação).

<b>Práticas Conservacionistas SWAT/APEX</b>						
	<b>Utilidade</b>	<b>Aplicação</b>		<b>Remoção de Poluentes (%)</b>		
		<b>Rural</b>	<b>Urbana</b>	<b>Sed</b>	<b>N</b>	<b>F</b>
<b>NÃO ESTRUTURAL</b>						
<b>Captação de água de chuva para reúso</b>	Captação de água de chuva para reaproveitamento em uso doméstico, irrigação e redução das enxurradas.			-	-	-
<b>Manejo de resíduos de animais de estimação</b>	Coleta de resíduos provenientes de animais de estimação para tratamento.				80	90
<b>Paisagem Eficiente - Plantas Ornamentais</b>	Plantio de plantas ornamentais visando o aumento da infiltração e diminuição da enxurrada.			-	-	-
<b>Paisagem Eficiente - Árvores</b>	Plantio de árvores visando o aumento da infiltração e diminuição da enxurrada.			50	-	-
<b>Paisagem Eficiente - Grama</b>	Plantio de grama visando o aumento da infiltração e diminuição da enxurrada.			71	-	-
<b>Vegetação</b>	Vegetação de áreas controla a erosão em áreas degradadas ou áreas com processos erosivos aparentes.			71*	-	-
<b>NO CANAL</b>						
<b>Proteção de Canal</b>	Medidas usadas para estabilizar o leito ou o fundo de um canal.			75	75	75
<b>Mantas de Controle de Erosão</b>	Manta protetora de cobertura morta ou um tapete de estabilização do solo aplicado ao topo do solo preparado para superfícies vulneráveis à erosão			86	-	-
<b>Floresta Ribeirinha</b>	Árvores e arbustos localizados às margens dos cursos d'água reduzem sedimentos, materiais orgânicos, nutrientes e pesticidas.			60	30	30
<b>Mulching</b>	Aplicação de cobertura (orgânica ou geotêxtil) para diminuir o impacto da gota da chuva e reduzir o desprendimento do solo.			71	-	-
<b>Restauração de Fluxo</b>	Práticas estruturais e vegetativas de restauração de cursos d'água que visam evitar a perda de terras ou usos do solo adjacentes e manter a capacidade de fluxo			75	75	75

(\*) Sólidos em Suspensão; Sed – Sedimentos; N – Nitrogênio; P – Fósforo

## 4. METODOLOGIA

Este capítulo visa à apresentação da caracterização da área de estudo e bacias selecionadas, a configuração e estruturação de base de dados, os procedimentos para elaboração de base cartográfica, os programas computacionais empregados, bem como informações sobre as etapas de simulação hidrológica, desde a construção de cenários e a calibração e verificação do modelo, a partir da simulação realizada no ambiente QSWAT+.

A Figura 12 apresenta o fluxograma com a sequência de etapas a serem realizadas no atual trabalho.

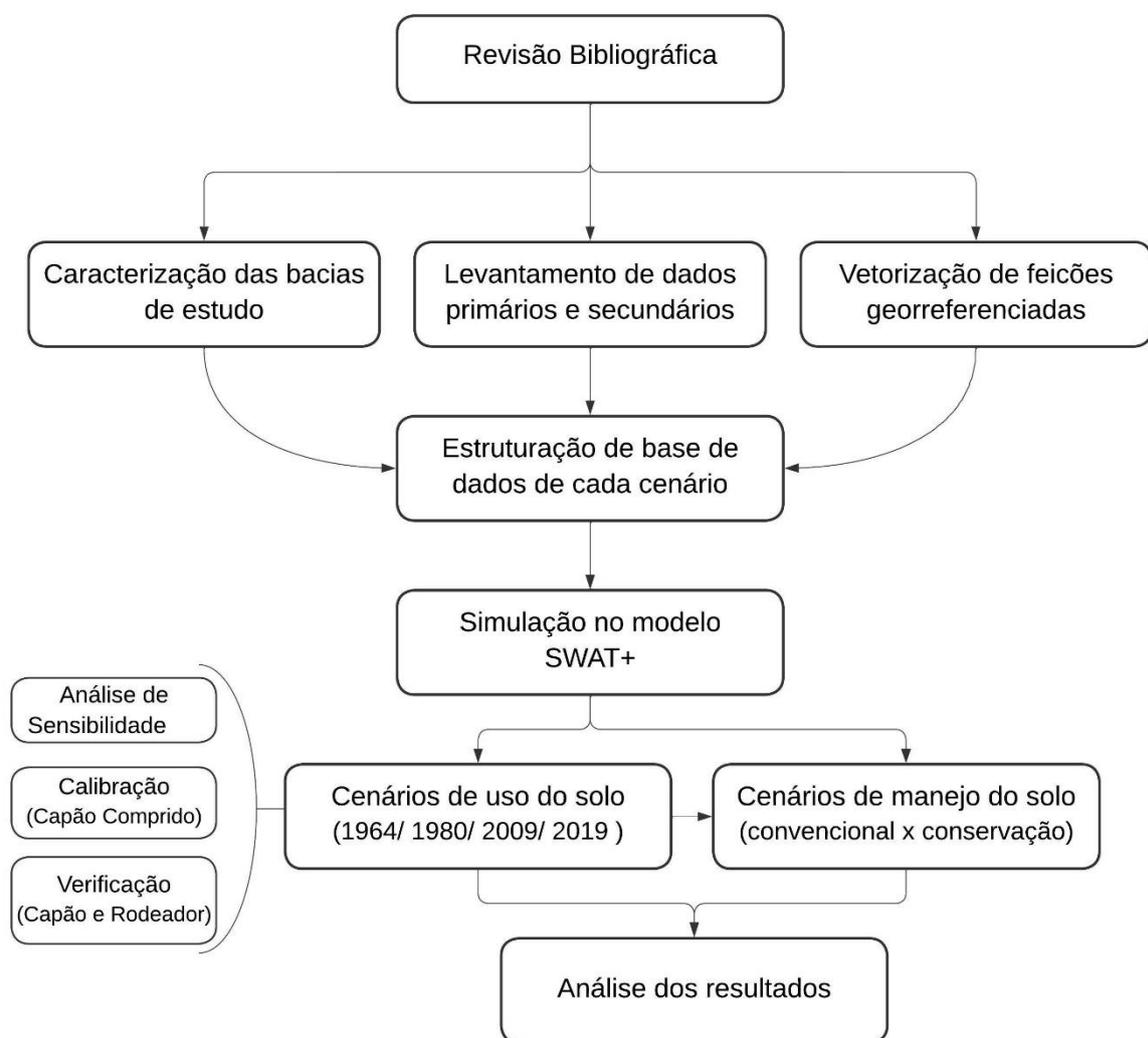


Figura 12 - Fluxograma da metodologia e etapas do estudo.

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Distrito Federal localiza-se no Planalto Central, na Região Centro-Oeste do País. Com área de 5.789,16 km<sup>2</sup>, o DF limita-se pelos paralelos 15°30'S, ao norte, e 16°03'S, ao sul. Os limites leste e oeste são definidos pelos rios Preto e Descoberto, respectivamente (PELUSO & OLIVEIRA, 2006).

##### *Clima*

Segundo a classificação de Köppen (CODEPLAN, 2012), o clima do DF é tropical, concentrando-se as precipitações no verão. O período mais chuvoso corresponde aos meses de novembro a janeiro, e o período seco ocorre no inverno, especialmente nos meses de junho a agosto. Conforme a classificação, observam-se os seguintes tipos climáticos no DF:

- Tropical (Aw) - Temperatura, para o mês mais frio, superior a 18°C. Situa-se, aproximadamente, nas áreas com cotas altimétricas abaixo de 1.000 metros (bacias hidrográficas dos rios São Bartolomeu, Preto, Descoberto/Corumbá, São Marcos e Maranhão).

- Tropical de altitude (Cwa) - Temperatura, para o mês mais frio, inferior a 18°C, com média superior a 22° no mês mais quente. Abrange, aproximadamente, as áreas com cotas altimétricas entre 1.000 e 1.200 metros (unidade geomorfológica – Pediplano de Brasília).

- Tropical de altitude (Cwb) - Temperatura, para o mês mais frio, inferior a 18°C, com média inferior a 22° no mês mais quente. Correspondem às áreas com cotas altimétricas superiores a 1.200 metros (unidade geomorfológica - Pediplano Contagem/Rodeador).

##### *Geomorfologia*

Segundo Peluso & Oliveira (2006), o DF localiza-se no Planalto Central Goiano, onde se encontram as maiores cotas altimétricas da Região Centro-Oeste. Em função dessas cotas, o território é dividido em quatro compartimentos:

- Planícies Aluviais e Alveolares: porções mais baixas do relevo formadas pela deposição dos sedimentos transportados pelos rios e depositados às suas margens.

- Depressões Interplanálticas: são áreas com elevação inferior aos planaltos que as circundam, com cotas de 800 a 950 m de altitude. Nas áreas das bacias dos rios São Bartolomeu e Preto os declives geralmente são pouco acentuados, enquanto que na bacia do rio Maranhão as vertentes são abruptas.

- Pediplano de Brasília: abrange áreas com cotas de 950 a 1.200 m de altitude. Neste compartimento predominam formações de chapada, chapadões e interflúvios tabulares. No Pediplano Brasília verificam-se elevações que constituem divisores de água entre as bacias hidrográficas dos rios Preto e São Bartolomeu.

- Pediplano de Contagem-Rodeador: marcado pela presença de chapadas, chapadões e interflúvios tabulares, esse compartimento apresenta cotas de 1.200 a 1.400 m altitude. Na transição para o pediplano Brasília, as variações altimétricas formam degraus que podem ser percebidos no relevo.

### *Recursos Hídricos*

O território do DF é drenado, principalmente, pelas bacias hidrográficas do Rio Maranhão, do Rio Preto, do Rio São Bartolomeu e do Rio Descoberto. Tais bacias, por sua vez, alimentam três das mais importantes bacias fluviais da América do Sul: a bacia do Paraná (Rio Descoberto e Rio São Bartolomeu), bacia do São Francisco (Rio Preto) e bacia do Tocantins/Araguaia (Rio Maranhão). Outras bacias hidrográficas de menor expressão no Distrito Federal são a do Rio Corumbá e a do Rio São Marcos, que juntas drenam cerca de 5% da área (CODEPLAN, 2012).

O Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos (ADASA, 2012), principal estudo ligado à gestão de recursos hídricos do DF, divide as bacias já citadas em 40 unidades hidrográficas, visando um gerenciamento mais eficaz.

Com relação às águas subterrâneas, o DF localiza-se entre as províncias hidrogeológicas do Escudo Central e do São Francisco, nos quais ocorre a predominância de aquíferos fraturados e físsuro-cársticos, onde ambos são recobertos por variados tipos de solos e rochas, os quais compõem os aquíferos intergranulares, também denominados de domínio freático ou poroso, que são divididos em sistemas e subsistemas (CAMPOS, 2004).

As bacias escolhidas como base de estudo encontram-se na região noroeste do DF, mais precisamente na Região Administrativa de Brazlândia. Ambas bacias passaram por delimitação específica para o presente estudo por meio do programa SWAT +, e sua localização em relação à Unidade da Federação pode ser observada na Figura 13.

Ambas as bacias passaram por eventos críticos durante a crise hídrica (2016 a 2018), devido às baixas vazões disponíveis nos cursos de água e, conseqüentemente, com restrições no uso da água para irrigação. Dessa maneira, ações de alocação de água tiveram que ser

realizadas, essas resultaram em procedimentos para a diminuição de vazões outorgadas e também limitação de horários de captação e uso do recurso na agricultura.

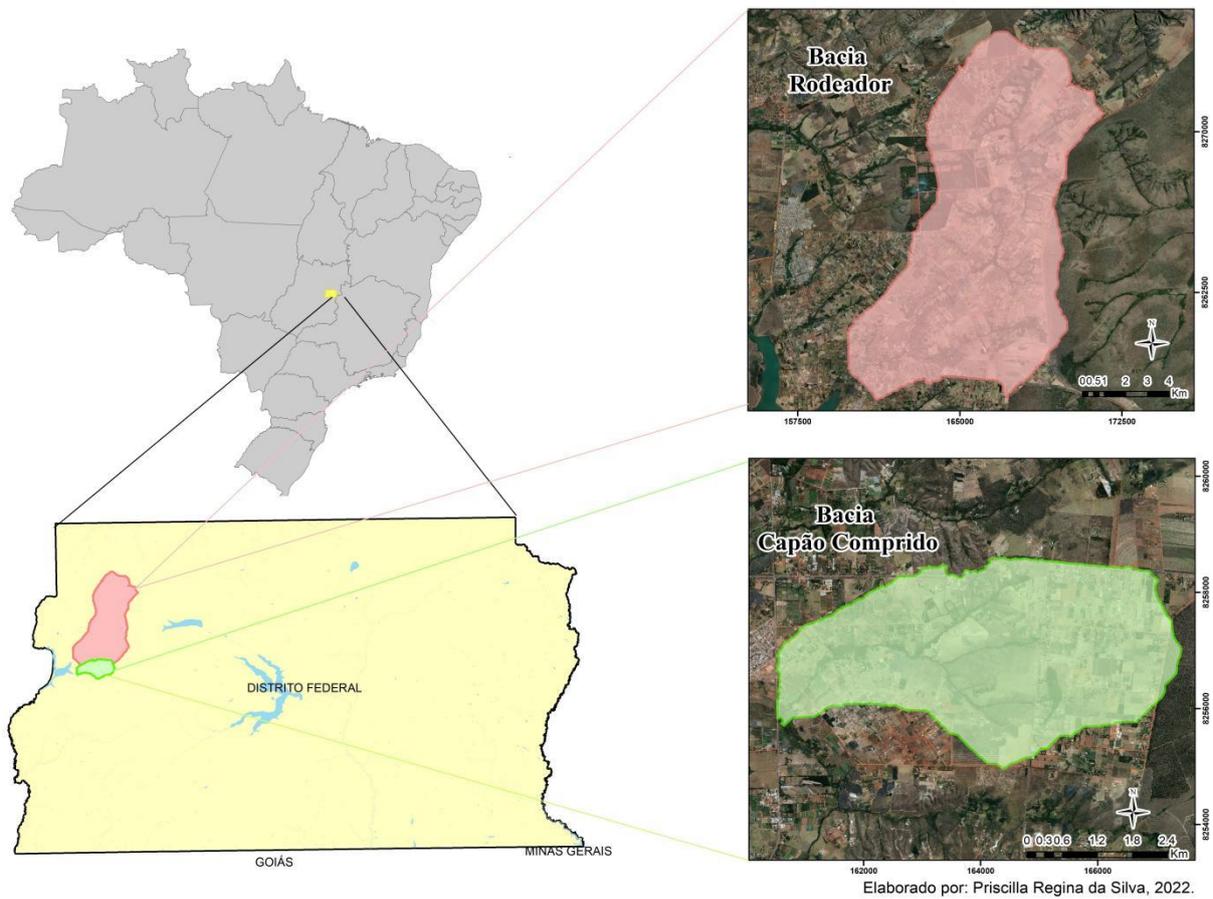


Figura 13- Localização das bacias de estudo em relação ao DF e ao Brasil.

A escolha dessas bacias como objeto de estudo deve-se aos múltiplos estudos acadêmicos inerentes, que englobam também à região do Alto Rio Descoberto. Por meio de pesquisa sucinta em base de dados e repositórios de universidades foi possível constatar as numerosas análises da evolução do uso do solo da bacia, qualidade e quantidade dos recursos hídricos e até mesmo propostas metodológicas de gerenciamento de conflitos.

A Tabela 6 apresenta uma sumária linha do tempo com o título de estudos que tiveram como objeto tais bacias ou a região em que estão situadas.

Tabela 6 - Lista de estudos acadêmicos aplicados às bacias de estudo e à região próxima à bacia do Alto Rio Descoberto.

<b>ANO</b>	<b>TÍTULO</b>	<b>BACIA</b>	<b>AUTOR</b>
1997	Análise da Expansão Urbana na Bacia do Lago Descoberto através de Geoprocessamento	Descoberto	Torres (1997)
2002	Fatores Influenciando o Uso da Água para Irrigação na Bacia do Lago Descoberto no DF	Descoberto	Cardoso (2002)
2005	Avaliação de Imagens de Satélite de Alta e Muito Alta Resolução Espacial para a Discriminação de Classes de Uso e Ocupação do Solo	Capão Comprido	Fernandes (2005)
2005	Quantificação e Análise do Uso da Água em Práticas de Agricultura Irrigada na Bacia do Descoberto – DF	Descoberto	Ferreira (2005)
2006	Estudo do Transporte de Sedimentos em Suspensão na Bacia do Rio Descoberto	Descoberto	Bicalho (2006)
2007	Avaliação do Risco de Contaminação de Mananciais Hídricos para o Abastecimento: o caso da bacia da barragem do descoberto	Descoberto	Vito (2007)
2008	Modelagem Dinâmica de Perdas de Solo : o caso do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto-DF/GO	Descoberto	Valentim (2008)
2008	Estudo Hidrológico e de Transporte de Sedimentos em uma Bacia do Bioma Cerrado: Bacia do Córrego Capão Comprido	Capão Comprido	Fragoso (2008)
2009	Simulação bidimensional da qualidade da água do Lago do Descoberto (DF/GO)	Descoberto	Silva (2009)
2009	Estudo sobre Correlação entre Turbidez e Sólidos em Suspensão para Estimativa da Vazão Sólida em uma Pequena Bacia	Capão Comprido	Lopes (2009)
2010	Uso das Terras da Parte Norte da Bacia do Rio Descoberto, Distrito Federal, Brasil	Descoberto	Chaves <i>et al.</i> (2010)
2010	Estudos Hidrológicos e Hidrossedimentológicos na Bacia do Córrego do Capão Comprido	Capão Comprido	Lopes (2010)
2012	Utilização do Modelo SWAT na Estimativa de Produção de Sedimentos Decorrentes de Diferentes Cenários de Uso do Solo na Bacia do Córrego Capão Comprido no Distrito Federal	Capão Comprido	Ferrigo (2012)
2013	Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do Cerrado intensamente monitorada.	Preto	Castro (2013)
2014	Análise de Consistência dos Parâmetros do Modelo SWAT Obtidos por Calibração Automática – Estudo de Caso da Bacia do Lago Descoberto - DF	Descoberto	Ferrigo (2014)

Tabela 6 - Lista de estudos acadêmicos aplicados às bacias de estudo e à região próxima à bacia do Alto Rio Descoberto (continuação).

<b>ANO</b>	<b>TÍTULO</b>	<b>BACIA</b>	<b>AUTOR</b>
2014	O Modelo LUCIS e o Planejamento Territorial da Bacia do Alto Rio Descoberto	Descoberto	Nunes (2014)
2015	Criação de metodologia para caracterização ambiental de imóveis rurais da APA do rio Descoberto no DF com a aplicação das feições necessárias para a inscrição no CAR.	Descoberto	Silva (2015)
2016	Modelagem dos Conflitos de Uso e Ocupação do Solo como Ferramenta para o Planejamento Territorial: O Caso da Bacia do Alto Curso do Rio Descoberto DF/GO	Descoberto	Nunes & Roig. (2016)
2016	Aplicação do método de cargas máximas totais diárias de nutrientes na bacia do Córrego Rodeador – DF	Rodeador	Silva (2016)
2018	Avaliação dos Impactos da Exploração de Águas Subterrâneas na Bacia do Ribeirão Rodeador por meio de Simulação Integrada entre os Modelos SWAT e MODFLOW	Rodeador	Araújo (2018)
2018	Análises Quantitativa e Qualitativa das águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador /DF para Avaliação das Cargas de Poluição	Rodeador	Fim (2018)
2018	Estudo da contribuição de águas subterrâneas e retirada de água por poços sobre o escoamento dos córregos adjacentes na região do Núcleo Rural Lago Oeste – DF	Maranhão	Pereira (2018)
2018	Análise Espaço-temporal da Concentração de Sedimentos em Suspensão no Reservatório do Descoberto (DF), por meio de Sensoriamento Remoto	Descoberto	Chelotti (2018)
2018	Evolução do Uso da Terra, Erosão dos Solos e Fragmentação da Vegetação na APA do Rio Descoberto no Distrito Federal e Goiás	Descoberto	Teixeira (2018)
2019	Aplicação do CE-QUAL-W2 para a Modelagem da Estrutura Térmica do Reservatório do Descoberto DF/GO	Descoberto	Barros (2019)
2019	Serviços Ecológicos e a Agricultura Irrigada na Bacia do Ribeirão Rodeador, Distrito Federal	Rodeador	Lima <i>et al.</i> (2019)
2020	Conflito de Uso entre Abastecimento Público e Irrigação associado à Crise Hídrica na Bacia do Alto Descoberto, Distrito Federal	Descoberto	Balbino (2020)
2021	Avaliação de Espécies Químicas Potencialmente Tóxicas na Área de Proteção Ambiental da Bacia do Rio Descoberto, Brasília/DF – Brasil	Descoberto	Portela (2020)
2021	Avaliação da evapotranspiração simulada com o programa SWAT no Bioma Cerrado	Rodeador	Ferreira (2021)

#### 4.1.1 Bacia do córrego Capão Comprido

A bacia do Capão Comprido encontra-se na Unidade Hidrográfica do Ribeirão das Pedras, Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto, pertencente à bacia hidrográfica do Rio Paranaíba, Região Hidrográfica do Rio Paraná. O Córrego Capão Comprido (Figura 14) é um dos afluentes e contribuintes do Reservatório do Descoberto, este por sua vez é responsável pelo abastecimento público de mais de 60% da população do DF. Está localizada na parte oeste do Distrito Federal, na Região Administrativa de Brazlândia, entre as coordenadas 8.258.591 a 8.254.966 N e 160.514 a 167.424 E (SIRGAS 2000 - UTM 23S) e possui área total de drenagem de 16,70 km<sup>2</sup>.

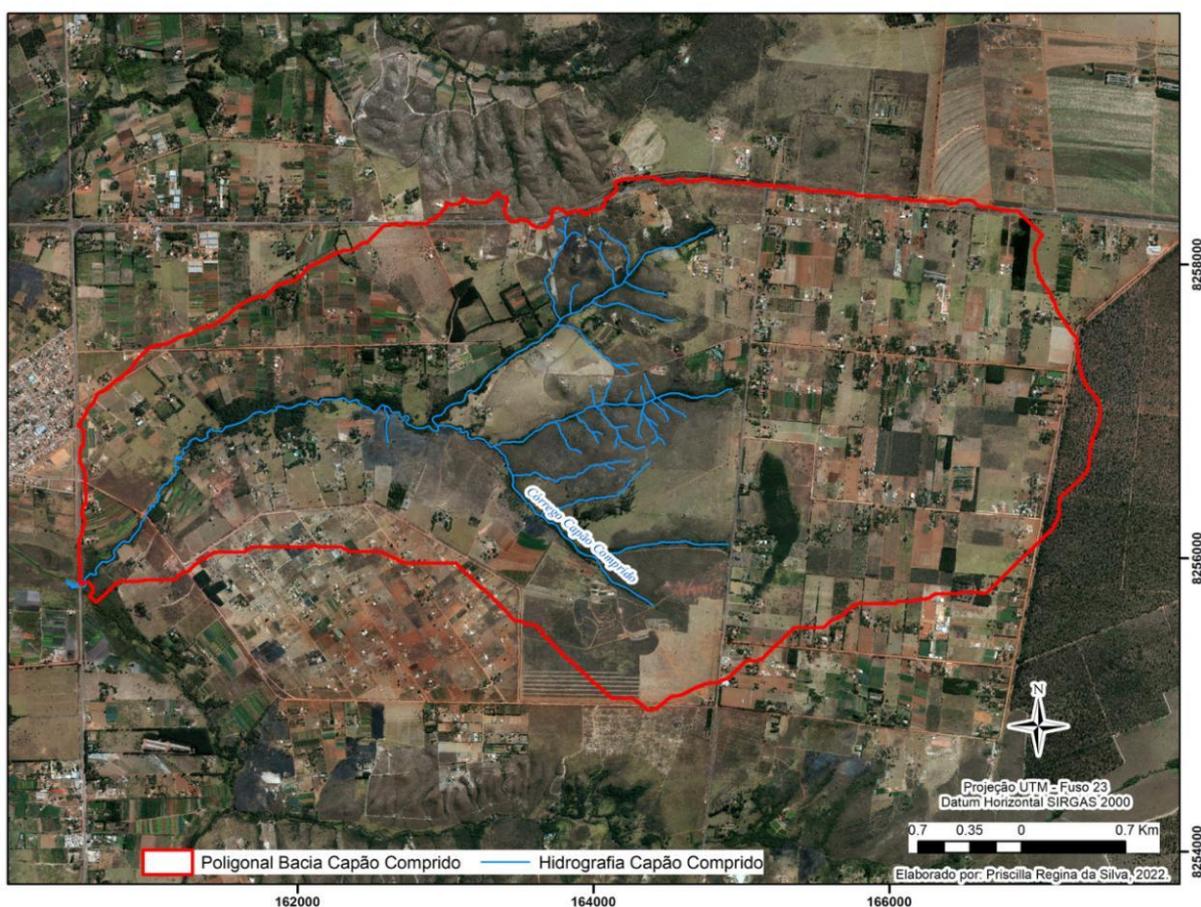


Figura 14 - Hidrografia e limite da Bacia do Capão Comprido.

De acordo com Reatto *et al.* (2004), predominam na bacia os solos do tipo Latossolo, subdivididos em Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho Amarelo, sendo o primeiro responsável por uma cobertura de 49,88% da área e o segundo por 27,31%. Existem, ainda, solos do tipo Cambissolo em 20,41% da área e pequena incidência de Gleissolos em 2,40%.

Segundo Santos *et al.* (2018), os Latossolos ocorrem em regiões com relevo pouco movimentado. São solos antigos, espessos (comumente com mais de 10 metros de espessura), homogêneos e com difícil distinção entre os horizontes, apresentando, nesse caso, textura predominantemente média.

Os Cambissolos são solos jovens, rasos (espessura total inferior a 1 metro), comumente pedregosos, pouco permeáveis, com ampla contribuição de silte em sua composição textural e desenvolvidos sobre rochas argilosas.

Já os Gleissolos caracterizam-se pela deficiência de drenagem e por isso são encharcados e ricos em matéria orgânica, ocorrem somente junto aos cursos de drenagem superficiais, mais comumente em áreas de nascentes.

Conforme o Mapa Geomorfológico do Distrito Federal (CODEPLAN, 1984) (escala 1:300.000), verificou-se que a bacia se encontra nas formações Pediplano Contagem Rodeador, Pediplano Brasília e Planícies Aluviais e Alvelares.

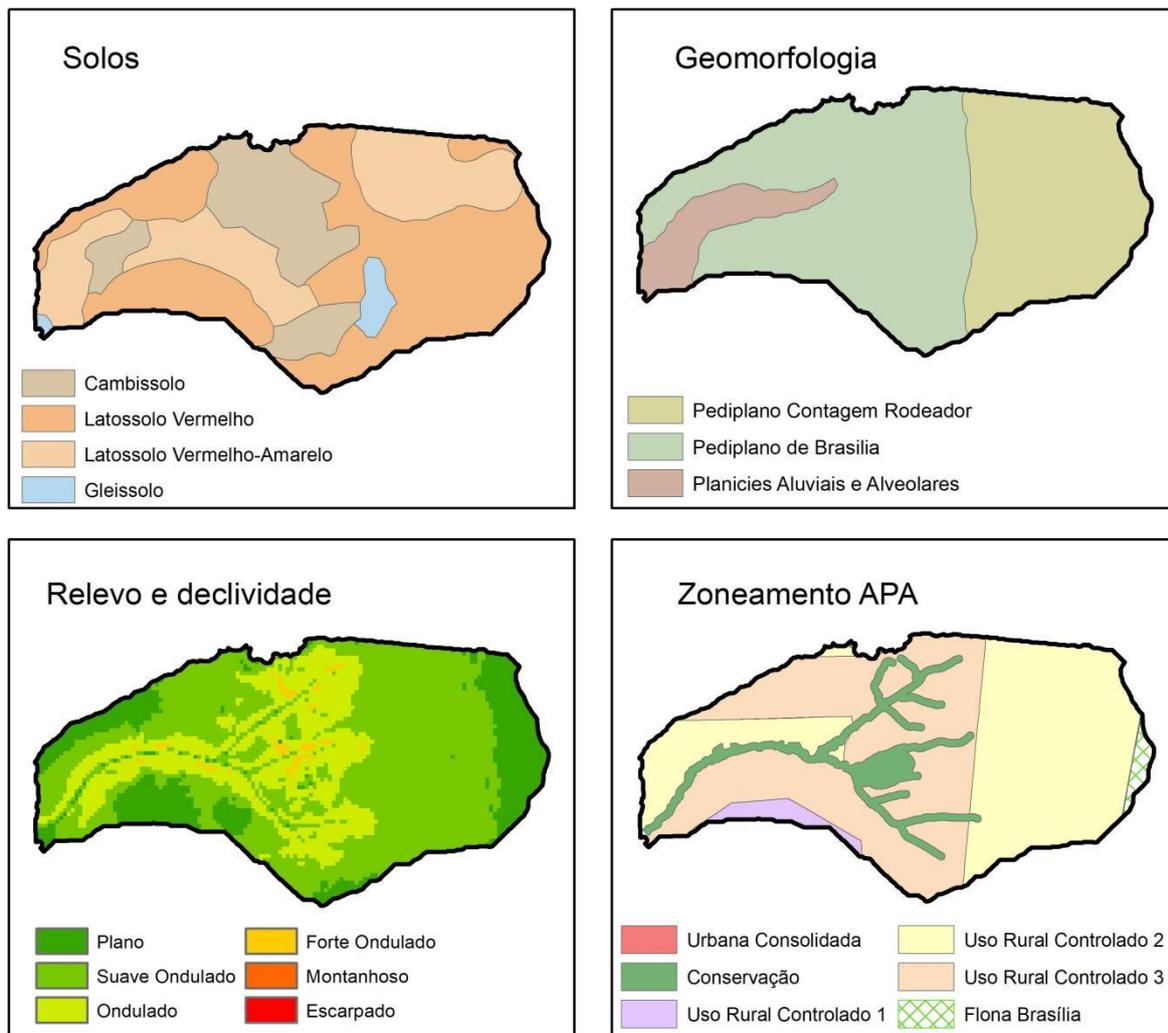
As classes de declividade para a bacia foram geradas no ambiente QGIS 3.16, utilizando-se da ferramenta *Interpolação TIN*, com as feições de altimetria (cota e curva de nível), hidrografia e limite das bacias, após essa etapa gerou-se a declividade da área (ferramenta *Slope*) e diferenciada as classes de relevo pelo percentual da declividade, conforme Norma de Execução INCRA/DD/Nº 71 (INCRA, 2008), a qual divide a partir dos seguintes valores: plano de 0 a 3% de declive, suave ondulado de 3 a 8%, ondulado de 8 a 20%, forte ondulado de 20 a 45%, montanhoso de 45 a 75% e escarpado valores maiores que 75%. Verificou-se que 58% da bacia é considerada suave ondulado, 25% ondulado, 16% plana e apenas 1% forte ondulado. Apresenta cota mínima de 1.035 m e máxima de 1.270 m.

Quanto ao ordenamento territorial, encontra-se na Macrozona Rural – Zona Rural de Uso Controlado III (ZRUC-III), a qual é composta por áreas de atividades agropastoris, de subsistência e comerciais, contudo sujeitas às restrições e condicionantes impostos pela sua sensibilidade ambiental (GDF, 2012).

Ressalta-se que a bacia é componente da Área de Proteção Ambiental do Rio Descoberto e deve respeitar zoneamento específico, o qual foi estipulado por meio de Plano de Manejo datado do ano de 2014, e que divide a área da APA em zonas e descreve seus usos potenciais e usos proibidos. A área da bacia do Capão Comprido encontra-se em sua mais significativa parte na Zona de Uso Rural, a qual é destinada às atividades rurais diversificadas tais como agricultura, pecuária, agroindústria, turismo rural e ecológico, atividades educacionais,

culturais e sociais. Há ainda uma estreita faixa da bacia que incide na Floresta Nacional de Brasília (ICMBIO, 2014).

As características descritas referentes às classes de solo, bem as relativas à geomorfologia, relevo/declividade e zoneamento ambiental encontram-se melhor ilustradas e visualizadas na Figura 15.



Elaborado por: Priscilla Regina da Silva, 2022.

Figura 15 - Características morfológicas da bacia do córrego Capão Comprido (DF). (Fontes: Solos - Reatto *et al.* (2004); Geomorfologia - Codeplan, 1984; Zoneamento APA - ICMBio, 2014)

A área da bacia abriga os Núcleos Rurais: Inkra 7 e Inkra 8, constituídos maioritariamente por propriedades rurais com áreas de 5 a 10 hectares (ha). O uso do solo é predominantemente rural, porém existem pontos de parcelamentos irregulares, os quais impactam diretamente no grau de impermeabilização do solo. Quanto ao uso rural, é dominante o cultivo de

hortifrutigranjeiros, principalmente a olericultura, com a produção de hortaliças folhosas e caixarias. Expressiva parte dos produtores rurais são classificados como agricultores familiares, classificação dada aqueles que residem na pequena propriedade rural, possuem mão-de-obra essencialmente familiar e têm a propriedade rural como principal fonte de sustento.

#### 4.1.2 Bacia do Ribeirão Rodeador

A bacia do Ribeirão Rodeador, assim como a bacia do Capão Comprido, também pertence à Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto e à Região Administrativa de Brazlândia. Dispõe de uma extensão superior a outra bacia, compreendendo cerca de 113 km<sup>2</sup> de área total, entre as coordenadas UTM 8.274.658 a 8.257.518 N e 159.806 a 171.701 E (SIRGAS 2000 - UTM 23S), tendo como cursos d'água o Ribeirão Rodeador e seus afluentes: Córrego Comprido, Córrego Cabeceira, Córrego Guariroba, Córrego Cristal e Córrego Jatobazinho (Figura 16).

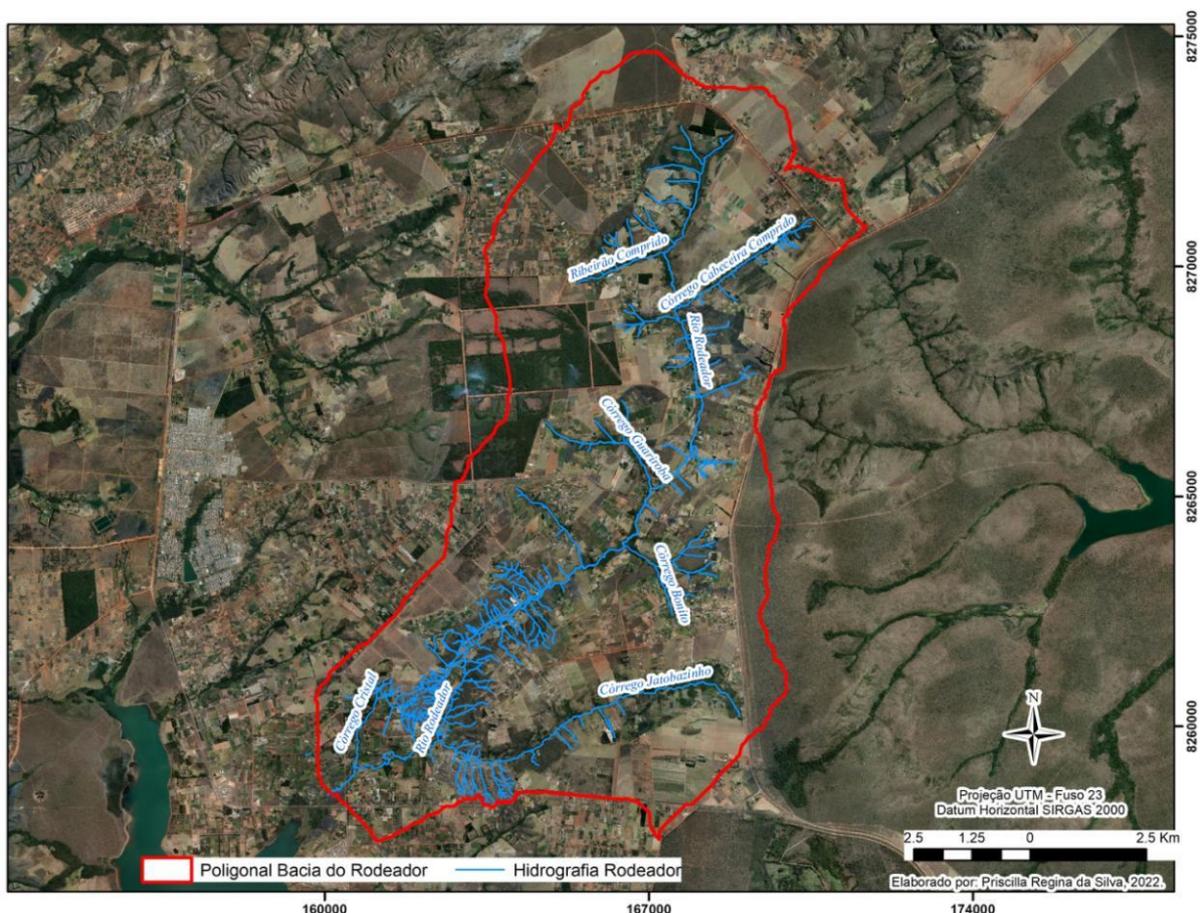


Figura 16 - Hidrografia e limite da bacia do Ribeirão Rodeador (DF).

A classe de solos predominante é a dos Latossolos, sendo o Latossolo Vermelho presente em 39,03% da área e o Latossolo Vermelho Amarelo em 35,77%. Existe área significativa de Cambissolos (16,83%) e pequenas manchas de Gleissolo (4,34%). A bacia também conta com cobertura de Plintossolo (3,43%) e Neossolo Quartzarênico (0,60%), ambas classes não encontradas na bacia do Capão Comprido (REATTO *et al.*, 2004).

Os Neossolos Quartzarênicos são associados a áreas de exposição de quartzitos do grupo Paranoá, são solos pouco profundos (em geral com menos de 2 metros de espessura), com rochoso comum, alta permeabilidade, com menos de 15% de argila e presente em locais com restrita declividade, geralmente próximo às bordas de chapadas.

Os Plintossolos compreendem solos minerais formados sob condições de restrição à percolação da água, sujeitos ao efeito temporário de excesso de umidade, de maneira geral imperfeitamente drenados ou mal drenados, que se caracterizam por apresentarem expressiva plintização com ou sem formação de petroplintita ou horizonte plíntico (SANTOS *et al.*, 2018).

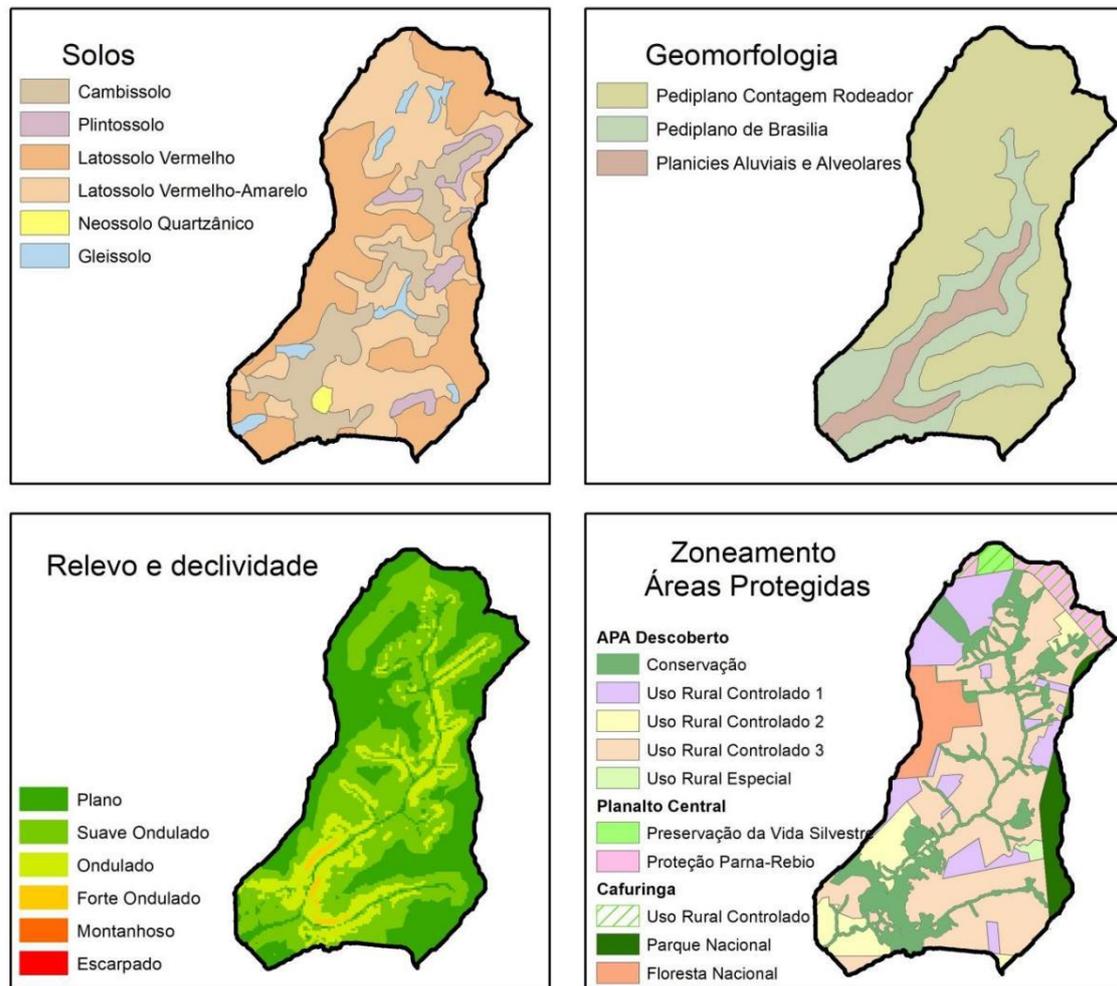
Conforme o Mapa Geomorfológico do Distrito Federal (CODEPLAN, 1984) (escala 1:300.000), verificou-se que a bacia se encontra nas formações Pediplano Contagem Rodeador, Pediplano Brasília e Planícies Aluviais e Alvelares. As classes de declividade, delimitadas conforme Norma de Execução INCRA/DD/Nº 71, baseiam-se em relevo suave ondulado (53% da área), seguido por 24% de área plana, 14% de ondulado, 8% de forte ondulado e apenas 1% de montanhoso. Apresenta cota mínima de 1030 m e máxima de 1342 m.

Quanto ao ordenamento territorial, igualmente encontra-se na Macrozona Rural – Zona Rural de Uso Controlado III (ZRUC-III) e quanto à relação com unidades de conservação, localiza-se em sua maioria na APA do Rio Descoberto, dividido entre as zonas de Conservação e as de Uso Rural Especial, 1, 2 e 3. A bacia conta, ainda, com fragmentos da APA do Planalto Central sobreposta a APA do Cafuringa, e de trechos da Floresta Nacional e do Parque Nacional de Brasília (GDF, 2012; ICMBIO, 2014).

As características descritas referentes às classes de solo, bem as relativas à geomorfologia, relevo/declividade e zoneamento ambiental encontram-se melhor ilustradas e visualizadas na Figura 17.

A bacia abriga os Núcleos Rurais: Rodeador, fragmentos do Incra 6 e 7, além de áreas de assentamentos rurais como o Assentamento Betinho. O uso do solo e o tamanho das propriedades não difere muito do observado no Capão Comprido, contudo há incidência de algumas propriedades de dimensões maiores que 10 ha e que tem como atividade agrícola a

formação de pastagem para alimentação animal, sendo classificados como agricultores patronais. Já os espaços de assentamentos e de pequenas propriedades rurais têm como maioria os agricultores familiares que trabalham com o cultivo de olerícolas.



Elaborado por: Priscilla Regina da Silva, 2022.

Figura 17 - Características morfológicas da bacia do ribeirão Rodeador (DF). (Fontes: Solos - Reatto et al. (2004); Geomorfologia - Codeplan, 1984; Zoneamento APA - ICMBio, 2014)

## 4.2 ESTRUTURAÇÃO DE BASE DE DADOS

Para a caracterização das bacias escolhidas focou-se em abordar os componentes essenciais para a modelagem no SWAT+, como: dados hidrometeorológicos – precipitação, radiação solar, temperaturas mínima e máxima, umidade relativa, vento e regime de vazão dos rios; dados morfológicos – tipo de solo e relevo; dados de uso do solo e da água – dados agropecuários referente ao tipo de cultivo, manejo do solo, adubação realizada, sistema de irrigação, e dados de gestão como pontos de captação de água e vazões outorgadas. Ressalta-se que uma parcela dessa base de dados será destinada para a calibração do modelo SWAT+ e a outra para verificação, visando o ajuste do modelo após a simulação.

#### 4.2.1 Fontes de dados hidrometeorológicos

Quanto aos dados hidrometeorológicos, as fontes de informação foram: Adasa, Caesb, INMET e ANA, os quais, em significativa parte, encontram-se disponíveis em sistemas de banco de dados na internet, como o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), o Portal Hidroweb, o Gestor PCD e o Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa do INMET (BDMEP). Para a composição de base de dados específica para esta análise, utilizou-se como período de 01 de janeiro de 1971 a 31 de dezembro de 2020.

O painel interativo da Rede de Monitoramento de Águas Superficiais da Adasa (RMSP) e o portal Hidroweb mostram que a bacia do Rodeador possui 9 estações de monitoramento de dados fluviométricos, sendo que apenas duas dispõem de dados de qualidade da água e apenas uma com série histórica superior a 20 anos. No que tange à bacia do Capão Comprido conta com apenas uma estação de monitoramento superficial, como nota-se na Tabela 7. As séries históricas dessas estações foram obtidas no Portal Hidroweb da ANA e também pelo envio de informações da Escola Corporativa da Caesb, a qual conta também com elementos referentes a sedimentos e nutrientes. Entretanto, para esses últimos parâmetros, somente foi repassado pelos responsáveis os dados relativos à bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido, não sendo possível o alcance de informações referentes à bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador.

Tabela 7 - Estações de monitoramento de Águas Superficiais presentes nas bacias de estudo (RMSP/Adasa e Hidroweb/ANA).

<b>CAPÃO COMPRIDO</b>				
Código	Nome	Início da Série	Responsável	Frequência
60435300*	CAPÃO COMPRIDO - DESCOBERTO	30/04/1978	Caesb	Diária
<b>RODEADOR</b>				
Código	Nome	Início da Série	Responsável	Dados/Frequência
60435180	RODEADOR MONTANTE CANAL	31/12/2016	Caesb	Mensal
60435185	CANAL RODEADOR	31/12/2016	Caesb	Mensal
60435186	RODEADOR JUSANTE CANAL	28/02/2017	Caesb	Mensal
60435190	JATOBAZINHO MONTANTE CANAL	31/12/2016	Caesb	Mensal
60435195	CANAL JATOBAZINHO	31/12/2016	Caesb	Mensal

60435197	JATOBAZINHO MONTANTE RODEADOR	31/12/2016	Caesb	Mensal
60435198	RODEADOR MONTANTE JATOBAZINHO	31/12/2016	Caesb	Mensal
60435200*	RODEADOR - DF 435	30/04/1978	Caesb	Diária
60435250	RIBEIRÃO RODEADOR	31/01/2013	Adasa	Mensal

\*Estação telemétrica.

As estações 60435200 - RODEADOR - DF 435 e 60435300 - CAPÃO COMPRIDO – DESCOBERTO são as únicas que possuem monitoramento de qualidade da água, contando com dados disponíveis no Hidroweb de temperatura, turbidez, condutividade e sólidos em suspensão, porém a Caesb também monitora DQO, DBO, oxigênio dissolvido, nitrogênio total, nitrogênio amoniacal, nitratos e nitritos.

A distribuição e a localização das estações fluviométricas existentes no interior das bacias hidrográficas estudadas são apresentadas na Figura 18.

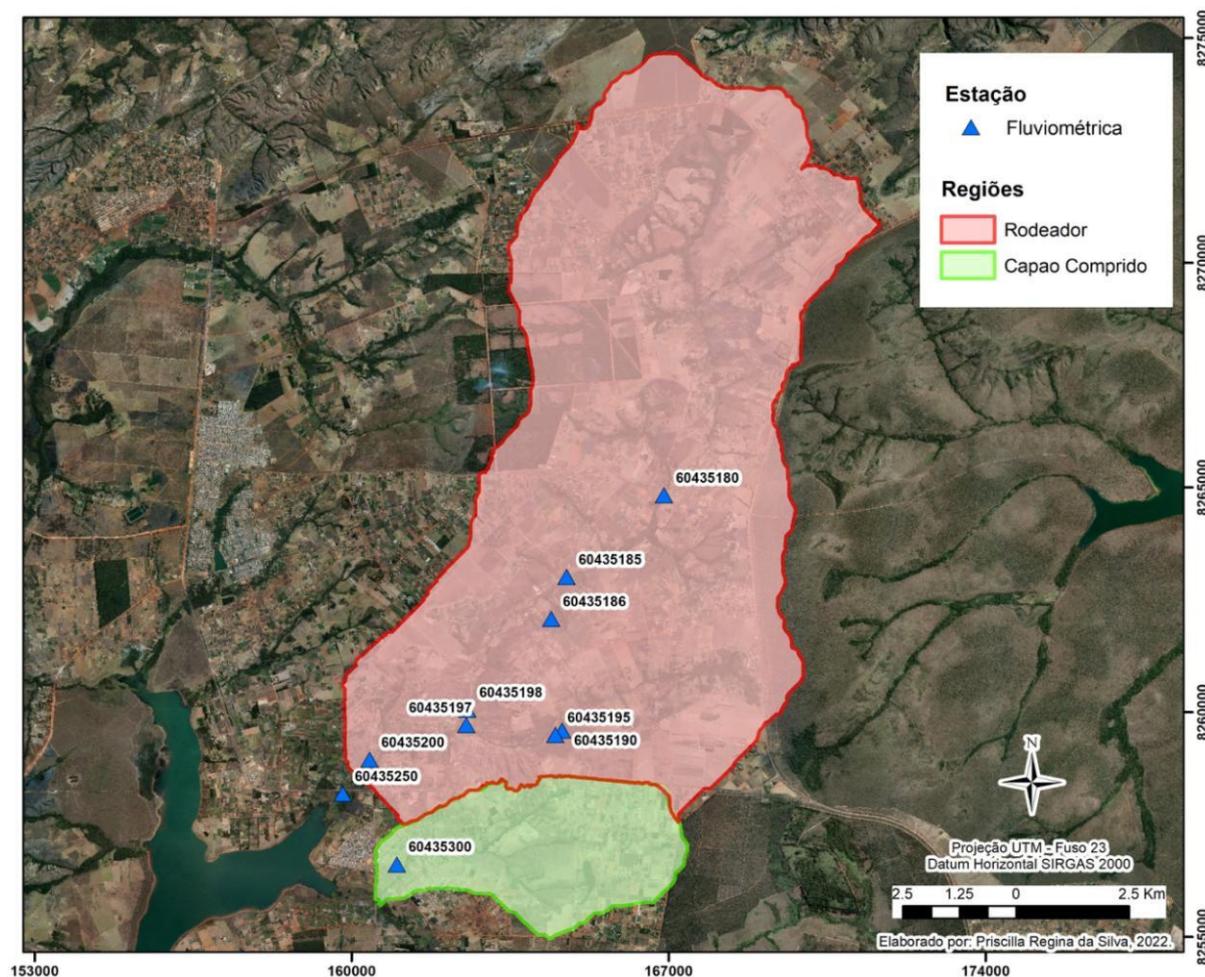


Figura 18 - Localização das Estações Fluviométricas - Capão Comprido e Rodeador. (Hidroweb/ANA e Rede Caesb)

Para esse estudo utilizou-se prioritariamente os dados de vazão diária, mensal e média relativos à estação 60425200 (Rodeador – DF 435) e à estação 60435300 (Capão Comprido – Descoberto), isso fundamentado tanto pela extensão de sua série histórica, ambas iniciadas no ano de 1978, como pela sua localização, estando próximas ao exutório de seus cursos d'água principais (córrego Capão Comprido e ribeirão Rodeador).

A Figura 19 apresenta a localização das estações pluviométricas existentes próximas às bacias hidrográficas estudadas e no interior da região do Alto Descoberto (DF).

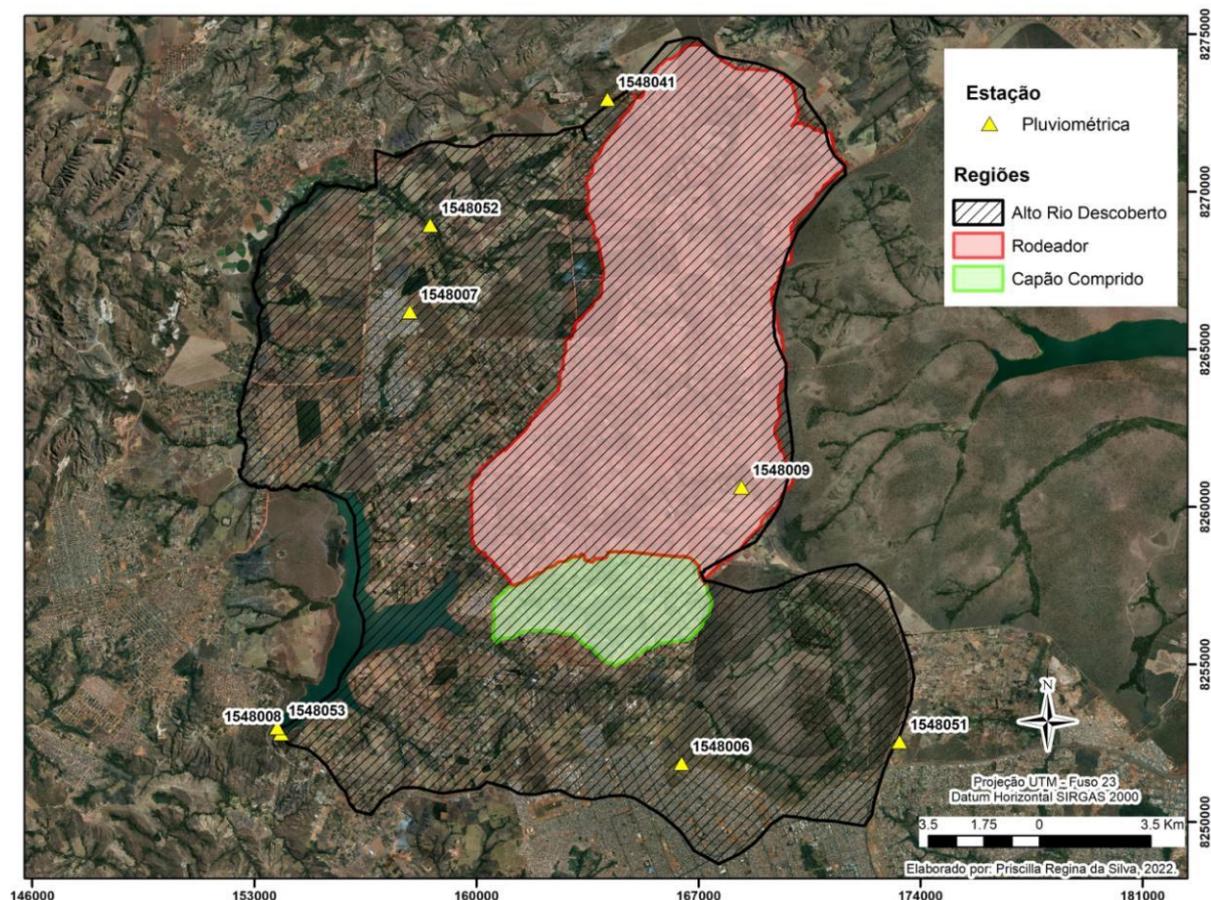


Figura 19 - Localização das estações pluviométricas na Bacia Hidrográfica do Alto Descoberto no Distrito Federal (Hidroweb/ANA).

Quanto às estações pluviométricas, o sistema Hidroweb ressaltou a presença de oito estações próximas às bacias estudadas e na região do Alto Descoberto, das quais os dados foram apurados e ponderados em termos de representação espacial dos dados de cada estação. Contudo, verificou-se que apenas parte delas possuem séries históricas de longo prazo, como aponta a Tabela 8.

As séries foram obtidas por meio do próprio sistema Hidroweb, porém duas estações (1548052 e 1548053) continham erros em seus arquivos de origem, assim não puderam ser

utilizadas. A Escola Corporativa da Caesb encaminhou base de dados onde consta que a estação 1548008 - Descoberto - é a fonte da série histórica de pluviometria que a empresa atualmente aplica em suas pesquisas na área, contudo optou-se, neste estudo, pela interpolação de dados de todas as estações acessíveis utilizando-se do método de polígonos de Thiessen.

Tabela 8 - Estações Pluviométricas da Bacia do Alto Descoberto no Distrito Federal (Hidroweb/ANA e Rede Caesb).

<b>ALTO DESCOBERTO</b>			
Código	Nome	Telemetria	Duração da Série
1548006	TAGUATINGA ETA- RD	Não	1971 - atual
1548007	BRAZLÂNDIA ETA	Não	1971 - atual
1548008	DESCOBERTO	Não	1978 - atual
1548009	JATOBAZINHO	-	1978 - 2009
1548041	RADIOBRÁS	Não	2015 - atual
1548051	RAP VICENTE PIRES	Não	2017 - atual
1548052	DESCOBERTO - BARROÇÃO	Não	2014 - atual
1548053	DESCOBERTO BARRAGEM	Início 2014	1987 - atual

O BDMEP abriga dados meteorológicos da rede de estações do INMET, o instituto possui uma estação meteorológica na região de Brasília, a qual foi iniciada em 12 de setembro do ano de 1961. Entre os dados disponíveis no BDMEP encontram-se as seguintes variáveis atmosféricas: precipitação diária (mm), temperatura do bulbo seco (°C), temperatura do bulbo úmido (°C), temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), umidade relativa do ar (%), insolação (h), direção e velocidade do vento (m/s).

Os dados necessários para início de simulação no SWAT+ e obtidos por meio de cadastramento específico junto ao BDMEP encontram-se listados na Tabela 9. Ressalta-se que para a utilização destes no processo de modelagem necessitou-se de estruturação específica, a qual é melhor elucidada nos próximos tópicos.

Tabela 9 - Dados de variáveis e parâmetros do modelo SWAT monitorados por diferentes instituições na região de estudo e seus períodos utilizados no estudo.

Parâmetro	Fonte	Período
Radiação	BDMEP (INMET)	1961 a 2020
Temperaturas (mín. e máx.)	BDMEP (INMET)	
Umidade relativa	BDMEP (INMET)	
Vento	BDMEP (INMET)	
Precipitação	Escola Corporativa (Caesb) - Hidroweb (ANA)	A partir de 1971 a 2020
Vazão	Escola Corporativa (Caesb) - Hidroweb (ANA)	
Outorgas de uso de recursos hídricos	Adasa	Até dezembro de 2020
Manejo do solo	Emater-DF	Atual
Irrigação	Emater-DF	
Adubação	Emater-DF	
Canais de Irrigação	Emater-DF / Imagens de satélites e aerofotogramétricas	
Uso do solo	Emater-DF/ Imagens de satélites e aerofotogramétricas	A partir de 1964

## 4.2.2 Preparação de base de dados

### 4.2.2.1 Dados climáticos

Os dados obtidos foram formatados de forma a possibilitar a correta aplicação do modelo. Iniciou-se o preparo dos dados de estações climáticas, com informações relativas à localização e à listagem das estações pluviométricas. Salienta-se que todos os arquivos foram inicialmente editados no formato “*txt*”, atinente ao software Bloco de Notas do Windows.

Cabe ressaltar que para cada sub-bacia o SWAT+ utiliza os dados climáticos observados da estação mais próxima, em caso da não existência de dados observados é possível utilizar o *Weather Generator*, o qual simula dados climáticos a partir de sua localização. Neste trabalho foram utilizados os dados disponíveis nas estações existentes na região de estudo.

A unidade de cada categoria de dado climático a ser inserido ao modelo deve seguir o que consta na Tabela 10.

Tabela 10 - Unidades dos dados climáticos no SWAT+.

Categoria ( <i>sigla</i> )	Unidade
Precipitação ( <i>pcp</i> )	mm (milímetros)
Temperaturas máxima e mínima ( <i>tmp</i> )	°C (graus centígrados)
Radiação Solar ( <i>slr</i> )	MJ/m <sup>2</sup> (megajoule por metro quadrado)
Velocidade do vento ( <i>wnd</i> )	m/s (metros por segundo)
Umidade relativa ( <i>hmd</i> )	Fração decimal

Como apresentado na Tabela 9, os dados de radiação solar tiveram como fonte o INMET, contudo, esse disponibiliza apenas dados de insolação solar diária. Assim, a determinação do valor da radiação baseada à insolação foi realizada com apoio de planilha de cálculo disponível no grupo oficial do SWAT no Brasil, que abarca fórmulas fundamentadas na latitude da estação, declinação solar, radiação extraterreste, duração do dia, entre outros (ALLEN *et al.*, 2006).

A preparação dos dados de precipitação provenientes da Caesb deu-se em ambiente *colab* do *Jupyter Notebook*, manipulado a partir de linguagem de programação *Python*.

#### 4.2.2.2 Modelo Digital de Elevação

A declividade geral das bacias estudadas foi estabelecida no ambiente QGIS de duas formas distintas. A primeira a partir de arquivo de modelo de elevação (MDE) disponível no Banco de Dados Geomorfométricos do Inpe, o TOPODATA, que abriga e estrutura toda a base SRTM do Brasil com 30 metros de resolução. Assim, recortou-se as folhas SRTM na área de interesse delimitada para cada bacia, a qual abrange um perímetro maior que sua delimitação e menor que a folha SRTM original, de forma a reduzir o tempo de delimitação e também aumentar a precisão dos resultados. Preencheu-se os dados faltantes com o valor “-32767”, como recomendado no manual do QSWAT+ e reprojeteu-se o arquivo SRTM para o sistema de coordenada do projeto (SIRGAS 2000 - UTM 23S).

Como tentativa de melhoria da qualidade e acurácia dos dados, optou-se por também gerar o MDE no ambiente QGIS, recorrendo-se à ferramenta “Interpolação *TIN*”, a partir de dados de cota de elevação e de curvas de níveis de 5 em 5 metros, vetorizados pela empresa TOPOCART e disponibilizados pela Terracap, os quais passaram por processo de validação e correção das feições topológicas.

#### 4.2.2.3 Dados de classes de solo

Os dados de classe de solo foram obtidos junto à Embrapa Cerrados. A empresa recentemente reclassificou levantamento datado de 1978 (Mapa Pedológico do DF) (REATTO *et al.*, 2004) para o novo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2018), esse mapeamento possui escala de 1:100.000. A classificação do solo passou por breve processo de conferência em campo a fim de identificar manchas de solo não observadas no mapeamento supracitado.

As informações pedológicas e parametrização dos dados contaram como fonte essencial a base de dados de solos construídas por Lima *et al.* (2013) para aplicação do modelo SWAT em bacias do bioma Cerrado. Para o preenchimento dos parâmetros ausentes nessa base (albedo do solo e textura) recorreu-se à função de transferência pedológica (PTF) desenvolvida por Saxton & Rawls (2006).

#### 4.2.2.4 Dados hidrográficos

Em adição à série histórica de precipitação, a Caesb disponibilizou as medições de vazão (diária) e de sedimento (sólidos em suspensão em mg/L - mensal), as quais foram aproveitadas no processo de calibração. A localização dos cursos d'água principais tiveram como origem a Base de Dados Cartográfica da Terracap, datada de 2009 e que dispõe de cursos d'água perenes, intermitentes e efêmeros, os quais foram dispostos juntamente com a base MDE, depois de validação de topologia e devidas correções, de forma a auxiliar inclusive o delineamento das sub-bacias no próprio modelo.

As outorgas de uso de recursos hídricos das sub-bacias foram disponibilizadas pela Adasa em arquivo do tipo “\*.pdf”, sendo assim foi necessária a conversão e tratamento dos elementos para o formato vetorial, provendo o aproveitamento em ambiente SIG e inserção no SWAT+.

A localização e o contorno dos canais de irrigação passaram por vetorização visual no QGIS e por breve análise em campo, contando com informações de técnicos da Emater-DF.

#### 4.2.2.5 Dados de uso do solo

A fonte principal dos dados agropecuários foi a Emater-DF, mediante o acesso aos relatórios anuais que apresentam as informações agropecuárias ramificadas em Regiões Administrativas do DF (EMATER-DF, 2008, 2020a), as quais são fundamentados no sistema interno de cadastro de propriedades próprio da empresa.

O sistema interno de base de dados da Emater-DF, chamado de EmaterWeb, abriga informações sobre toda a atuação da empresa de extensão na área rural do DF, contando com informações cadastrais de agricultores e habitantes rurais, a quantidade de propriedades rurais atendidas, as principais atividades agropecuárias exercidas, planejamento e registros de atividades de ATER (Assistência Técnica e Extensão Rural) e diagnóstico da utilização agropecuária do solo por meio do Índice de Produção Agropecuária (IPA).

O IPA divide-se em quatro classes, baseadas por tipo de atividade, são elas: IPA Agrícola, IPA Animal, IPA Floricultura e IPA Agroindústria. O índice abrange informações relativas à quantidade de área cultivada, dividida pelo tipo de cultivo, sua produção média anual (prevista e real) e produtividade agrícola.

As propriedades cadastradas são diferenciadas por: escritório local da Emater-DF que as atende, comunidade rural, região administrativa e bacia hidrográfica em que está inserida. Quanto aos beneficiários e área, estes são classificados por segmento de agricultor (familiar ou patronal), sua categoria (agrícola, não agrícola e pecuária), sistema de produção (base agroecológica, convencional, convencional com prática agroecológica, em transição agroecológica), atividade econômica (agroindústria, animal, artesanato, floricultura, fruticultura, grandes culturas, olericultura, silvicultura) e produto (espécie cultivada), informações como sistemas de irrigação e práticas conservacionistas também são preenchidas a depender da espécie cultivada e características do solo.

A análise dos dados obtidos por meio dos relatórios anuais da Emater-DF apresenta o perfil da produção agrícola da RA de Brazlândia nos últimos 10 anos, dentre as principais classes de cultivo as que ocorrem na área de estudo são: Grandes Culturas, Fruticultura e Olericultura, sendo essa última a responsável pela maior parte da produção agrícola em área plantada.

Os gráficos presentes na Figura 20 comparam as três principais classes de cultivo da região entre o ano de 2011 e o ano de 2020. A figura indica que, na comparação entre os anos 2011 e 2020, o perfil agrícola da região não difere substancialmente no que se refere à porcentagem de área voltada para a Olericultura, no entanto indica o avanço da área plantada de Fruticultura e a diminuição do cultivo de Grandes Culturas na região.

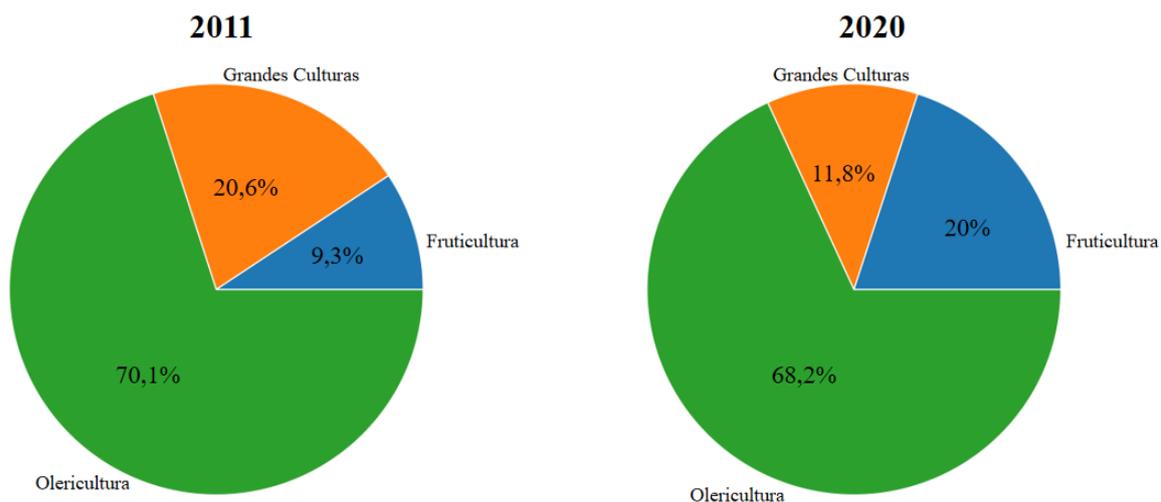


Figura 20 - Comparação de porcentagem de área plantada (2011 e 2020) por classe de cultivo na Região Administrativa de Brazlândia. (Fonte de dados: Emater-DF)

A Figura 21 expõe a área da produção agrícola por tipo de classe de cultivo no mesmo período.

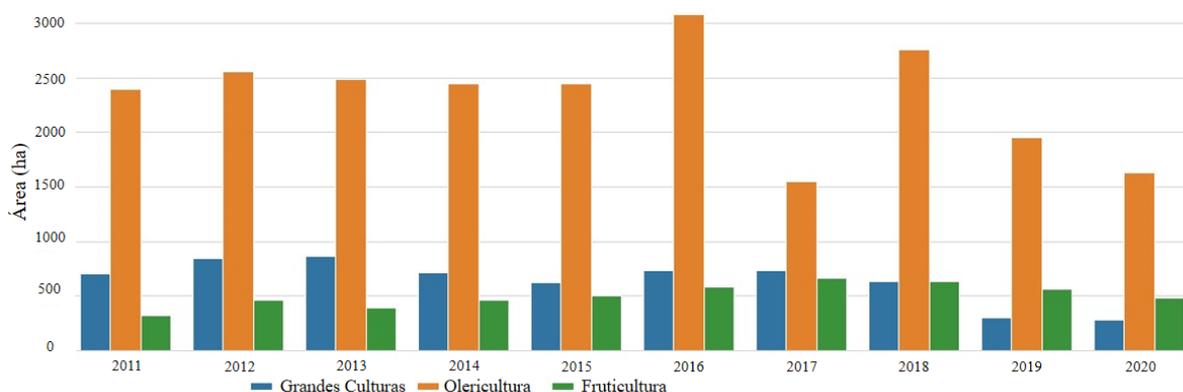


Figura 21 - Produção agrícola (ha) na RA de Brazlândia de 2011 a 2020 (Fonte de dados: Emater-DF).

Ressalta-se que a área contabilizada se refere ao somatório de área plantada por tipo de cultura, por exemplo, se uma propriedade rural possui 2 ha de área total, mas realiza o plantio durante o ano de 2 ha de alface e após a colheita deste realiza o plantio nos mesmos 2 ha só que de outra cultura como o morango, significa que a propriedade plantou 4 ha durante o mesmo ano. Deste modo, o somatório da área de plantio de olericultura é bastante superior às demais, pois as culturas possuem ciclo de produção curto o que possibilita o maior número de cultivo no mesmo talhão.

A partir da análise da área de produção dos últimos 10 anos, observou-se que o pico de produção de olerícolas aconteceu no ano de 2016, com 3.084,21 ha plantados, já a menor produção se deu no ano de 2017, com 1.544,96 ha de olerícolas plantadas, aceita-se que essa queda de 50% na área plantada foi efeito da chamada “Crise Hídrica” que ocorreu na região. Esse período de escassez de água culminou na limitação, por parte da agência reguladora, das captações de água no território, os produtores rurais irrigantes foram limitados no uso do recurso hídrico em até 75% da vazão outorgada e em horários pré-definidos.

A segunda menor taxa anual de área de plantio de olerícolas, 1.625,39 ha, ocorreu no ano de 2020, relacionada ao efeito da pandemia de Coronavírus. A pandemia atingiu fortemente a agricultura familiar, principalmente nos primeiros meses de confinamento da população, devido ao fechamento de feiras tanto de atacado, como de varejo e de restaurantes, além da suspensão temporária de programas de governo que adquirem alimentos para distribuição em escolas públicas.

Quanto às Grandes Culturas, observa-se uma diminuição em sua porcentagem em comparação às outras classes, o mesmo acontece com a área plantada total. A classe de cultivo teve seu pico de área plantada no ano de 2013 com 867 ha plantados, já seus menores valores ocorreram nos anos de 2019, com 302,9 ha, e 2020, com 281,9 ha plantados.

A diminuição da área de Grandes Culturas contrasta com o aumento da área de Fruticultura, onde seu índice mais elevado aconteceu em 2017, com 661 ha plantados, dobrando o valor de sua área plantada em 2011, que era de 319,5 ha. Contudo, os 3 últimos anos têm indicado a diminuição da área de fruticultura na região, onde em 2020 apenas 477,2 ha possuíam plantio de frutas.

No que tange as espécies plantadas por cada classe de cultivo, realizou-se a comparação de sua diversidade nos anos 2011 e 2020, tal levantamento pormenorizado foi realizado visando diferenciar o uso agrícola e também à parametrização de base SWAT.

As figuras 22 a 24 trazem a informação em porcentagem das principais espécies plantadas por cada classe de cultivo nos anos 2011 e 2020, nesta ordem. As principais espécies levantadas foram: Grandes Culturas - milho, café, soja e feijão (Figura 22); Fruticultura - goiaba, banana, tangerina, limão e maracujá (Figura 23); e Olericultura - alface, morango, beterraba, tomate, milho verde, repolho, cenoura e batata (Figura 24).

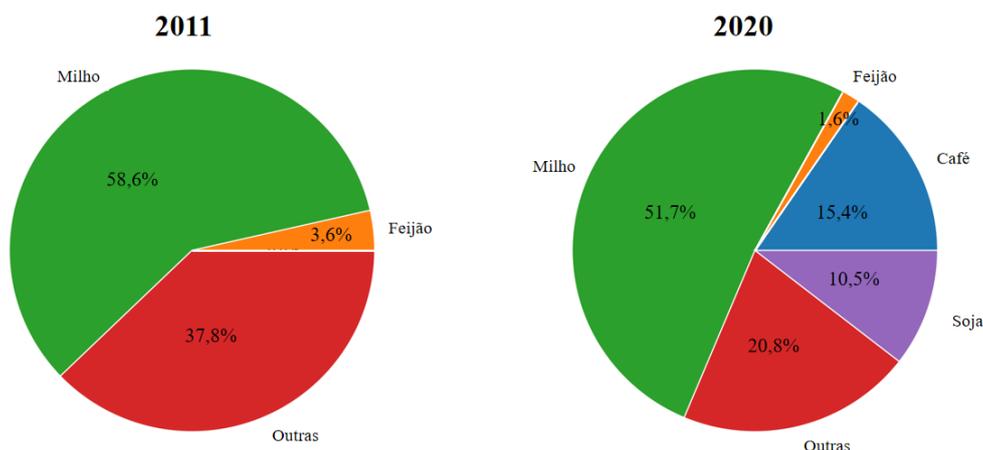


Figura 22 - Gráficos comparativo de espécies de Grandes Culturas (2011 e 2020) na Região Administrativa de Brazlândia. (Fonte de dados: Emater-DF).

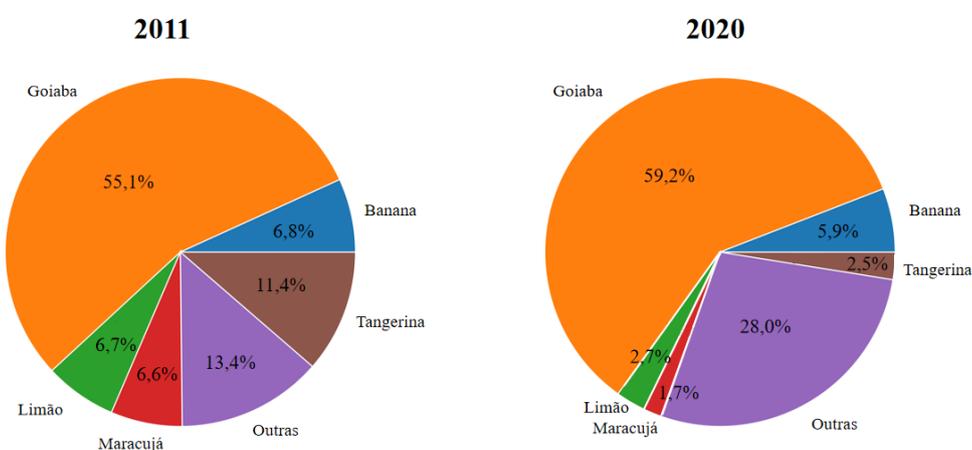


Figura 23 - Gráficos comparativo de espécies de Fruticultura (2011 e 2020) na Região Administrativa de Brazlândia. (Fonte de dados: Emater-DF).

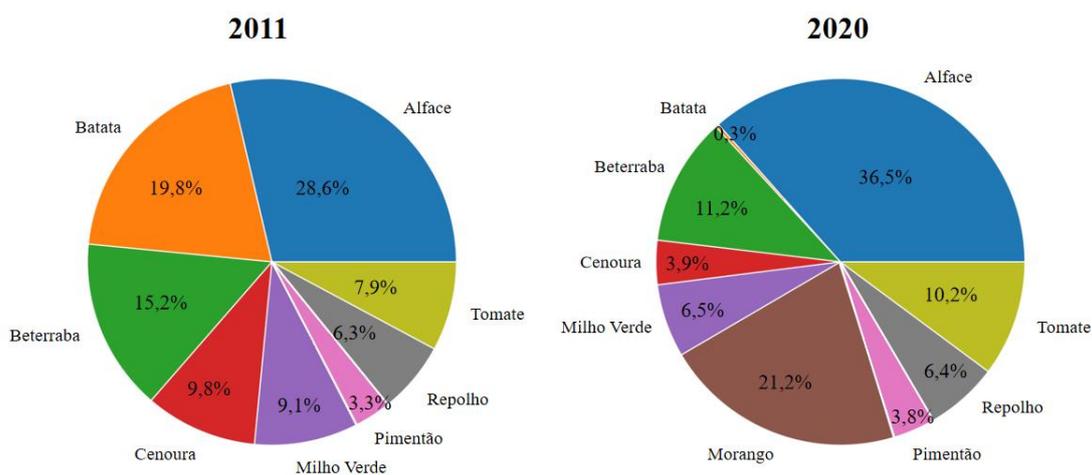


Figura 24 - Gráficos comparativo de espécies de Olericultura (2011 e 2020), sem a classe "Outras", na Região Administrativa de Brazlândia. (Fonte de dados: Emater-DF).

#### 4.2.2.6 Geoprocessamento de imagens

Optou-se por construir o uso do solo classificados com base no perfil de uso do solo e em 4 cenários temporais diferentes, sendo o primeiro relacionado à época de transferência da capital do país e da criação do Distrito Federal, bem como o início da colonização da região (1960), o segundo cenário atinente ao início da instalação de estações pluviométricas e fluviométricas na região e a inauguração do reservatório do Descoberto (1978), o terceiro cenário alusivo ao ano em que a bacia já contava com diversos estudos realizados, inclusive o estudo sedimentológico mais aprofundado na bacia por Lopes (2010) e por fim um quarto cenário relativo aos usos do solo atuais (2019). Devido a inexistência de imagens aéreas ou de satélites precisamente dos anos propostos, utilizou-se as de anos de maior proximidade para elaboração dos cenários de uso do solo.

Preliminarmente, para a construção dos cenários 1 e 2, cogitou-se a utilização de imagens do satélite Landsat 1 e 2 (MSS), porém sua resolução espacial de 80 metros impossibilitou a delimitação das feições em escala necessária para representação de usos em bacia de pequena extensão como o Capão Comprido. Obteve-se, então, acesso a arquivos WMS de imagens dos anos 1964 e 1980 originárias do Serviço Geográfico do Exército, adquiridas pela Codeplan e mosaicadas pela SEDUH (Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Habitação). Tais imagens estão disponibilizadas no GeoPortal oficial do DF, e contam com escala de 1:60.000 para a imagem 1964 e 1:30.000 para a 1984. Ressalta-se que, devido às imagens serem oriundas de fotos aéreas daquele período essas não possuem coloração, sendo apresentadas apenas em escalas de cinza. Verificou-se que o mosaico da imagem 1964 possui falha na junção das folhas, contudo foi desconsiderado o erro, pois a área onde há a falha não possui significativa diferença no uso do solo.

Para a construção do Cenário 3, aproveitou-se de imagem aérea ortorretificada do ano de 2009 proveniente da Codeplan, de alta resolução espacial, aproximadamente 20 cm. Cabe ressaltar que a imagem se encontra também disponível via link WMS. Buscou-se a classificação automática da imagem no software *Interimage*, porém essa não proporcionou o resultado ideal.

Já quanto ao cenário 4, optou-se primeiramente pela utilização de imagens oriundas do satélite CBERS-4A, datadas de 08 de agosto de 2020, imagem com baixa interferência atmosférica. Com a fusão das bandas RGB (verdadeira cor) de sua câmera imageadora de alta resolução (CCD) com sua banda pancromática (HRC), alterou-se a sua resolução espacial de 8 metros para 2 metros. Realizou-se, ainda, a classificação supervisionada da imagem no próprio QGIS, contudo, a classificação não atendeu à escala pretendida.

Assim, optou-se pela utilização de imagem datada de 11 de dezembro de 2019 do *World Imagery Wayback*, com resolução aproximada para a região do estudo de 30 cm, disponibilizada pela empresa americana ESRI via link *WMTS*, conectado ao QGIS via terminal *Python*. Entretanto, a imagem conta com fragmentos com influência de nuvens e, conseqüentemente, áreas de sombras que impossibilitam a visualização de certas feições. Para a vetorização das feições nessas áreas, a imagem CBERS-4A foi usada como apoio.

A Figura 25 elucida a diferença das imagens utilizadas na vetorização e sua qualidade visual, com corte na parte pertencente ao Distrito Federal da APA do Descoberto. Já a Tabela 11 apresenta as informações do tipo de imagem manipulada, sua fonte e data.

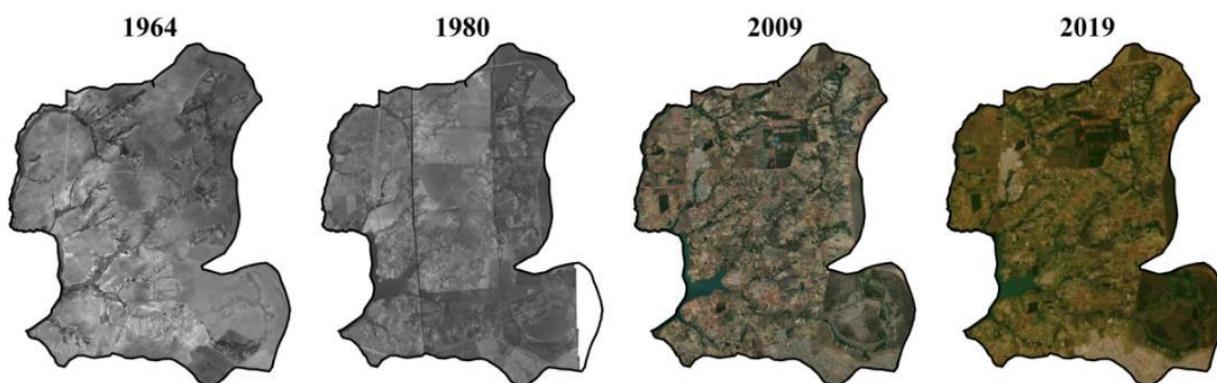


Figura 25 - Imagens utilizadas para vetorização, considerando a APA do Descoberto no DF.

Tabela 11 - Informações de tipo, fonte e data da imagem utilizada para mapeamento de uso do solo na área de estudo.

<b>Cenário</b>	<b>Data da imagem</b>	<b>Tipo/Fonte</b>
Cenário 1	Ano de 1964	Fotos aéreas Serviço Geográfico do Exército /GeoPortal
Cenário 2	Ano de 1980	Fotos aéreas Serviço Geográfico do Exército /GeoPortal
Cenário 3	Ano de 2009	Imagem aérea ortorretificada / Codeplan
Cenário 4	Dezembro de 2019	Imagem <i>World Imagery Wayback</i> (via WMS) / ESRI
	Agosto de 2020	Imagens de satélite CBERS-4A / INPE

Após tentativas não bem-sucedidas de classificações automáticas, optou-se pela vetorização de feições por meio de verificação visual das mesmas, com escala fixa de edição em 1: 3.500 para imagens 1964 e 1980 e em 1:3.000 para imagens 2009 e 2019. As tabelas 12

e 13 apresentam as diferentes classes de uso para cada cenário proposto e sua visualização na escala estabelecida. Assim, é perceptível, devido à assimetria na qualidade das imagens, a diferença entre as visualizações e também às classes de uso consideradas em cada período.

Tabela 12 - Identificação visual para vetorização em software de SIG de uso do solo das bacias de estudo nos cenários propostos a partir de imagens aéreas e de satélites.

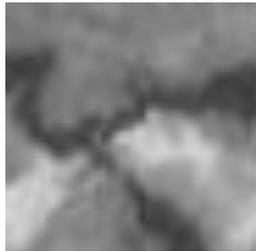
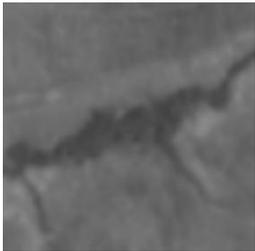
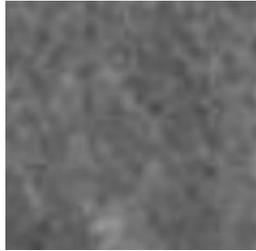
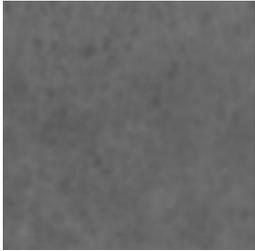
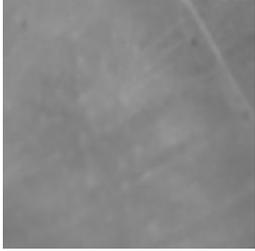
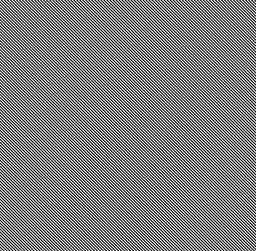
Imagens - Cenários 1 a 4				
	Cenário 1- 1964	Cenário 2 - 1980	Cenário 3 -2009	Cenário 4 - 2019
Mata de Galeria				
Cerrado (Savana)				
Cerrado (Campo)				
Grandes Culturas				
Fruticultura				

Tabela 12 - Identificação visual para vetorização em software de SIG de uso do solo das bacias de estudo nos cenários propostos a partir de imagens aéreas e de satélites (continuação).

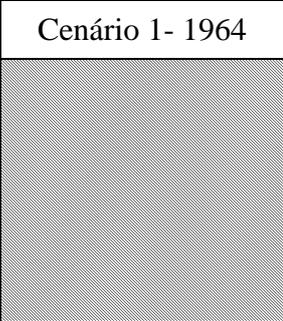
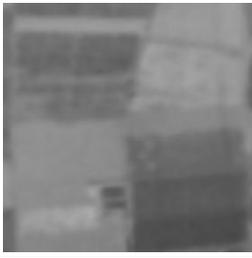
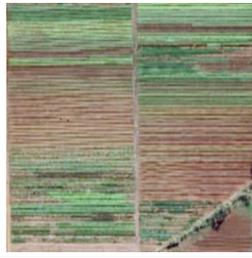
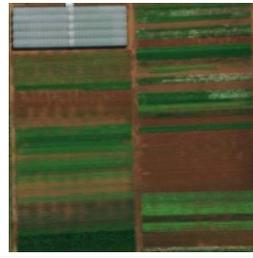
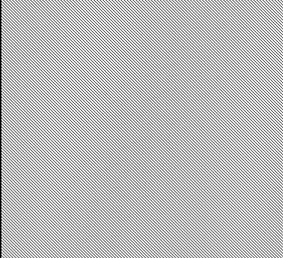
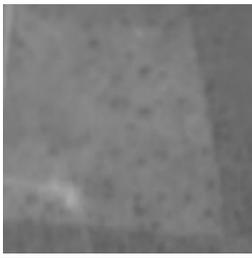
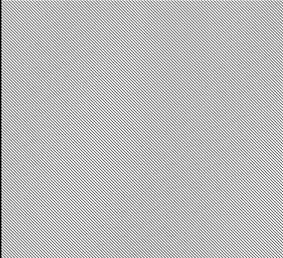
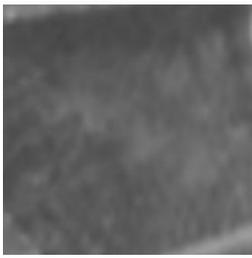
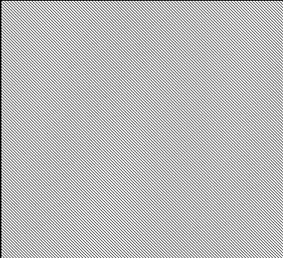
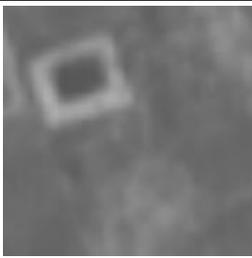
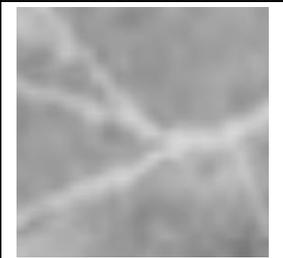
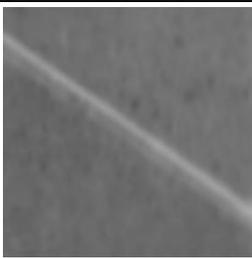
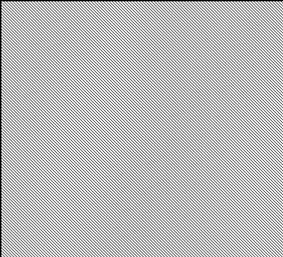
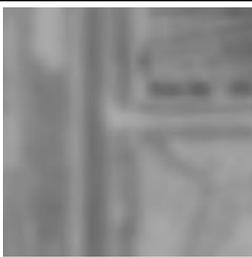
Imagens - Cenários 1 a 4				
	Cenário 1- 1964	Cenário 2 - 1980	Cenário 3 -2009	Cenário 4 - 2019
Olericultura				
Pastagem				
Silvicultura				
Água (reservatórios)				
Estradas não pavimentadas				
Estradas pavimentadas				

Tabela 12 - Identificação visual para vetorização em software de SIG de uso do solo das bacias de estudo nos cenários propostos a partir de imagens aéreas e de satélites (continuação).

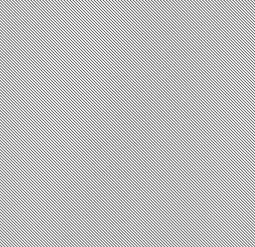
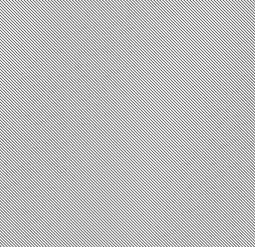
Imagens - Cenários 1 a 4				
	Cenário 1- 1964	Cenário 2 - 1980	Cenário 3 -2009	Cenário 4 - 2019
Agrovila/ Benfeitorias				
Solo Exposto				

Tabela 13 - Caracterização das classes de uso do solo escolhidas e identificadas.

Classificação		Caracterização
Áreas Preservadas	Mata de Galeria	Vegetação nativa densa e perene localizada às margens de cursos d'água formando corredores. Formação florestal.
	Cerrado (Savana)	Vegetação nativa de densidade média a alta com incidência de árvores e arbustos, abrangendo principalmente as fitofisionomias: Cerrado Sentido Restrito e Cerrado Denso. Formação savânica.
	Cerrado (Campo)	Vegetação nativa de densidade baixa com a presença de estrato arbustivo-herbáceo, abrangendo principalmente as fitofisionomias: Campo Limpo e Campo Sujo. Formação campestre.
Uso antrópico - Agropecuária	Grandes Culturas	Cultivo de plantações de grande porte e em sistema de sequeiro. Geralmente abrange as monoculturas de milho, soja, feijão e café. Podem ou não possuir sistema de rotação.
	Fruticultura	Cultivo de frutíferas perenes, regularmente em sistemas irrigados.
	Olericultura	Cultivo de hortaliças folhosas, legumes, tubérculos, raízes e frutos em sistemas irrigados.
	Pastagem	Áreas de vegetação herbácea exótica. Utilizada para alimentação animal, contudo inclui-se aqui também pastagens degradadas e abandonadas ou áreas onde ocorreu a invasão de herbáceas exóticas.
	Silvicultura	Cultivo florestal de eucalipto e pinus.

Tabela 13 - Caracterização das classes de uso do solo escolhidas e identificadas.  
(continuação)

Classificação		Caracterização
Uso antrópico - Infraestrutura	Água (reservatórios)	Reservatórios de água ou tanques de peixes. Podem ser escavados ou impermeabilizados.
	Estradas não pavimentadas	Vias principais e vicinais que não possuem pavimento asfáltico.
	Estradas pavimentadas	Vias principais e vicinais que possuem pavimento asfáltico.
	Agrovila/ Benfeitorias	Áreas impermeabilizadas ou compactadas referente à infraestrutura de moradias, galpões de apoio, entre outros. Também identificado aqui parcelas referente à quintais compactados.
	Solo Exposto	Áreas de retirada de camadas significativas do perfil de solo, impedindo sua regeneração natural.

O diagnóstico do uso do solo contou com 5 saídas a campo para reconhecimento do território e conferência de feições, sobretudo de feições observadas no cenário 3 e 4. Como descrito anteriormente, as classes de usos de solo estabelecidas consideraram as informações agropecuárias provenientes de relatórios da Emater-DF e complementadas por entrevistas realizadas com técnicos da empresa.

Cabe ressaltar que foram observados talhões que, presumivelmente, encontravam-se em sistema de pousio (sem utilização aparente), contudo, para o propósito da modelagem, optou-se em aglutiná-los à atividade principal ou a áreas de vegetação campestre, a depender de sua forma identificada.

#### 4.3 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

A estruturação da base de dados foi montada no software SQLite Studio, com apoio do editor de planilhas Microsoft Excel. A composição de dados georreferenciados, o aprimoramento e processamento dos existentes aconteceu no ambiente do software QGIS, em sua versão 3.16 - Hannover e extensões existentes. Outros programas para apoio da classificação do uso dos solos foram operados, como o software *InterImage*, na tentativa de classificação supervisionada de imagens de alta resolução. No que corresponde à elaboração do *layout* dos mapas, buscou-se também o ambiente do ArcGIS 10.1, devido à maior disponibilidade de ferramentas e simplicidade na composição.

Todo o procedimento de modelagem foi realizado no SWAT+, em sua interface específica para o software QGIS, na versão 2.1.7, e optou-se pela utilização do Microsoft MPI para otimização do processamento. Quanto à calibração e à análise de sensibilidade, ambas ocorreram por meio do *plug-in* SWAT+ Toolbox.

Para a organização de dados, geração de funções objetivos e análise gráfica, recorreu-se à linguagem de programação R, com auxílio do software RStudio, e também à linguagem Python, no ambiente do Jupyter Notebook, especialmente suas bibliotecas Pandas, Matplotlib e Numpy.

#### **4.4 MODELAGEM INICIAL COM O SWAT**

Utilizou-se o modelo SWAT+, por meio da interface do modelo SWAT+ no ambiente QGIS, para modelagem e simulação quali-quantitativa das bacias em questão, para isso observou-se os cenários de uso do solo e as interferências de diferentes práticas de manejo do solo e de irrigação no balanço hídrico das bacias rurais selecionadas, bem como a influência de cargas de nutrientes (nitrogênio e fósforo total) e sedimentos, em forma de material em suspensão, na qualidade do manancial principal componente das bacias. Efetuou-se diversas simulações que foram comparadas visualmente e estatisticamente com dados observados, indicando, assim, se o modelo apresenta resultados satisfatórios ou sua necessidade de calibração.

Após a simulação, em período diário, realizou-se a análise de sensibilidade, bem como a calibração e verificação do modelo, no que tange os dados quantitativos, utilizando a ferramenta SWAT+ Toolbox. Já quanto aos dados de qualidade, tais tipos de análise foram dificultados devido a menor quantidade de dados disponíveis, sua pontualidade e também quanto a série histórica limitada.

O método de análise de sensibilidade escolhido foi o Sobol (2001), disponível no SWAT+ Toolbox, o qual observa o comportamento de resposta dos parâmetros na simulação, verificando qual ou quais apresentam maior sensibilidade durante a aplicação do modelo e os valores simulados. Os parâmetros empregados e seus intervalos de valores foram baseados em Ferrigo (2014) e encontram-se na Tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetros, intervalo de valores e métodos de variação utilizados na análise de sensibilidade. (Fonte: adaptado de Ferrigo (2014))

Grupo referência	Parâmetro	Descrição	Unidade	Método SWAT+	Mínimo	Máximo
Aquíferos	<i>alpha</i>	Constante de recessão do fluxo de base	dias	Substituição	0	1
	<i>revap_co</i>	Coeficiente "revap" de água subterrânea	-	Substituição	0,02	0,1
	<i>revap_min</i>	Profundidade em aquífero profundo para que aconteça o "revap"	mm	Substituição	0	500
HRU	<i>cn2</i>	Curva número na condição II	-	Porcentagem	-30%	20%
	<i>esco</i>	Fator de compensação de evaporação de solo	-	Substituição	0,4	1,0
<i>Routing</i>	<i>bd</i>	Densidade aparente do solo	g/cm <sup>3</sup>	Porcentagem	-93%	-60%
Solos	<i>awc</i>	Capacidade de água disponível no solo	mm H <sub>2</sub> O/mm	Porcentagem	-20%	50%
	<i>k</i>	Condutividade hidráulica saturada do solo	mm/hr	Porcentagem	-195%	80%
	<i>bd</i>	Densidade aparente do solo	g/cm <sup>3</sup>	Porcentagem	-93%	-60%
	<i>anion_excl</i>	Fração de porosidade a partir da qual ânions são excluídos	-	Substituição	0,1	1

Posteriormente à análise de sensibilidade, o modelo passou pelo processo de calibração automática, por meio da maximização do NSE, onde se observou as modificações de cada parâmetro e sua resposta, de forma satisfatória ou insatisfatória. Para isso, analisou-se sua eficiência utilizando-se de funções objetivos e coeficiente de determinação e eficiência.

O modelo de calibração e avaliação usado neste trabalho baseou-se nas análises de desempenho sugeridas por Moriasi *et al.* (2015), com o emprego do NSE – Nash-Sutcliffe, PBIAS – Percentual de viés e Coeficiente R<sup>2</sup>. Ao fim dos processos de análises e da aplicação do modelo, bem como da geração dos resultados simulados avaliou-se a dinâmica das bacias de estudos de forma estatística e gráfica.

Em relação aos dados de calibração e verificação, estes obedeceram a proporção de 2/3 (dois terços) por 1/3 (um terço) do período total dos dados. A Tabela 15 exhibe o período de

calibração utilizado para cada cenário proposto, considerando as vazões diárias, e para a calibração de nutrientes.

Tabela 15 - Períodos de aquecimento, modelagem, calibração e verificação do modelo das bacias.

	<b>Aquecimento</b>	<b>Modelagem</b>	<b>Calibração</b>	<b>Verificação</b>
<b>Cenário 1</b> (1964)	1961 a 1964	1965 a 1979		
<b>Cenário 2</b> (1980)	1974 a 1978	1979 a 1993	1979 a 1988	1989 a 1993
<b>Cenário 3</b> (2009)	1996 a 2000	2001 a 2015	2001 a 2010	2011 a 2015
<b>Cenário 4</b> (2019)	2001 a 2005	2006 a 2020	2006 a 2015	2016 a 2020
<b>Nutrientes</b>			2013 a 2018	2019 a 2020

Para a modelagem do cenário 1, utilizou-se também os dados de precipitação proveniente do INMET, visto que esses são datados do ano de 1961 e optou-se por replicar neste a calibração resultante do cenário 2, devido a inexistência de dados observados anteriores. Ressalta-se que o processo completo de análise de sensibilidade e calibração foi realizado nos cenários da bacia do Capão Comprido e seus resultados replicados na bacia do Rodeador.

#### **4.5 INCORPORAÇÃO DE DADOS REGIONAIS NA BASE DO MODELO SWAT+ E APLICAÇÃO DE CENÁRIOS DE MANEJO**

A parametrização de base SWAT+ para o uso do solo teve fundamentação e aproveitamento de documentos de apoio presentes no próprio SWAT+, bem como base de dados elaborada para a região por Ferrigo (2012). A adaptação de valores de CN teve por suporte análises da dinâmica do uso e cobertura do solo no DF citadas por Valadares (2017) e complementadas por Bielenki Júnior & Barbassa (2012), Sartori *et al.*, (2005) e Sartori (2010), ambas baseadas no método do Serviço de Conservação do Solo (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), que reúne os solos em quatro grandes grupos considerando características hidrológicas como a capacidade de infiltração e o acréscimo de escoamento superficial.

Observa-se que para a inserção dos dados vetoriais de classes de solos e de uso dos solos, esses passaram por transformação de arquivo vetorial do tipo *shapefile* para arquivo *raster*, por meio da ferramenta *Rasterize* do QGIS.

A Tabela 16 apresenta a parametrização junto ao SWAT+ relativa às classes de uso do solo e sua subclassificação e porcentagem dos tipos de cultivos agrícolas e uso urbano, conforme assinalado nas figuras 22 a 24.

Tabela 16 - Classes, subclasses e porcentagens de itens utilizados para base de crescimento de planta e base urbana.

Classe	Subclasse	%	Classe	Subclasse	%
<b>Olericultura</b>	Alface	(38%)	<b>Grandes Culturas</b>	Feijão	(2%)
	Tomate	(10%)		Milho	(75%)
	Beterraba	(11%)		Soja	(23%)
	Cenoura	(4%)	<b>Silvicultura</b>	Eucalipto	(50%)
	Milho Verde	(6%)		Pinho	(50%)
	Morango	(21%)	<b>Vegetação Nativa</b>	Campestre	-
	Pimentão	(4%)		Florestal	-
	Repolho	(6%)		Savana	-
Batata	(0%)	<b>Outros</b>	Pastagem	-	
<b>Fruticultura</b>	Banana		(8%)	Solo Exposto	-
	Goiaba	(82%)	<b>Urbano</b>	Benfeitorias	-
	Laranja ( <i>Citrus</i> )	(7%)		Estradas Pavimentadas	-
	Maracujá	(3%)		Estradas Não Pavimentadas	-

#### 4.5.1 Dados de Manejo

Os arquivos oficiais da Emater-DF que preveem o custo de produção de variados cultivos agrícolas foram a fonte de onde se despreendeu os principais fertilizantes e as práticas de uso e manejo básicas empregadas por tipo de espécie agrícola cultivada (EMATER, 2020b).

##### *Fertilizantes*

A configuração da composição dos principais fertilizantes utilizados no DF, no que tange a teores de Nitrogênio, Fósforo, Potássio, Matéria Orgânica e Micronutrientes foi estipulada a partir de estudo realizado por Ribeiro *et al.* (1999) e complementada com dados presente na Instrução Normativa N°39 (MAPA, 2018), que contém as exigências mínimas de tolerância dos fertilizantes minerais e também por portfólio de produtos (NUTRIPLAN, 2021; SANA, 2011; YOORIN, 2021) e estudos de caso com uso de fertilizantes (SILVA *et al.*, 2007; SFREDO & OLIVEIRA., 2010; OLIVEIRA, 2015; BARATTA JUNIOR, 2007; SOUZA *et*

*al.*, 2015). Desse modo, produziu-se catálogo específico onde consta a quantidade de cada fertilizante (tonelada ou quilograma) aplicado nas culturas agrícolas mais comuns da região tal como os teores de composição de cada produto (porcentagem ou dag/Kg).

No que corresponde aos parâmetros necessários para base de dados SWAT+, considerou-se o peso atômico e massa molecular dos componentes para o cálculo das frações minerais e orgânicas de Fósforo e Nitrogênio, e a fração mineral de Nitrogênio aplicado como Amônia.

Os valores de referência da adubação orgânica tiveram como fonte tabela padrão do SWAT compilada a partir de dados de ASAE (1998) e adaptada a partir de Ribeiro *et al.* (1999) e Silva *et al.* (2007), complementada com valores referentes ao Composto de Lixo Orgânico (COL) procedente do SLU e ao Lodo de Esgoto - processado seco - proveniente da CAESB, compostos regularmente utilizados na agricultura do DF. Ressalta-se que a composição química do COL e Lodo de Esgoto são procedentes de análises físico-química disponibilizadas pelo SLU e CAESB, onde se considerou os teores e relação de Nitrogênio Amoniacal e Nitrogênio Kjeldahl para determinação dos valores de nitrogênio mineral e orgânico, e teores e relação de Ortofósforos e Fósforo Total para os valores de fósforo mineral e orgânico, conforme orientado por Arnold *et al.* (2016).

Os fertilizantes minerais e orgânicos regularmente recomendados para as produções convencionais, segundo Emater-DF (2020b), encontram-se listados na Tabela 17.

Tabela 17 - Lista de fertilizantes usualmente recomendados no Distrito Federal. (EMATER-DF, 2020b; SLU; CAESB)

<b>ESPECIFICAÇÃO</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>ADUBO</b>
02-20-18 +micro	ton.	mineral
04-14-08	ton.	mineral
04-30-16	ton.	mineral
04-30-16 + Zn	ton.	mineral
05-25-15 + FTE	ton.	mineral
10-10-10	ton.	mineral
20-00-20	ton.	mineral
Ácido Bórico	kg	mineral
Ácido Fosfórico	kg	mineral
Bórax	kg	mineral
Cloreto de potássio branco	kg	mineral
Cloreto de potássio	ton.	mineral
Cobalto + Molibdênio	l	mineral
Fosfito de potássio	l	mineral
FTE BR 12	kg	mineral
Manganês 25%	kg	mineral
MAP	kg	mineral
Molibdato de Sódio	kg	mineral

Nitrato de cálcio	kg	mineral
Nitrato de potássio	kg	mineral
Salitre potássico do Chile	kg	mineral
Sulfato de amônio	ton.	mineral
Sulfato de cobre	kg	mineral
Sulfato de magnésio	kg	mineral
Sulfato de manganês	kg	mineral
Sulfato de potássio	kg	mineral
Sulfato de zinco	kg	mineral
Superfosfato Simples	ton.	mineral
Termofosfato	ton.	mineral
Ureia	ton.	mineral
Fosfato Natural	t	mineral
Bokashi	ton.	orgânico
Cama de Frango	ton.	orgânico
Biofertilizante líquidos	l	orgânico
Adução Verde	ha	orgânico
Esterco Bovino	ton.	orgânico
Esterco Suíno	ton.	orgânico
Farelo de Arroz ou Trigo	ton.	orgânico
Farinha de osso	ton.	orgânico
Composto Orgânico de Lixo	ton.	orgânico
Lodo de Esgoto	ton.	orgânico
Composto de Poda Urbana	ton.	orgânico

A quantidade recomendada de cada fertilizante para um hectare de cada tipo de cultivo foi devidamente compilada de Emater-DF (2020b) e encontra-se de forma integral no Apêndice A, dividida por tipo de atividade (olericultura convencional, olericultura orgânica, fruticultura e grandes culturas). O Apêndice B exibe a composição de cada fertilizante considerando os principais elementos em dag/Kg (decagrama por quilograma).

No entanto, o SWAT+ modela unicamente os ciclos nutritivos relacionados aos elementos Nitrogênio (N) e Fósforo (P) em suas formas minerais e orgânicas. Assim, somente os fertilizantes que dispõem desses nutrientes em sua composição tornaram-se elemento do banco de dados do SWAT. A ausência de informações bibliográficas referente à composição de alguns adubos do tipo orgânico impossibilitou a sua inclusão ao banco de dados configurado.

Estabeleceu-se os principais implementos agrícolas utilizados no DF para a distribuição de nutrientes ao solo, operação que o SWAT+ também considera em sua simulação baseado no tipo de maquinário utilizado, sua eficiência e profundidade de mistura do nutriente ao solo. A partir da lista de implementos estabelecida, comparou-se à base de dados presente no *Appendix A* (ARNOLD *et al.*, 2016) averiguando suas nomenclaturas e visualmente, por meio

de catálogos disponíveis na internet, os equipamentos que mais se assemelham aos empregados na região.

#### *Práticas de manejo de água e solo*

As práticas de conservação de solo, da mesma maneira que as práticas de irrigação empregadas foram obtidas pelos relatórios de custo de produção e diagnóstico realizado durante o período de “Crise Hídrica” na região (ADASA; CAESB; EMATER; SEAGRI, 2018).

A parametrização de base de dados de irrigação presente no SWAT+ fundamentou-se na modificação dos valores de eficiência dos sistemas de irrigação, utilizando duas fontes de informação principais: Resolução 18/2020 (ADASA, 2020) utilizada atualmente para emissão de atos de outorga e, tabela de eficiência construída junto aos engenheiros agrônomos da Emater-DF. A primeira foi utilizada como base para determinação da eficiência ideal do sistema de irrigação e a segunda como a eficiência atual dos sistemas, considerando as reais formas de uso e de manutenção desses nas propriedades rurais da bacia.

As práticas de conservação do solo foram parametrizadas considerando as ações mais comuns na região observando a declividade da área. O parâmetro essencial é o fator P da Equação Universal da Perda de Solo (EUPS), atinente às práticas de manejo agrícolas, o qual foi embasado considerando os valores contidos no manual do SWAT+ (ARNOLD *et al.*, 2016) e os valores estabelecidos no edital do Projeto Produtor de Água do Pípiripau (ADASA, 2021).

#### **4.5.2 Aplicação de base de dados adaptada e simulação de práticas de manejo de água e solo**

Com o intuito de observar os efeitos provenientes das alterações na parametrização realizada na base de dados do SWAT+, simulou-se novamente o cenário mais recente, contudo agora utilizando-se do banco de dados adaptado e adotando culturas agrícolas específicas em substituição às classes de cultivo gerais, conforme Tabela 16 e Apêndice A. Dessa forma, foram comparados os resultados oriundos da simulação padrão do cenário 4 (2019) com a simulação de banco de dados adaptado para o mesmo cenário, correlacionado especialmente as respostas referentes à aplicação de fertilizante e o efeito nos componentes dos ciclos dos nutrientes (P e N). Para a inserção dos fertilizantes, utilizou-se das tabelas de decisão disponibilizadas no modelo.

Quanto à modelagem de práticas de manejo de água e solo, simulou-se dois novos cenários relativos à adoção ou não de práticas de conservação de água e solo, ambas também apoiadas no uso e ocupação de solo mais atual (cenário 4 - 2019) e tendências de mudança observadas e desejadas.

Assim, a divisão dos cenários correlaciona práticas convencionais de manejo e uso de água e solo e expansão urbana, com a adoção de práticas consideradas mais conservacionistas e ideais (terraços, plantio em nível e sistemas de irrigação eficientes), bem como a proteção e recuperação de áreas naturais como a APP. A Tabela 18 ilustra os cenários relativos ao manejo da água e solo.

Tabela 18- Cenários prospectivos de práticas de manejo e uso do solo e da água.

Cenário Convencional	Cenário Conservacionista
Manejo convencional do solo – sem adoção de práticas	Manejo conservacionista do solo – com adoção de práticas
Expansão de áreas de benfeitorias (urbanização)	Preservação do remanescente de vegetação e recuperação de APP
Sistemas de irrigação com eficiência atual*	Sistemas de irrigação com eficiência ideal*

\*Versão disponível do SWAT+ não permitiu a configuração para a simulação.

Para a configuração dos dois cenários prospectivos, a modificação do uso do solo baseou-se nas tendências observadas e nas alternativas plausíveis de alterações. Assim, para a construção do cenário convencional de uso de solo, amplificou-se em 10 metros de raio as áreas de classe de uso do solo “benfeitorias”, de modo a simular a intensificação das áreas impermeabilizadas e a provável urbanização.

Já quanto ao cenário conservacionista, sugeriu-se a preservação do remanescente de vegetação nativa atual nas bacias e a recuperação e recomposição das áreas de preservação permanente de cursos d’água superficiais e suas zonas tampão (50 metros), conforme estabelecido pelo Plano de Manejo da APA da Bacia do Rio Descoberto (ICMBIO, 2014). Ressalta-se que as áreas dentro da zona tampão e APP que já dispunham de cobertura natural de vegetação nativa do tipo cerrado (savana) foram mantidas, inclusive as que abrangiam o cerrado (campo) como cobertura em áreas em que as fitofisionomias Campo Limpo e Campo Sujo aparenta ser a cobertura ideal e natural devido às características intrínsecas, como tipo de solo e declividade.

No que tange às práticas de manejo do solo, realizou-se a alteração de parâmetros exclusivamente nos usos agropecuários. A simulação do cenário convencional ocorreu com a configuração de suas práticas conforme valores concebidos como convencional no edital do Projeto Produtor de Água do Pípiripau (ADASA, 2021). Já em relação às práticas conservacionistas, configurou-se cada classe de cultura com a prática recomendada para a cultura e para a região, conforme Tabela 19.

Tabela 19 - Práticas de manejo do solo configuradas no SWAT+ para o cenário conservacionista.

<b>Classe de cultura</b>	<b>Prática conservacionista</b>
Olericultura	Plantio em nível
Fruticultura	Plantio em nível
Grandes Culturas	Plantio direto
Silvicultura	Plantio em nível
Pastagem	Terraços

A modelagem no ambiente SWAT+ utilizou como base a série histórica dos anos 2006 a 2020, porém o período de simulação hidrológica foi ampliado até o ano de 2030, de forma a proporcionar uma análise prospectiva fundada nas tendências de usos futuros. A calibração empregada foi a realizada para a bacia do Capão Comprido para o cenário 4, referente ao ano de 2019.

Ressalta-se que foi realizada a tentativa de inserir as conversões das eficiências dos sistemas de irrigação e a inclusão dos pontos de captação de água outorgados, contudo foram observados erros estruturais na versão do modelo utilizada, o que impossibilitou a inserção e modelagem de tais conjunturas.

Observou-se a resposta dos componentes hidrológicos integrantes do balanço hídrico das bacias em ambos cenários, como também se apreciou o comportamento dos componentes a partir da análise espacial baseada nas unidades de paisagem (LSU), em que o SWAT+ divide as bacias em áreas de várzea (*floodplain*), mais próximas aos cursos d'água, e em áreas de relevo mais elevado (*uplands*).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO HIDROMETEOROLÓGICA DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

#### 5.1.1 Precipitação

A compreensão do comportamento hidrológico da região contou com a análise de dados provenientes de seis estações pluviométricas que possuem séries históricas de dimensões variadas, as quais se encontram exibidas e diferenciadas na Figura 26, que apresenta visualmente as falhas durante todo o período. Ressalta-se que apenas a estação Jatobazinho não se encontra mais em operação, desde o ano de 2009, e essa é também a única que se encontra no interior de uma das bacias estudadas.

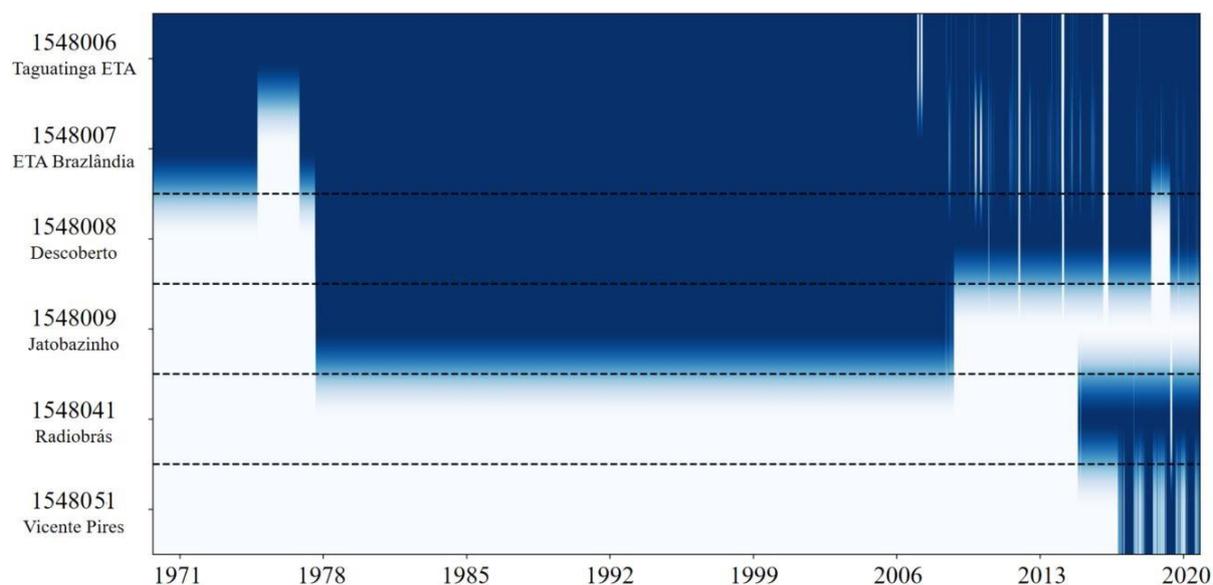


Figura 26 - Disponibilidade de dados de precipitação de cada estação entre os anos de 1971 a 2020.

As estações da ETA Brazlândia e da ETA Taguatinga são as mais antigas, com operação iniciada em 1971, e, conseqüentemente, as que possuem maior período de coleta de dados. A estação Descoberto igualmente iniciou sua operação na década de 70, mais precisamente no ano de 1978, contudo, as demais estações foram instaladas a partir do ano de 2014, não possuindo ainda séries históricas com mais de 10 anos de duração.

No que corresponde à localização, a distância média entre as estações pluviométricas é de 15 km, sendo as mais distantes entre si as estações: Descoberto e Radiobrás e Radiobrás e

Vicente Pires, com 22 km de distância entre elas. A Figura 27 apresenta as estações analisadas e sua localização.

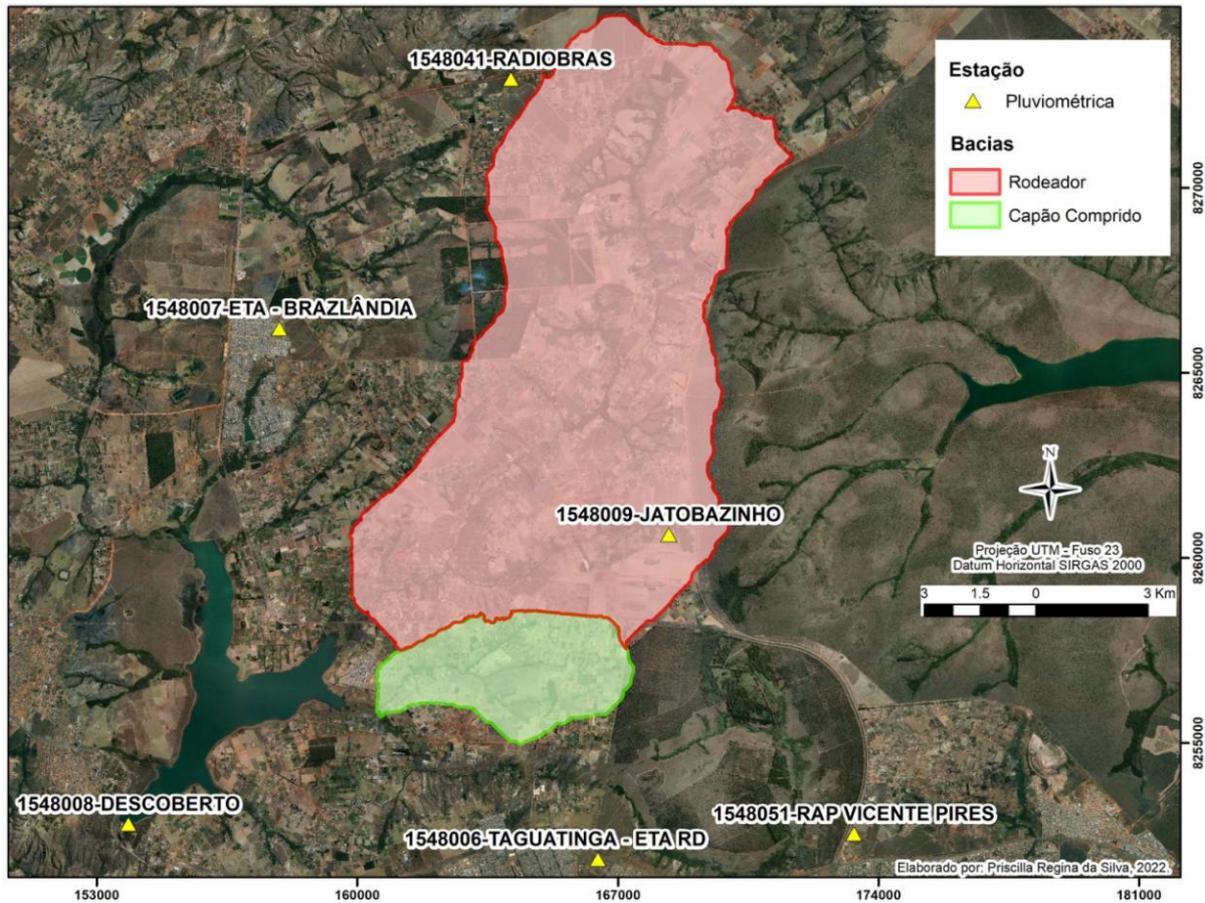


Figura 27 - Localização das estações pluviométricas com séries históricas obtidas e analisadas.

No que tange ao índice pluviométrico mensal médio, a Figura 28 expõe as médias mensais das estações pluviométricas analisadas.

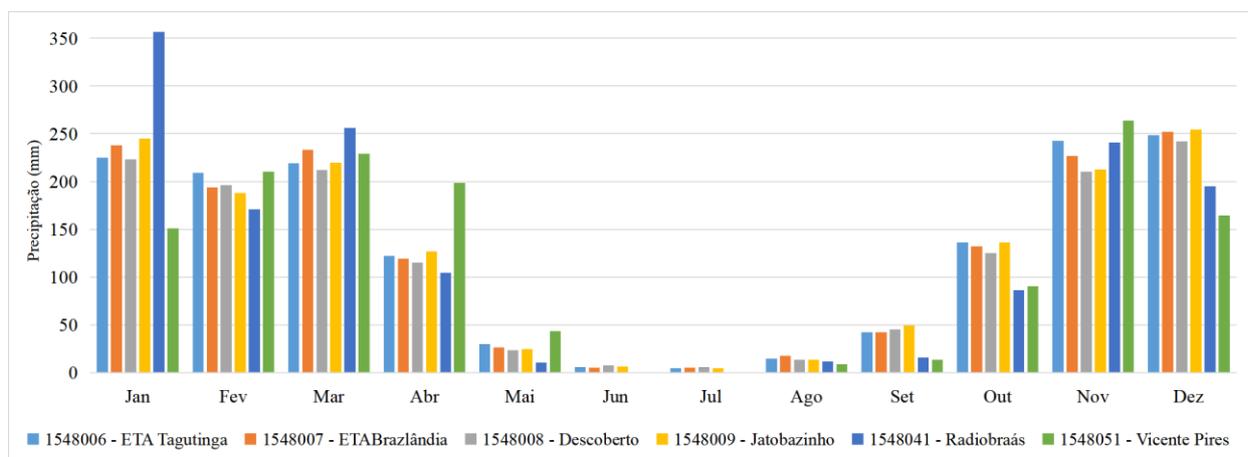


Figura 28 - Índice pluviométrico médio mensal (mm) (Hidroweb/ANA e Rede Caesb).

Analisando o comportamento dos dados, a localização da estação e a extensão de sua série histórica é perceptível a variação nas alturas médias precipitadas. Tendo como exemplo o mês de janeiro, a estação 1548041-Radiobrás indica uma variação de mais de 100mm entre as chuvas registradas nas demais estações, isso pode ser justificado pela sua curta série histórica, de apenas 6 anos, a qual pondera de maneira acentuada alturas de chuvas atípicas acontecidas no ano de 2020, além de que a região se encontra em uma altitude mais elevada da região, formando um platô. As estações do ano se mostram bem definidas, com altos índices de precipitação entre os meses de outubro a abril, durante a estação chuvosa, e baixos índices pluviométricos durante os meses de maio e setembro, configurando a estação seca, com precipitação diária média de 0,62mm.

As médias anuais de cada estação pluviométrica estão sinalizadas no gráfico exibido pela Figura 29.

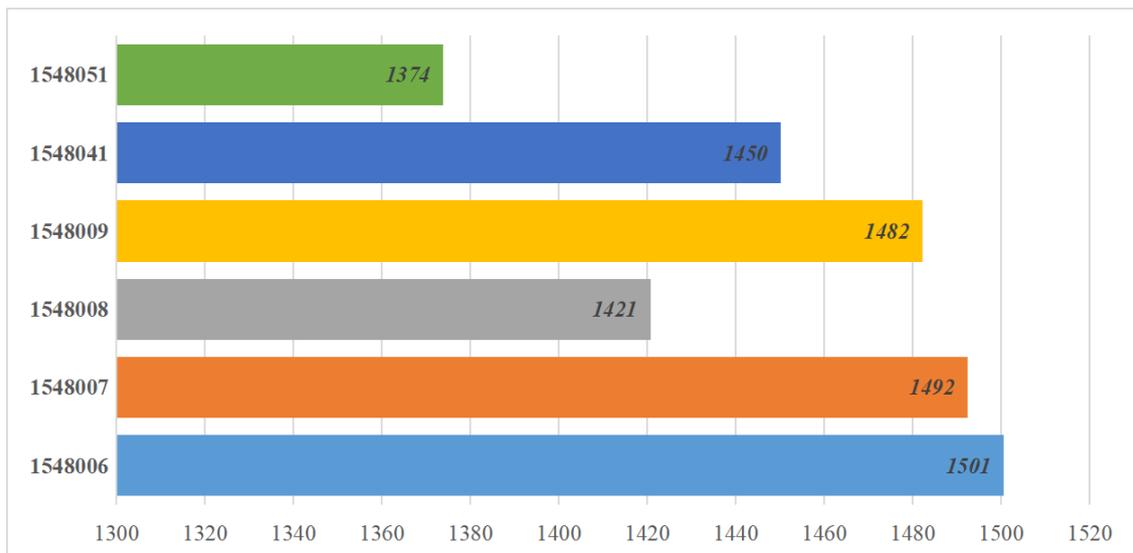


Figura 29 - Precipitação média anual das estações (Hidroweb/ANA e Rede Caesb).

Observa-se a variação de valores de precipitação média anual entre as estações, sendo essa de aproximadamente 127mm entre as estações 1548006 - ETA Taguatinga (1500mm) e 1548051 - Vicente Pires (1374mm), mesmo essas se distanciando em meramente 7 km, no entanto possuem séries históricas de dimensões diferentes. Contudo, mesmo comparando-se estações com séries históricas de espessura semelhantes, como 1548008-Descoberto e 1548006 - ETA Taguatinga, observa-se a variação de 80mm na altura média da precipitação acumulada. Assim, percebe-se que a dinâmica de chuvas da região possui alta heterogeneidade mesmo em breves distâncias.

Para a definição da área de influência de cada estação pluviométrica nas bacias estudadas, utilizou-se o método de interpolação por polígonos de Thiessen por meio da determinação do fator peso para as séries de dados disponíveis, possibilitando o melhor entendimento do regime de chuvas de cada uma das bacias. Dessa forma, considerou-se a distribuição da precipitação de forma homogênea em cada uma das bacias hidrográficas.

Devido à heterogeneidade das datas de operação de cada estação, o método de polígonos de Thiessen foi realizado em 5 períodos distintos, conforme Figura 30 e tabelas 20 e 21, as quais apresentam uma síntese das informações, entre elas a divisão da área da bacia pelo método e o fator peso obtido.

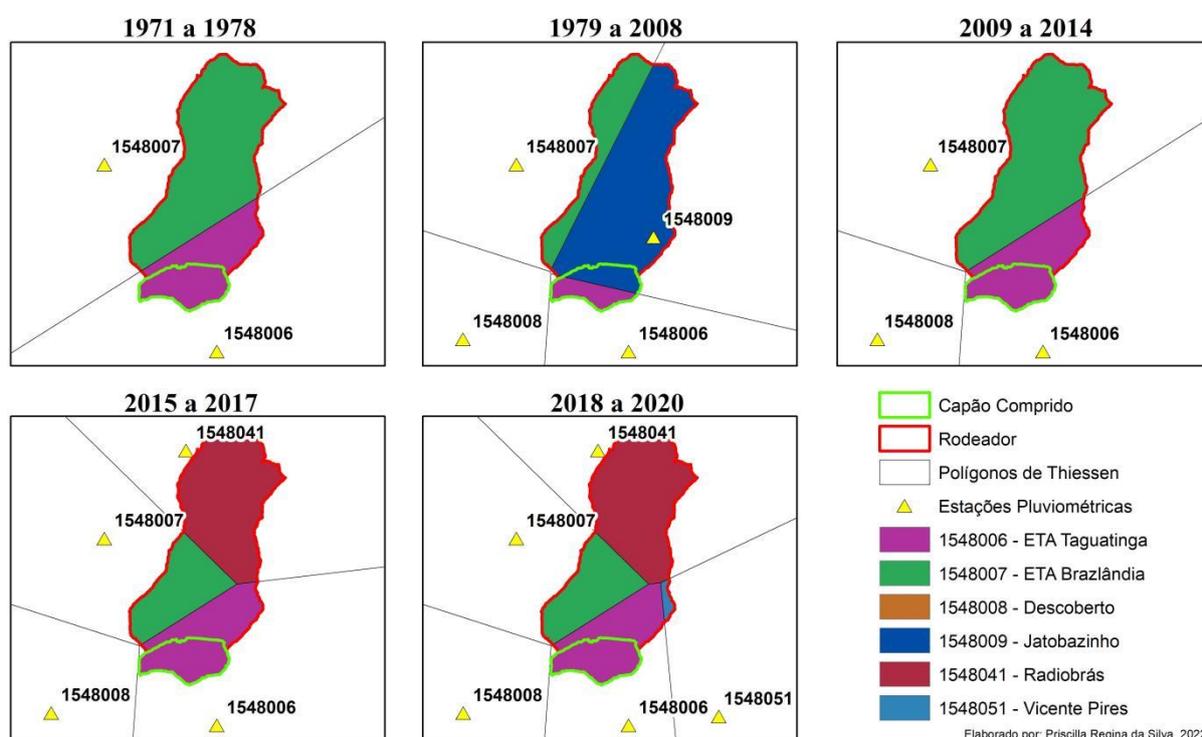


Figura 30 - Área de influência das estações pluviométricas nas bacias do Rodeador e Capão Comprido pelo método de polígonos de Thiessen dividido por períodos.

Tabela 20 -Fator de peso de cada estação pluviométrica na região de influência da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF, baseada em sua área de influência, na aplicação do método de polígonos de Thiessen.

<b>Rodeador</b>						
<b>Período</b>	<b>1548006</b> ETA Taguatinga	<b>1548007</b> ETA Brazlândia	<b>1548008</b> Descoberto	<b>1548009</b> Jatobazinho	<b>1548041</b> Radiobrás	<b>1548051</b> Vicente Pires
1971 a 1978	0,21	0,79	-	-	-	-
1979 a 2008	0	0,26	0	0,74	-	-
2009 a 2014	0,21	0,79	0	-	-	-
2015 a 2017	0,20	0,27	0	-	0,53	-
2018 a 2020	0,18	0,27	0	-	0,53	0,02

(-) estação inoperante no período

Tabela 21 - Fator de peso de cada estação pluviométrica na região de influência da bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido/DF, baseada em sua área de influência, na aplicação do método de polígonos de Thiessen.

Capão Comprido						
Período	1548006 ETA Taguatinga	1548007 ETA Brazlândia	1548008 Descoberto	1548009 Jatobazinho	1548041 Radiobrás	1548051 Vicente Pires
1971 a 1978	1,0	0	-	-	-	-
1979 a 2008	0,52	0	0	0,48	-	-
2009 a 2014	1,0	0	0	-	-	-
2015 a 2017	1,0	0	0	-	0	-
2018 a 2020	1,0	0	0	-	0	0

(-) estação inoperante no período

A Figura 31 exibe a precipitação média mensal de cada uma das bacias a partir da interpolação dos dados e utilização de fator peso gerado pelo método de polígonos de Thiessen.

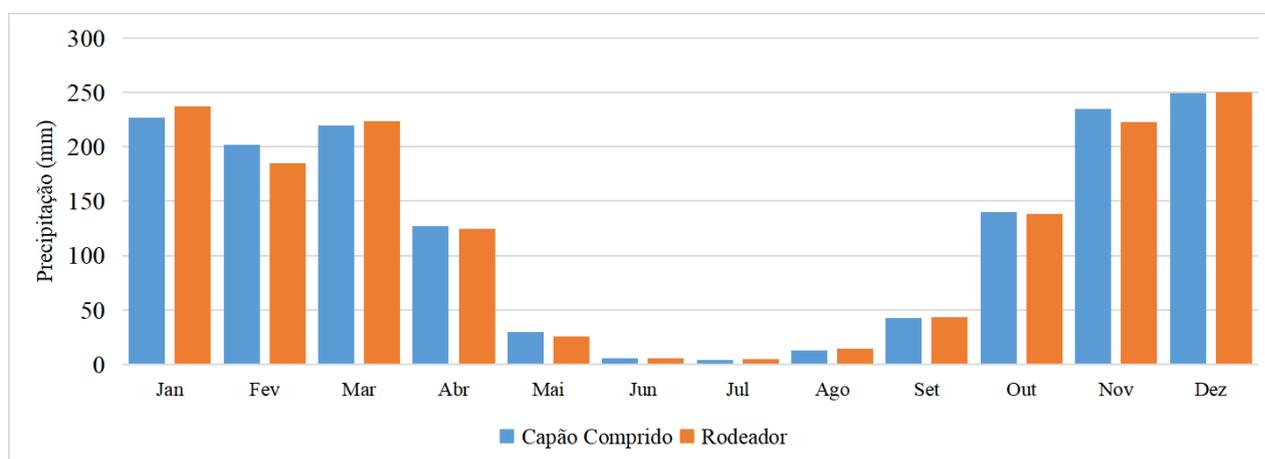


Figura 31 - Precipitação média mensal (mm) entre os anos de 1971 a 2020, calculada pelos polígonos de Thiessen a partir dos dados provenientes de Hidroweb/ANA e Rede Caesb.

As figuras 32 e 33 mostram os valores da precipitação anual entre os anos 1971 a 2020 em cada uma das bacias estudadas.

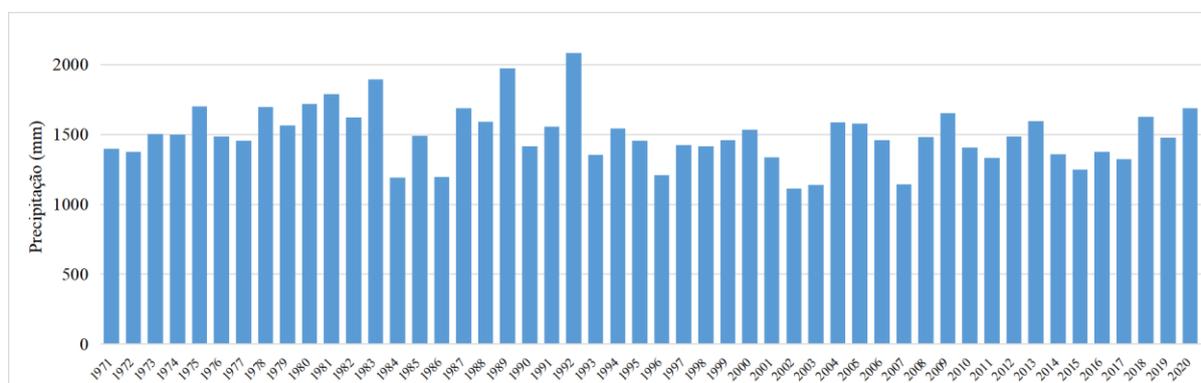


Figura 32 - Precipitação anual da Bacia do Capão Comprido (mm), calculada pelos polígonos de Thiessen (Hidroweb/ANA e Rede Caesb).

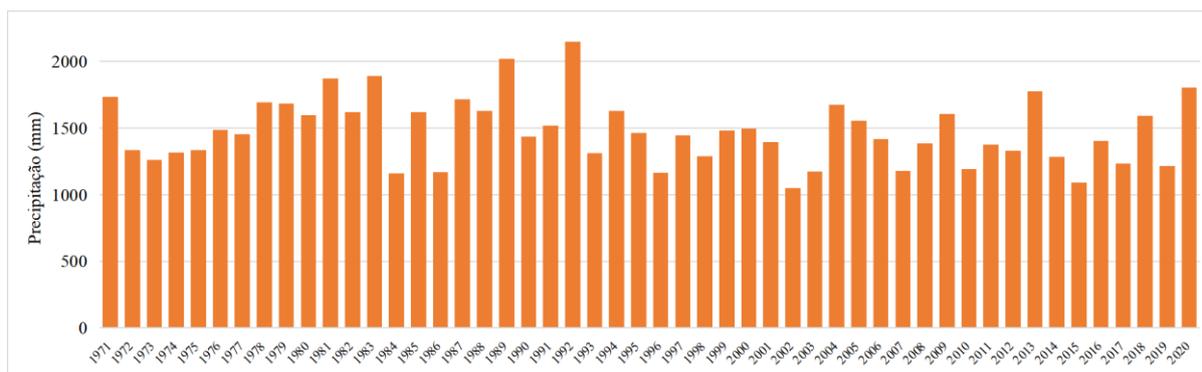


Figura 33 - Precipitação anual da Bacia do Rodeador (mm), calculada pelos polígonos de Thiessen (Hidroweb/ANA e Rede Caesb).

O comportamento de ambas bacias se mostrou bastante homogêneo, não se destacando grandes variações entre elas e nem picos elevados na precipitação média mensal de suas séries históricas. A precipitação anual acumulada permaneceu entre os valores médios para região e não foram notadas diferenças consideráveis entre as bacias, os valores de precipitação média anual na bacia do Capão Comprido foi de 1493 mm e na bacia do Rodeador de 1473 mm.

### 5.1.2 Temperatura e Umidade

Dentre as variáveis climatológicas que impactam diretamente no comportamento hidrológico, as informações sobre temperatura e umidade relativa do ar são fortemente relevantes. A Figura 34 apresenta gráfico com as temperaturas máximas, médias e mínimas mensais registradas ao longo da série histórica proveniente da estação climatológica de Brasília, operada pelo INMET e que conta com 59 anos de dados (1961 a 2020).

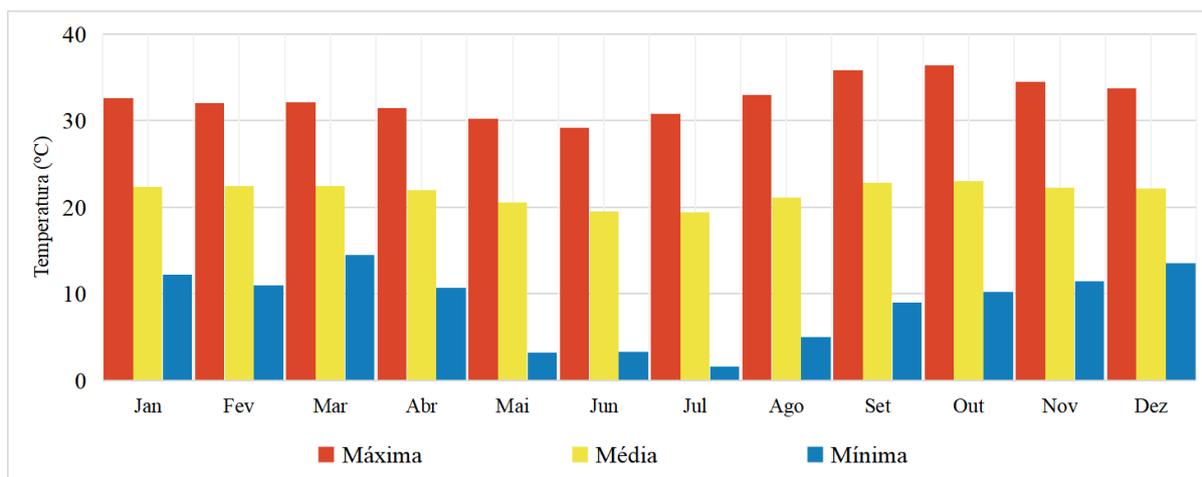


Figura 34 - Temperaturas máximas, médias e mínimas mensais (1961-2020) (BDMEP/INMET).

A temperatura média mensal flutua entre 19,4°C a 23°C, já quanto às temperaturas máximas anuais, essas ocorrem nos meses de setembro e outubro, com valores máximos

registrados de 35,8°C e 36,4°C, respectivamente, ambos no ano de 2015, sendo que o mês de outubro repetiu essa mesma temperatura no ano de 2020. No que se refere às temperaturas mínimas, essas foram registradas nos meses de maio (3,2°C), junho (3,3°C) e julho (1,6°C), ressalta-se que esses são valores atípicos para região e foram notados entre as décadas de 70 e 80, sendo o valor aproximado de 16,5°C a média das mínimas no decorrer da série histórica.

A Figura 35 mostra o comportamento das temperaturas ao longo das quase 6 décadas de registro climatológico.

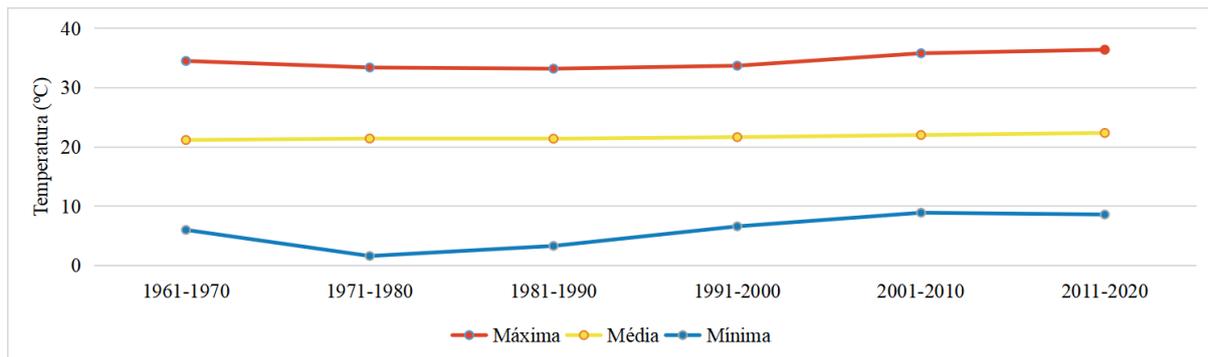


Figura 35 - Médias das temperaturas máximas, médias e mínimas nas últimas cinco décadas (BDMEP/INMET).

Desprende-se do gráfico que a temperatura média não sofreu oscilações consideráveis, contudo as temperaturas máximas e as mínimas apresentaram tendência de aumento de seus valores nas últimas décadas.

A Figura 36 exibe os valores médios mensais referentes à umidade relativa do ar, de acordo com a mesma série histórica.

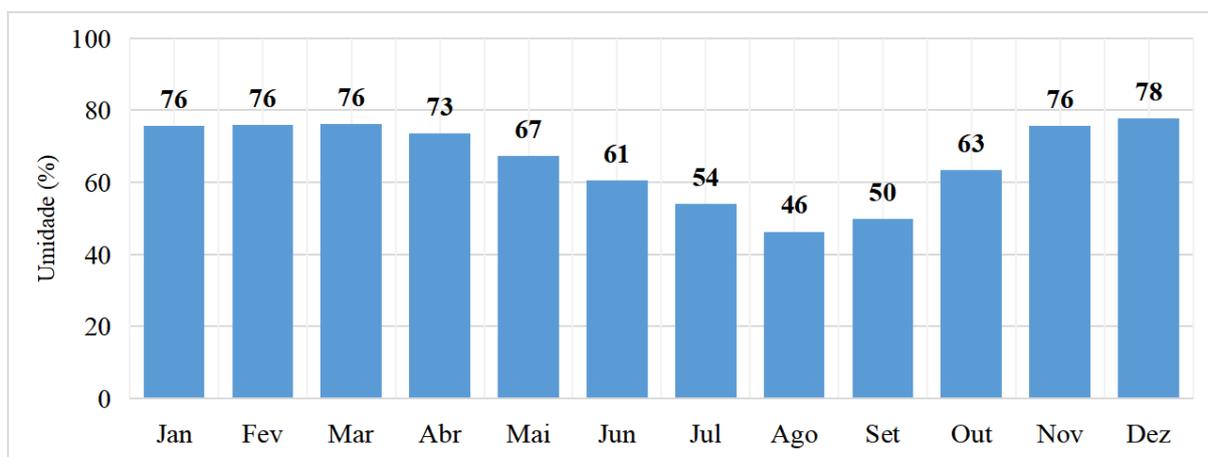


Figura 36 - Umidade relativa do ar média (1961-2020) (BDMEP/INMET).

Os valores médios de umidade acompanham o comportamento da precipitação da região, onde ficam evidentes os períodos seco e chuvoso. Os meses de agosto e setembro são os que

apontaram os menores valores médios, 46 e 50% respectivamente, contendo registros históricos de umidade perto de 15%. Já o mês de dezembro é o mês mais úmido, com 78% de umidade relativa do ar média, seguido de perto pelos meses de janeiro, fevereiro e março, todos com valores médios próximos a 76%.

### 5.1.3 Vazão

A área de estudo conta com nove estações fluviométricas, sendo oito na bacia do Rodeador e seus afluentes e uma na bacia do Capão Comprido. Somente duas estações possuem série histórica considerável, a estação 60435200 - Rodeador DF 435 e 60435300 - Capão Comprido, as quais possuem medições datadas a partir do ano de 1978, as demais tiveram início de operação a partir do ano 2013. Ressalta-se que ambas estações se encontram próximas ao exutório das bacias. A Figura 37 indica a localização dessas em relação à bacia e seus cursos d'água principais.

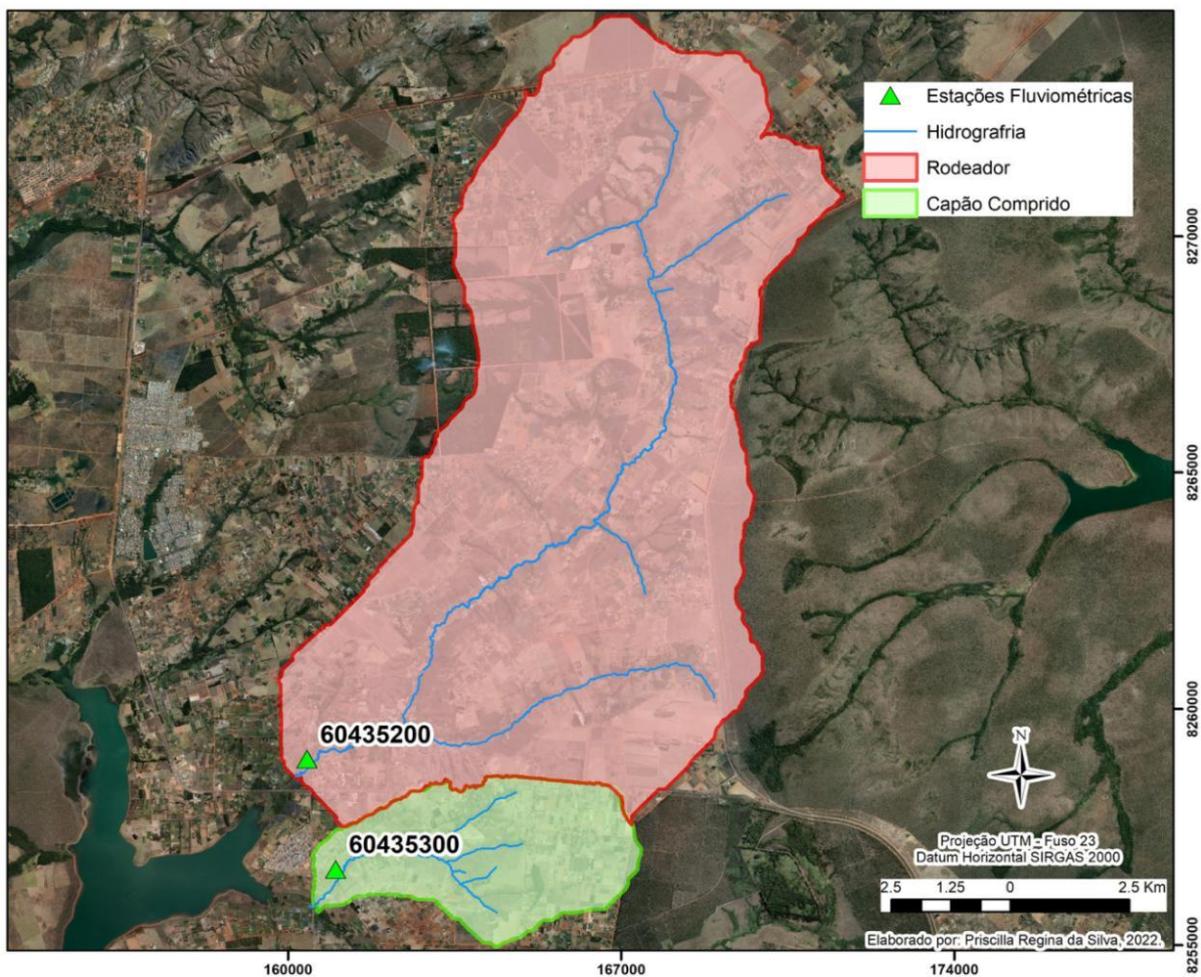


Figura 37 - Estações fluviométricas próximas ao exutório das bacia do Capão Comprido e Rodeador.

As figuras 38 e 39 apresentam as vazões médias mensais do córrego Capão Comprido e do ribeirão Rodeador, respectivamente.

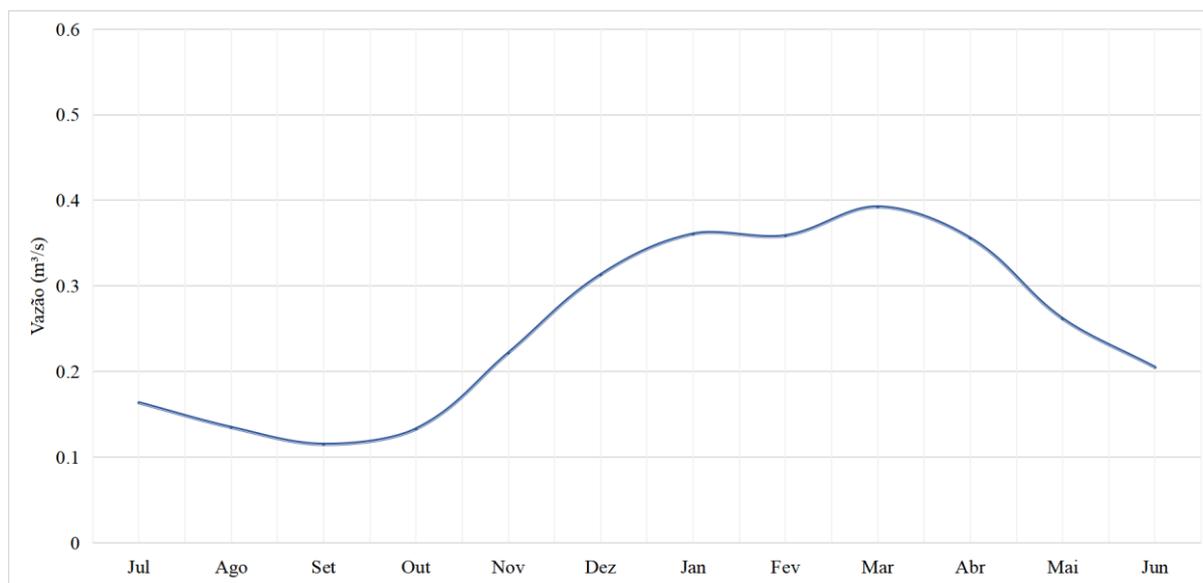


Figura 38 - Vazões médias mensais do córrego Capão Comprido dos anos 1978 a 2020 (Hidroweb/ANA e Rede Caesb).

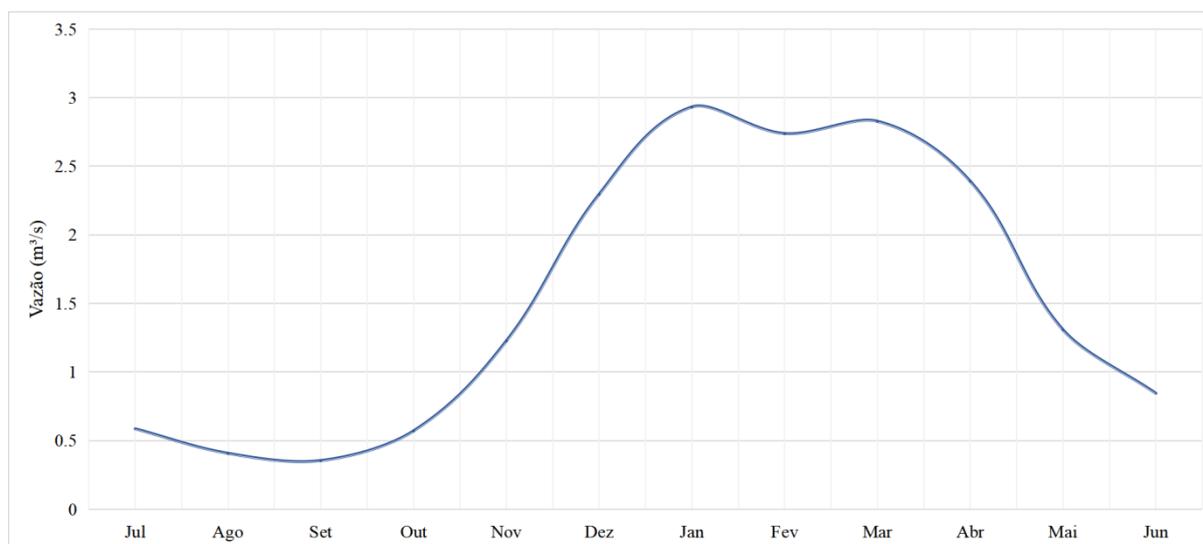


Figura 39 - Vazões médias mensais do ribeirão Rodeador dos anos 1978 a 2020 (Hidroweb/ANA e Rede Caesb).

É possível observar um padrão no comportamento de ambas, onde as vazões mínimas ocorrem entre os meses de julho e outubro, tendo seu mínimo valor no mês de setembro com médias mensais de  $0,11 \text{ m}^3/\text{s}$  no Capão Comprido e  $0,35 \text{ m}^3/\text{s}$  no Rodeador. A elevação das vazões se inicia no mês de outubro, com tendência crescente até o mês de fevereiro, mês em que surge uma leve inclinação na curva, que retorna a um curto acréscimo nos valores de vazão até o mês de março. Os valores máximos ocorrem entre os meses de janeiro e março, sendo que no córrego Capão Comprido a maior média mensal verifica-se no mês de março com vazão

média de  $0,39 \text{ m}^3/\text{s}$ , já quanto ao Rodeador a maior média mensal se dá no mês de janeiro, com valor de  $2,93 \text{ m}^3/\text{s}$ .

A série histórica das vazões pode ser observada nas figuras 40 e 41 que apresentam as vazões mensais entre os anos de 1978 a 2020.

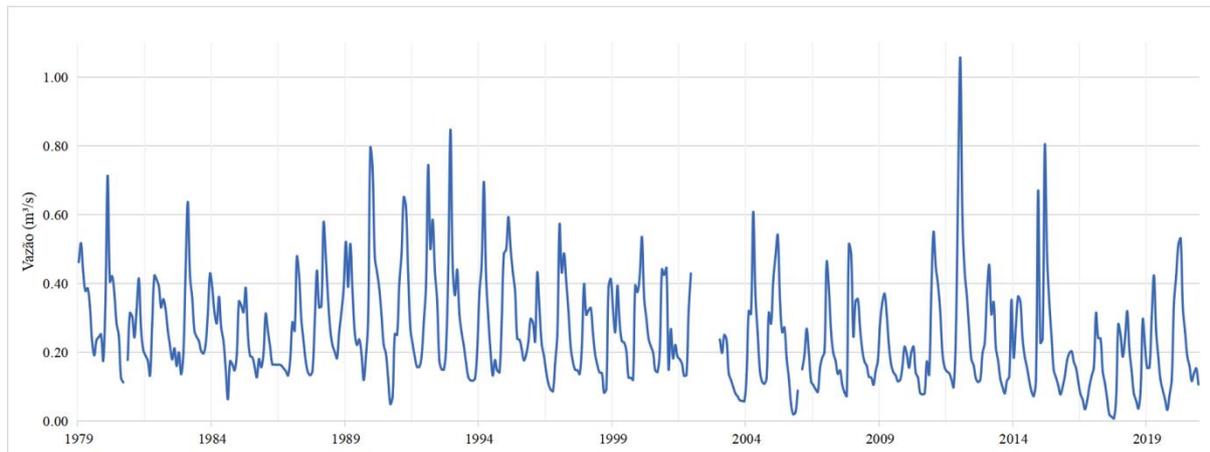


Figura 40 - Vazões mensais córrego Capão Comprido - 1978 a 2020 (Hidroweb/ANA e Rede Caesb).

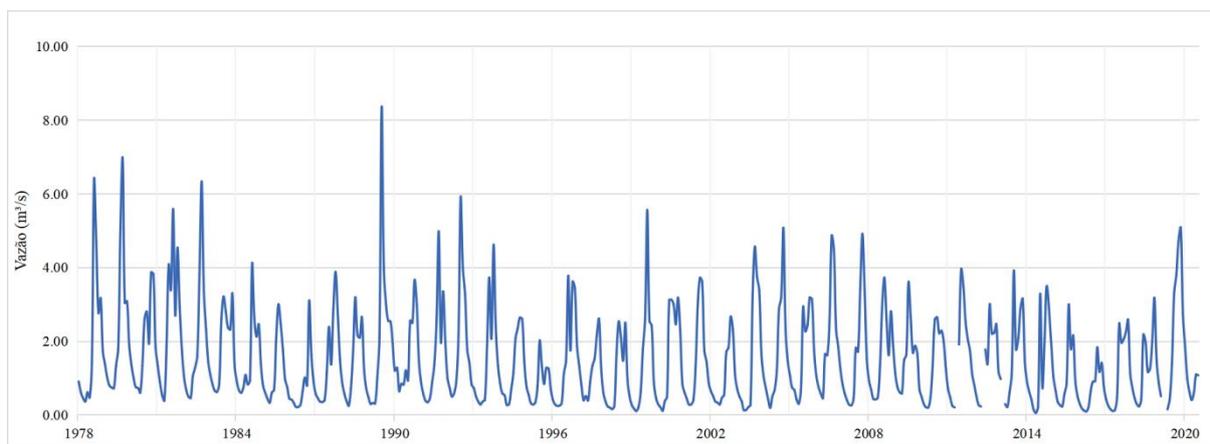


Figura 41 - Vazões mensais ribeirão Rodeador - 1978 a 2020 (Hidroweb/ANA e Rede Caesb).

O comportamento das vazões no decorrer dos anos exibe a tendência de redução nos valores das vazões mínimas e igualmente das máximas. O ribeirão Rodeador teve sua maior média mensal em dezembro de 1989 atingindo um pico de  $8,3 \text{ m}^3/\text{s}$ , o que corresponde em quase 4 vezes a média mensal de dezembro ( $2,29 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e mais de 5 vezes o valor de sua vazão média geral ( $1,54 \text{ m}^3/\text{s}$ ). No que tange às vazões médias do ribeirão, a década de 80 tinha como valor médio anual a vazão de  $1,78 \text{ m}^3/\text{s}$ , decrescendo para  $1,36 \text{ m}^3/\text{s}$  na última década (2010 a 2020), o que resulta em uma redução de quase 25%.

O córrego Capão Comprido apresenta a mesma tendência de redução das vazões médias da última década (0,21 m<sup>3</sup>/s) em comparação às décadas de 80 e 90, em que contava com vazões de 0,29 m<sup>3</sup>/s, uma redução de aproximadamente 30%. No que tange a maior média mensal, essa ocorreu nessa última década, em janeiro de 2002, com valor médio de 1,057 m<sup>3</sup>/s.

As reduções de vazão disponível nos cursos d'água estão potencialmente relacionadas não apenas com as variações associadas ao clima, mas também com ao aumento da captação e utilização dos recursos hídricos nas atividades praticadas nas bacias hidrográficas, dentre elas a olericultura e fruticultura irrigada e o abastecimento doméstico dos habitantes da bacia.

### 5.1.4 Qualidade da água

O córrego Capão Comprido e o ribeirão Rodeador são enquadrados como corpos d'água de Classe 2 (CRH, 2014), águas que podem ser destinadas: à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto, à aquicultura e à atividade de pesca, à recreação de contato primário e ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional (CONAMA, 2005).

As estações fluviométricas contam com dados de sedimentos e leituras relacionadas a materiais em suspensão, entretanto tais informações são limitadas a leituras mensais e possui falhas relevantes. A bacia do Capão Comprido conta com leituras que datam entre os meses de setembro de 2013 a novembro de 2020, já a bacia do Rodeador, com dados entre fevereiro de 2013 a julho de 2018.

Os gráficos abaixo apresentam os valores de material em suspensão correlacionados à vazão do curso d'água do mesmo dia, sendo a Figura 42 relativa à bacia do Capão Comprido e a Figura 43 à bacia do Rodeador, respectivamente.

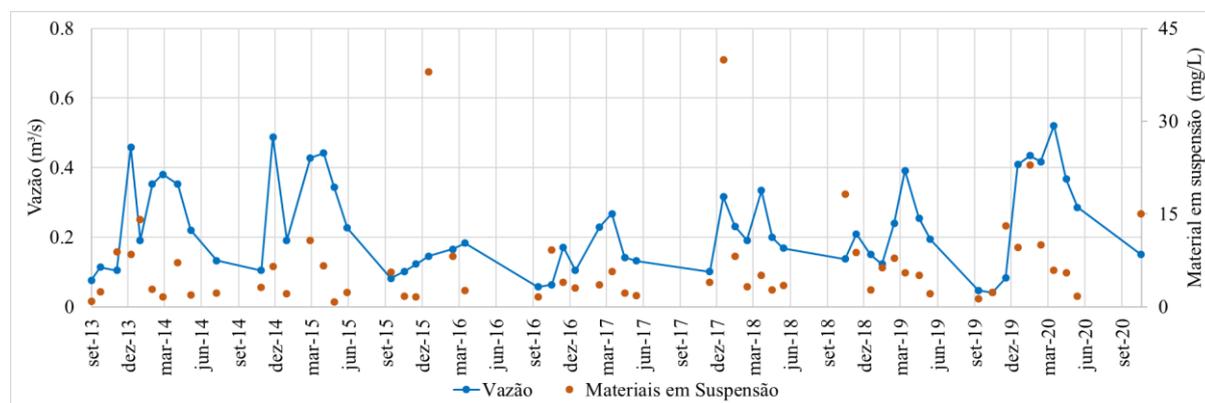


Figura 42 - Gráfico dos dados de material em suspensão e vazão do córrego Capão Comprido (Hidroweb/ANA e Rede Caesb).

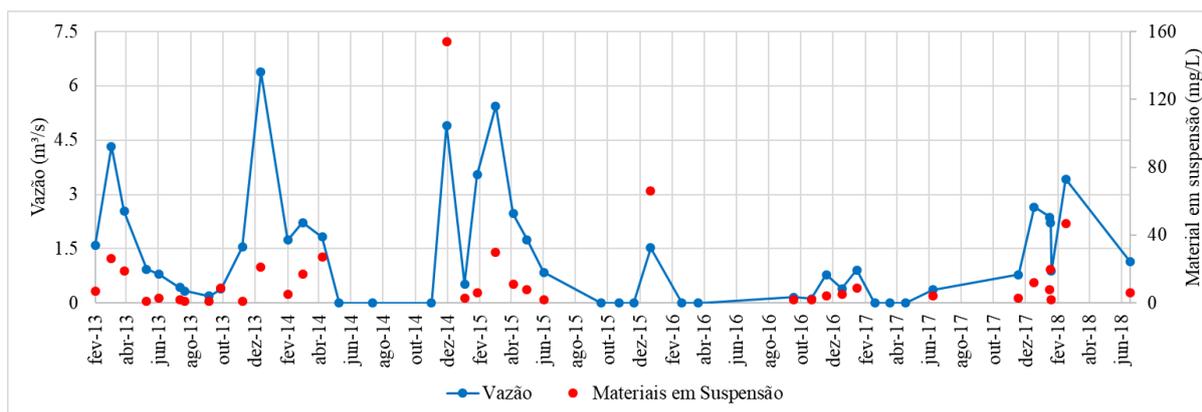


Figura 43 - Gráfico dos dados de material em suspensão e vazão do ribeirão Rodeador (Hidroweb/ANA e Rede Caesb).

Os dois maiores valores de material em suspensão observados na bacia do Capão Comprido aconteceram nos meses de janeiro de 2018, com 39 mg/L e janeiro de 2016, 28 mg/L, ressalta-se que as vazões em ambos períodos, 0,076 m<sup>3</sup>/s e 0,114 m<sup>3</sup>/s, estavam bem abaixo da média do mês, 0,366 m<sup>3</sup>/s.

A bacia do Rodeador apresenta o valor mais elevado de materiais em suspensão no dia 17 de dezembro de 2014, com 154 mg/L e vazão de 4,9 m<sup>3</sup>/s, que corresponde a mais que o dobro da vazão média mensal, 2,29 m<sup>3</sup>/s, essa alta pode ser correlacionada também a alta das chuvas no mesmo período, que no mesmo dia contabilizou 38mm.

No que tange aos dados de monitoramento de nutrientes, a Escola Corporativa da Caesb repassou unicamente informações relativas à bacia do Capão Comprido relacionadas a Nitrogênio Total (Figura 44) e Fósforo Total (Figura 45), divididos em dois períodos, o primeiro que vai do ano de 1976 a 1992 e o segundo de 2013 a 2020.

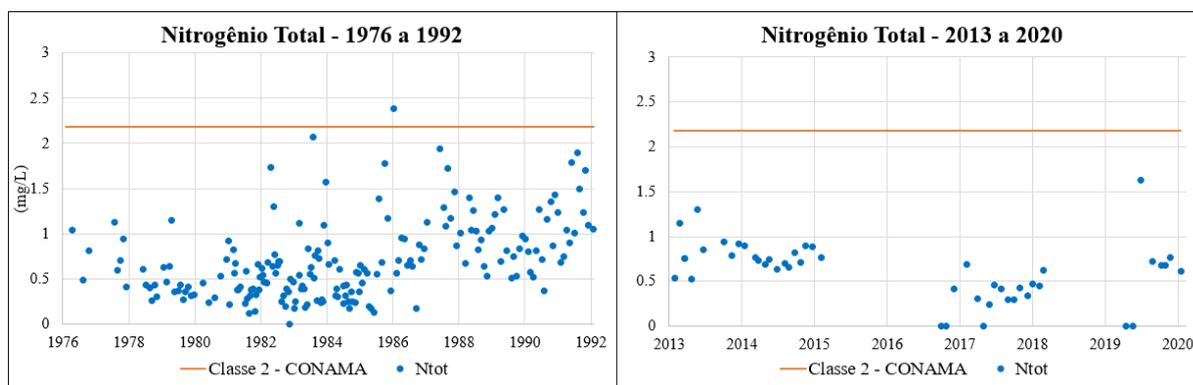


Figura 44 - Concentrações de nitrogênio total no córrego Capão Comprido (Rede Caesb).

A Resolução CONAMA 357 de 2005 estabelece que cursos d'água de classe 2 com o nitrogênio como fator limitante para a eutrofização, o parâmetro nitrogênio total não deve ultrapassar 2,18 mg/L em ambientes lóticos. A análise dos dados de monitoramento revelou

que apenas a amostra de outubro de 1986 ultrapassou o limite determinado na legislação. Observa-se valores mais acentuados no período de 1976 a 1992 do que no período de 2013 a 2020, contudo, segundo informações do laboratório da Caesb, essa acentuação pode ser justificada pela alteração da metodologia de análise no último período.

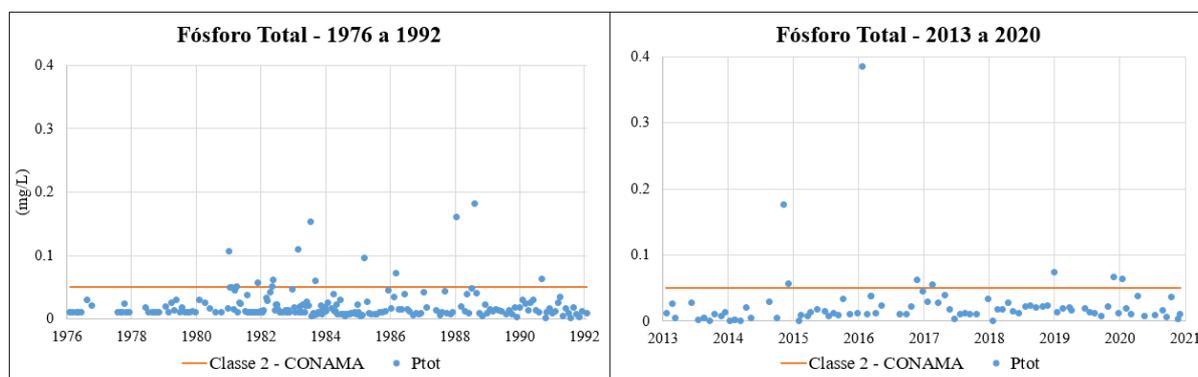


Figura 45 - Concentrações de fósforo total no córrego Capão Comprido (Rede Caesb).

No que se refere às concentrações de fósforo total, a legislação estabelece o valor máximo para cursos d'água de classe 2 de 0,1 mg/L em ambientes lóticos em geral e 0,05 mg/L em tributários diretos de ambiente lêntico. Considerando que o córrego Capão Comprido deságua no Reservatório do Descoberto, analisou-se os dados no limite de 0,05 mg/L. Assim, as concentrações de fósforo total ficaram acima do limite estabelecido em 21 dias (7%), destacando-se o maior valor em 20 de janeiro de 2016, com 0,39 mg/L.

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS USOS DO SOLO E DA ÁGUA

### 5.2.1 Captação e uso dos recursos hídricos

As outorgas de uso de recursos hídricos emitidas pela Adasa dividem-se por tipo, classe de captação e finalidade. No que tange à classe de captação, essa fragmenta-se em dois segmentos: captações subterrâneas (l/h) e captações superficiais (l/s). As captações subterrâneas são subdivididas por sua estrutura em poços manuais e poços tubulares e são realizadas por meio de estruturas de bombeamento da água. As captações superficiais são realizadas diretamente em nascentes e em cursos d'água, geralmente são efetuadas por meio de bombeamento, contudo também podem ocorrer via gravidade como no caso dos canais de irrigação.

Quanto à finalidade da captação, as outorgas abrangem as finalidades de: abastecimento humano, irrigação, dessedentação de animais, piscicultura, uso industrial, dentre outras. Cada

outorga pode contemplar mais de uma finalidade, sendo uma referente à atividade principal e as demais complementares.

Há ainda a segmentação de outorgas por tipo: (i) registro de uso, para captações consideradas insignificantes (até 1 l/s - superficial; 5.000 l/dia - poços manuais); (ii) outorga de uso, para captações que não se enquadram como insignificantes; (iii) outorga prévia, para captações que ainda serão instaladas, esse tipo de outorga é mais comum na modalidade subterrânea, visando à perfuração de poços.

Conforme comunicado no capítulo atinente à metodologia, a base de dados de outorga teve como fonte a Adasa e as informações contidas contam com as outorgas emitidas até final do ano 2020.

A Figura 46 apresenta as outorgas superficiais e subterrâneas na bacia do Capão Comprido, bem como a localização de dois canais de irrigação principais: Capão Comprido 1 e Capão Comprido 2. Já a Figura 47 apresenta os mesmos elementos para a bacia do Rodeador, com os principais canais de irrigação: Rodeador, Jatobazinho, Cristal e Guariroba.

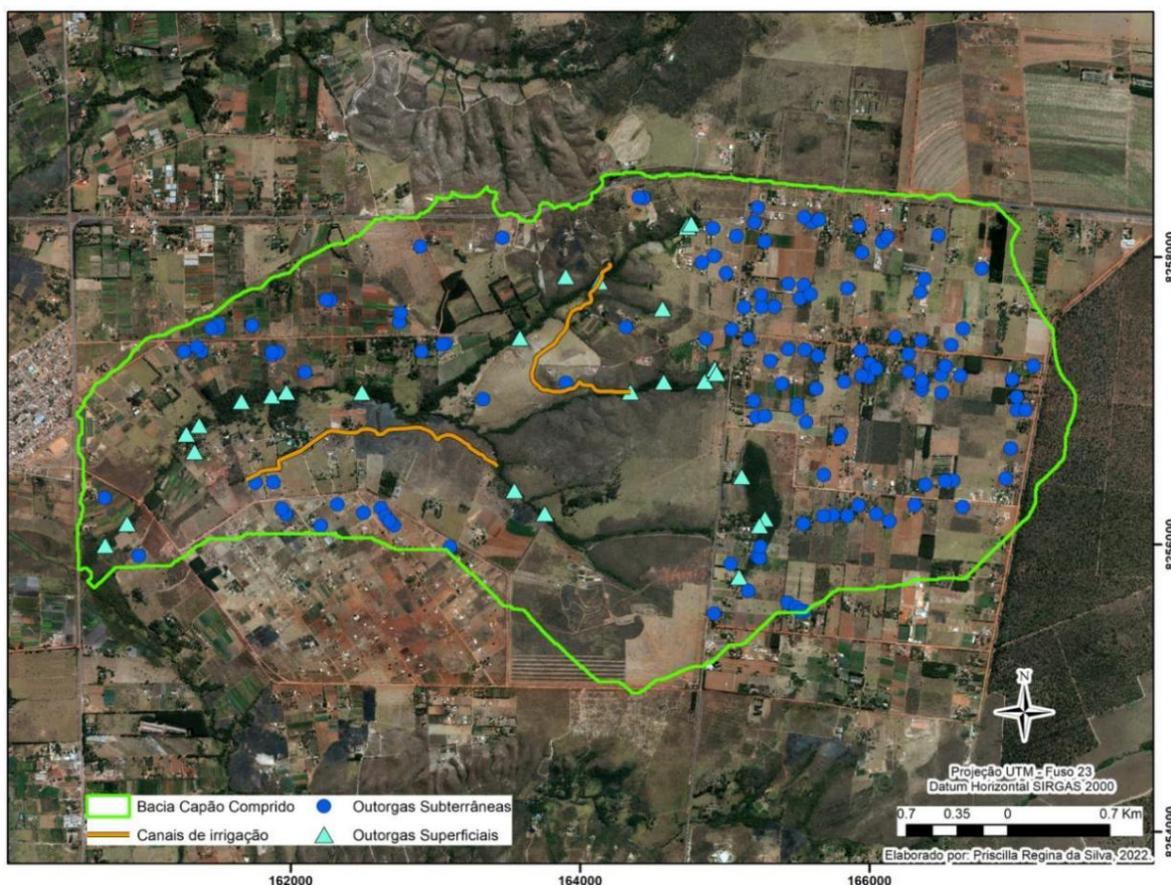


Figura 46 - Outorgas superficiais e subterrâneas e canais de irrigação na bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido - DF (Adasa - maio de 2021)

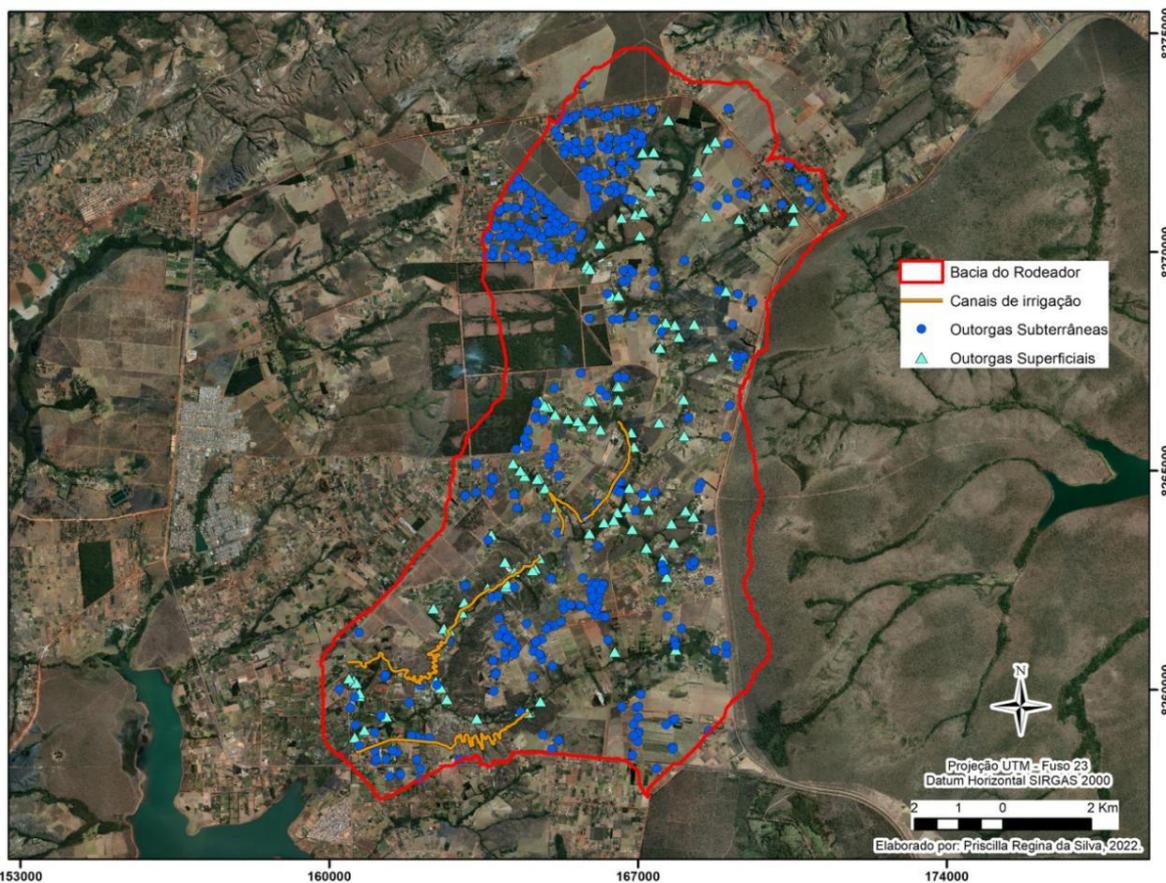


Figura 47 - Outorgas superficiais e subterrâneas e canais de irrigação na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador - DF (Adasa - maio de 2021).

As características de cada bacia, como o número total de outorgas, a segmentação em captações subterrâneas e superficiais, os valores de vazões médias, as finalidades principais, entre outros, encontram-se mais bem especificadas nos subitens seguintes. É fundamental enfatizar que a bacia possui captações de água ainda não regularizadas sem suas respectivas outorgas de direito de uso, principalmente as captações subterrâneas, contudo, não foi possível nesse estudo localizá-las nem as quantificar, deste modo é imperativo considerar que a real vazão captada nas bacias é superior a vazão outorgada levantada junto à Adasa.

#### 5.2.1.1 Outorgas - bacia do Capão Comprido

A bacia do Capão Comprido possui 172 pontos outorgados, onde 145 são captações subterrâneas - que totalizam uma vazão captada de 10.043 m<sup>3</sup>/dia - e 27 são captações superficiais - com vazão captada total de 16.416 m<sup>3</sup>/dia.

No que tange às captações subterrâneas, a Figura 48 traz a localização dos pontos outorgados categorizados segundo sua finalidade principal e vazão outorgada, já a Tabela 22

exibe a quantidade de pontos outorgados, vazão total e vazão média considerando a finalidade principal presente na outorga.

A vazão total de captações subterrâneas outorgadas é de 418.477 l/h. Dentre os pontos outorgados, 58% têm como finalidade principal o abastecimento humano, 30% a irrigação, 9% a criação de animais, 1,5% as agroindústrias de hortaliças processadas e 1,5% outras, que abrange principalmente a atividade de piscicultura. Entretanto, percebe-se que mesmo com quantidade de pontos outorgados superior, o abastecimento humano é o que possui a menor vazão média, isso se explica, pois, essa finalidade é a que compreende a menor demanda hídrica, ou seja, detém os menores valores de vazão máxima outorgada. Destaca-se um ponto outorgado com a finalidade de criação de animais, com vazão de 15.200 l/h, a maior vazão subterrânea outorgada, esse é um empreendimento avícola que conta com mais de 5 galpões de criação de aves, porém a vazão apresenta-se muito elevada, o que pode indicar erro no repasse das informações por parte da Adasa.

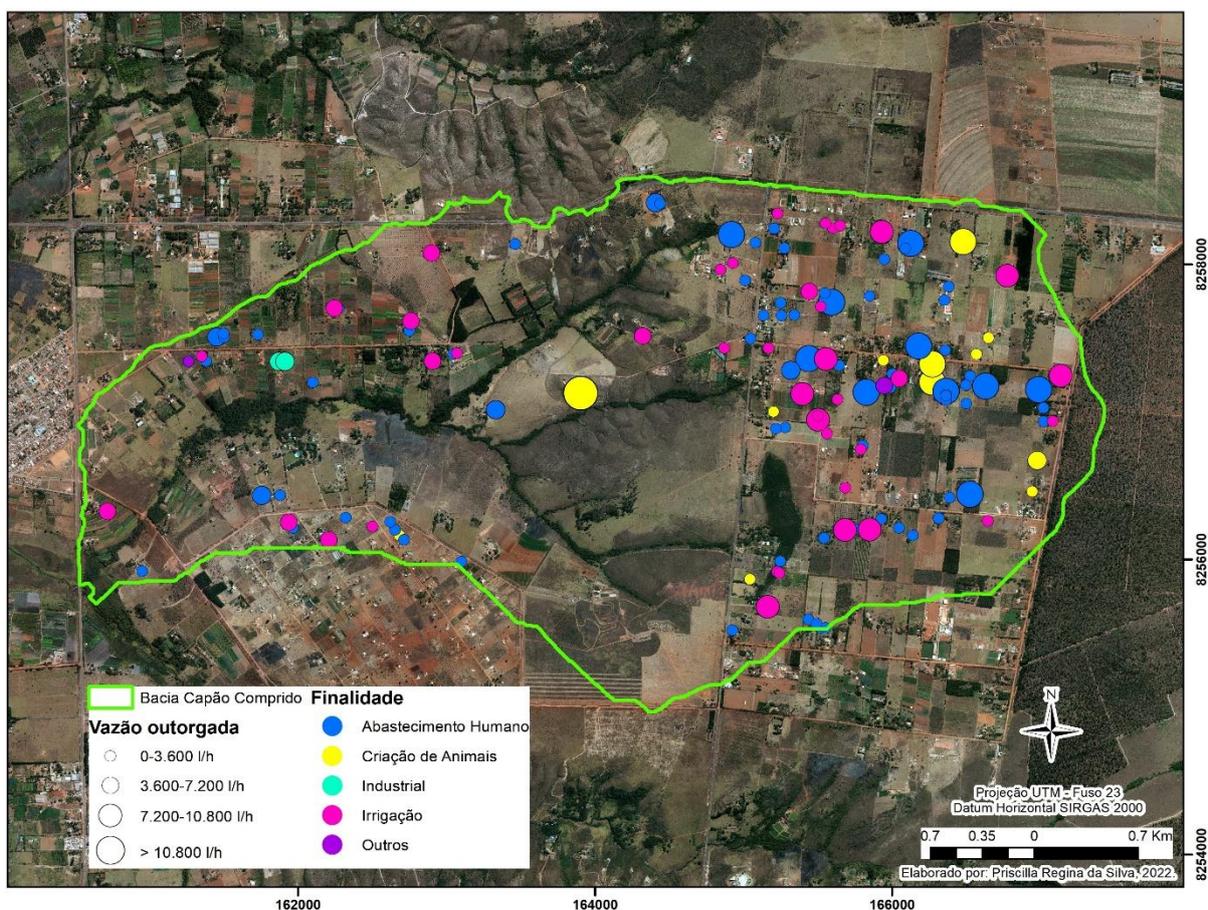


Figura 48 - Outorgas subterrâneas categorizadas por vazão e finalidade principal na bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido - DF (Adasa - maio de 2021).

Tabela 22 - Informações de outorgas subterrâneas na bacia do Capão Comprido considerando sua finalidade principal (Adasa – maio de 2021).

<b>Outorgas Subterrâneas - Capão Comprido</b>			
Finalidade principal	Pontos Outorgados (n°)	Vazão Total outorgada (l/h)	Vazão média por ponto outorgado (l/h)
Abastecimento Humano	84	173.652	2.067
Criação de animais	13	55.797	4.292
Indústria	2	8.048	4.024
Irrigação	44	174.180	3.958
Outras	2	6.800	3.400

Quanto ao tipo de outorga, 47 das captações são registros de uso, ou seja, captações consideradas insignificantes, geralmente realizadas por meio de poços manuais. As demais outorgas são 10 prévias e 88 outorgas de uso de recurso hídrico. Assim, 32% das captações subterrâneas na bacia possuem vazões insignificantes segundo a legislação (< 5.000 l/dia em poços manuais), dentre essas a maioria (77%) possui a finalidade de abastecimento humano. É conhecido que a população da região tem preferência para a utilização de fonte de água subterrânea para consumo humano e utilização doméstica, pois acredita-se que a qualidade dessa é superior em comparação a fontes superficiais, devido a inferior suscetibilidade à contaminação.

Em relação às captações superficiais na bacia, a Figura 49 mostra os pontos outorgados com sua finalidade e categoria de vazão e, de forma a complementar as informações, a Tabela 23 informa as vazões totais e médias outorgadas por tipo de finalidade principal.

Tabela 23 - Informações de outorgas superficiais na bacia do Capão Comprido considerando sua finalidade principal (Adasa – maio 2021).

<b>Outorgas Superficiais - Capão Comprido</b>			
Finalidade principal	Pontos Outorgados (n°)	Vazão Total outorgada (l/s)	Vazão média por ponto outorgado (l/s)
Abastecimento Humano	9	2,95	0,33
Criação de animais	2	1,90	0,95
Indústria	-	-	-
Irrigação	14	165,61	11,83
Outras	2	20	10

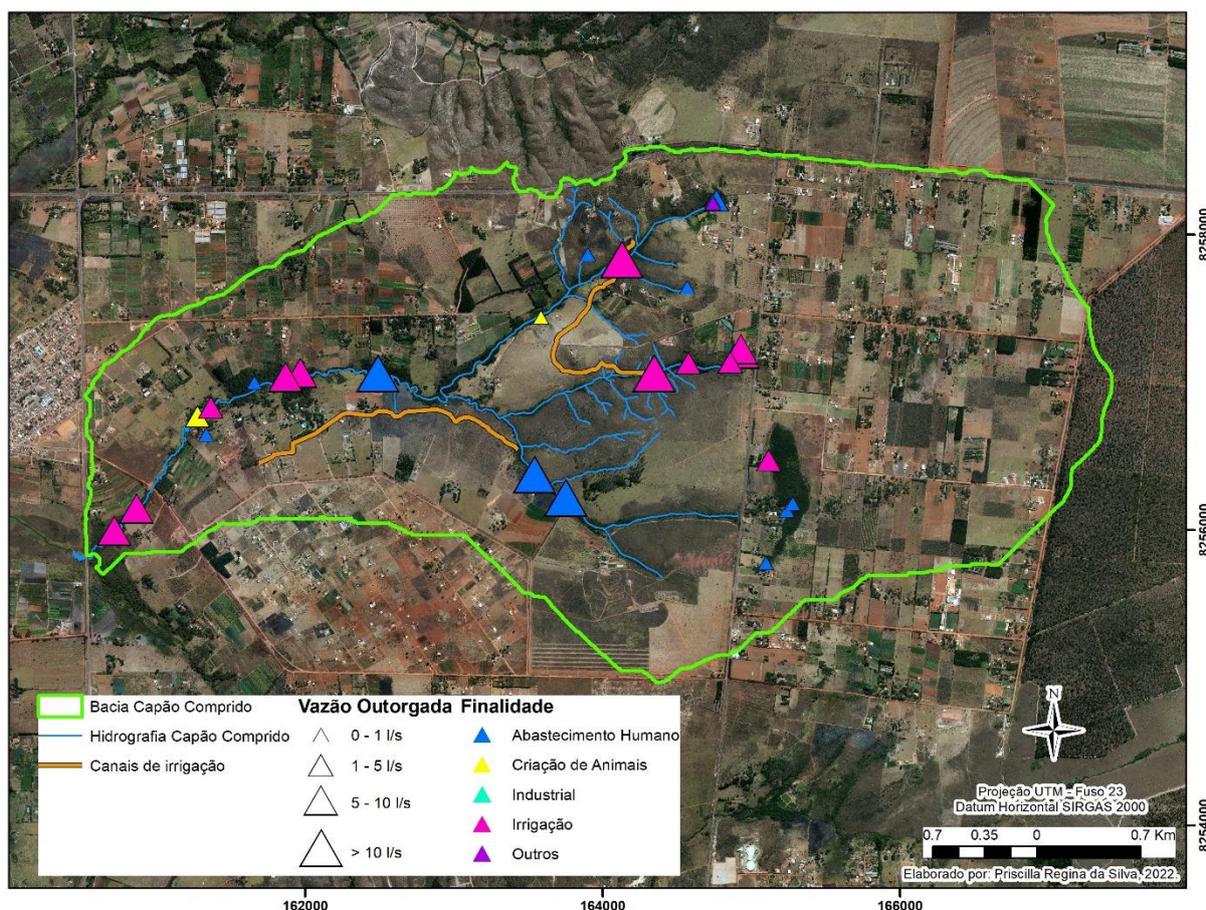


Figura 49 - Outorgas superficiais categorizadas por vazão e finalidade principal na bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido - DF (Adasa – maio de 2021)

As captações superficiais outorgadas na bacia contabilizam uma vazão total de 190,46 l/s. Dentre os pontos outorgados, diferentemente das captações subterrâneas, a maioria das captações tem por finalidade principal a irrigação, seguida pelo abastecimento humano, a criação de animais e outras, como a piscicultura. A maior vazão média por ponto outorgado é igualmente a da irrigação, com valor de 11,83 l/s por ponto outorgado, contudo cabe ressaltar que a bacia possui três pontos de captação de canais de irrigação (Capão Comprido 1 e 2), que abastecem um quantitativo maior de propriedades rurais e possuem vazões captadas que vão de 22 a 34 l/s. Considerando que cada canal abastece cerca de 15 propriedades, a vazão média por ponto modifica-se para 3,76 l/s.

No que se refere às vazões consideradas insignificantes, 10 das 27 outorgas se enquadram como registro de uso, ou seja, captam até 1 l/s, dessas, 7 possuem como finalidade principal o abastecimento humano.

Ressalta-se que, comparando a vazão média total do córrego Capão Comprido ponderada por esse estudo, de 210 l/s, com a vazão máxima total outorgada, 190 l/s, observa-se que 90% da vazão média encontra-se outorgada. Contudo, cabe destacar que no ato de

outorga emitido pela a Adasa a vazão é diferenciada mensalmente, porém nesse estudo só foi utilizada a vazão máxima outorgada, ressalta-se também que a agência possui maior acesso e melhor conhecimento sobre as vazões atuais dos cursos d'água da bacia.

### 5.2.1.2 Outorgas - bacia do Rodeador

A respeito da bacia do Rodeador, há o total de 539 pontos outorgados, sendo 423 deles referente às captações subterrâneas - que contabilizam 27.959 m<sup>3</sup>/dia outorgados - e 116 pontos são captações superficiais - com 92.171 m<sup>3</sup>/dia de vazão máxima outorgada.

A Figura 50 conjuntamente com a Tabela 24 exibem informações relacionadas às outorgas subterrâneas na bacia, como a localização e o montante de pontos outorgados, suas finalidades principais e vazão outorgada.

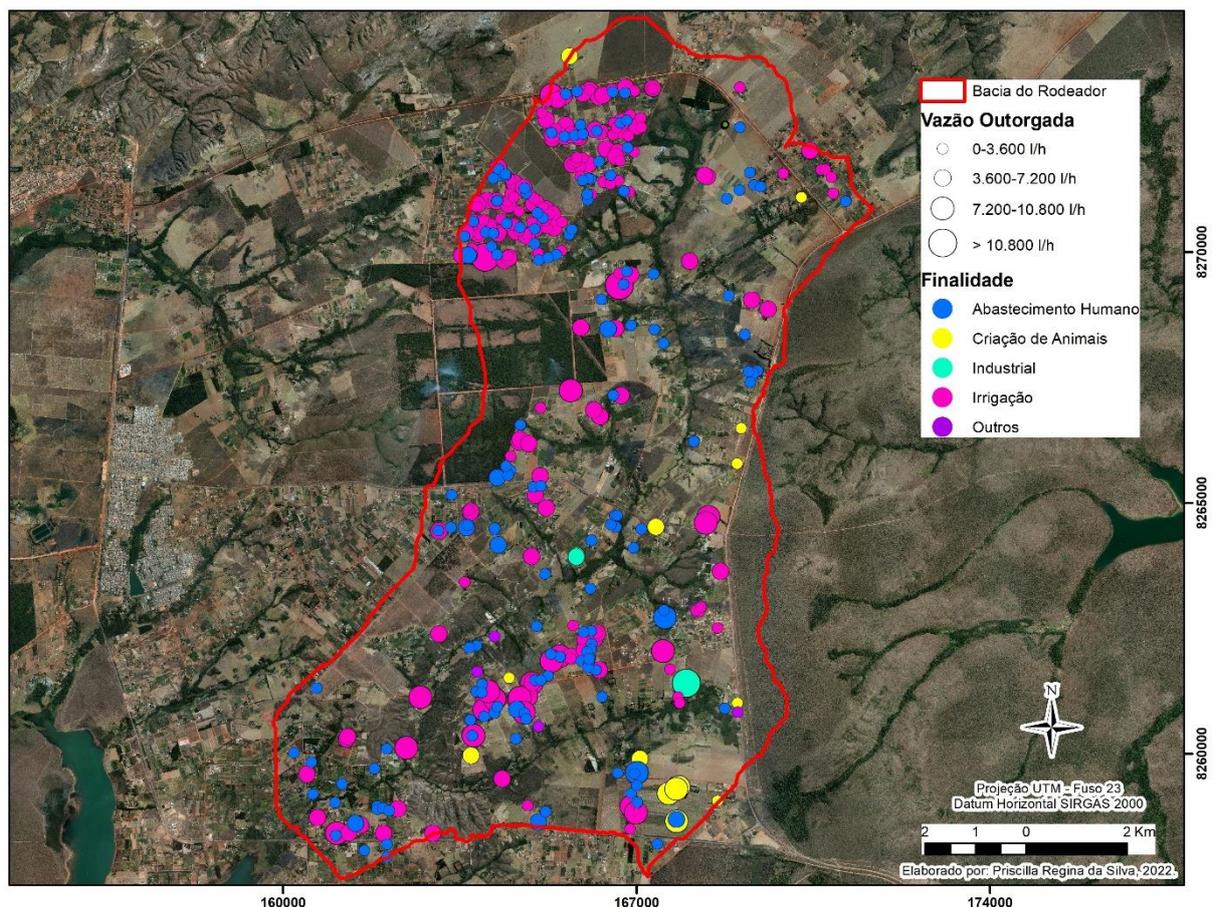


Figura 50 - Outorgas subterrâneas categorizadas por vazão e finalidade principal na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador - DF (Adasa – maio de 2021).

Tabela 24 - Informações de outorgas subterrâneas na bacia do Rodeador considerando sua finalidade principal (Adasa – maio de 2021).

<b>Outorgas Subterrâneas - Rodeador</b>			
Finalidade principal	Pontos Outorgados (n°)	Vazão Total outorgada (l/h)	Vazão média por ponto outorgado (l/h)
Abastecimento Humano	171	210.280	1.230
Criação de animais	18	73.470	4.082
Indústria	3	22.550	7.517
Irrigação	225	834.863	3.710
Outras	6	23.815	3.969

As captações subterrâneas outorgadas na bacia correspondem a uma vazão total de 1.164.978 l/h. A finalidade que possui o maior somatório de vazão captada é a de irrigação, que conta com 71% do total da vazão outorgada na bacia, tendo como vazão média 3.710 l/h em seus 225 pontos. A segunda maior utilização é referente à finalidade de abastecimento humano, com 18% da vazão total e com 171 pontos outorgados, contudo, da mesma maneira que na bacia do Capão Comprido, essa finalidade é a que possui menor vazão média por ponto outorgado. Destaca-se na bacia o uso industrial que conta com apenas 3 pontos outorgados, porém possui a maior média de vazão por ponto captado, 7.517 l/h, isso é devido a existência de uma indústria de água mineral na região, a qual sozinha detém outorga de 12.800 l/h, os outros dois empreendimentos são agroindústrias de polpa de fruta com vazão outorgada de aproximadamente 4.500 l/h cada. Assim como no Capão Comprido a finalidade “outros” abarca principalmente a atividade de piscicultura.

Quanto ao tipo de outorga, 97 das captações são classificadas como registro de uso devido a seu uso insignificante, e, do mesmo modo que a bacia do Capão Comprido, sua grande maioria (85%) compreende a finalidade de abastecimento humano.

No que se refere às captações superficiais, as informações contidas na Figura 51 e na Tabela 25 apresentam os pontos outorgados, sua quantificação, finalidade principal, sua vazão média e também a vazão total outorgada na bacia.

Tabela 25 - Informações de outorgas superficiais na bacia do Rodeador considerando sua finalidade principal (Adasa – maio de 2021).

Outorgas Superficiais - Rodeador			
Finalidade principal	Pontos Outorgados (n°)	Vazão Total outorgada (l/s)	Vazão média por ponto outorgado (l/s)
Abastecimento Humano	25	30,65	1,23
Criação de animais	9	10,89	1,21
Indústria	2	5,84	2,92
Irrigação	67	1.014,76	15,15
Outras	13	4,66	0,36

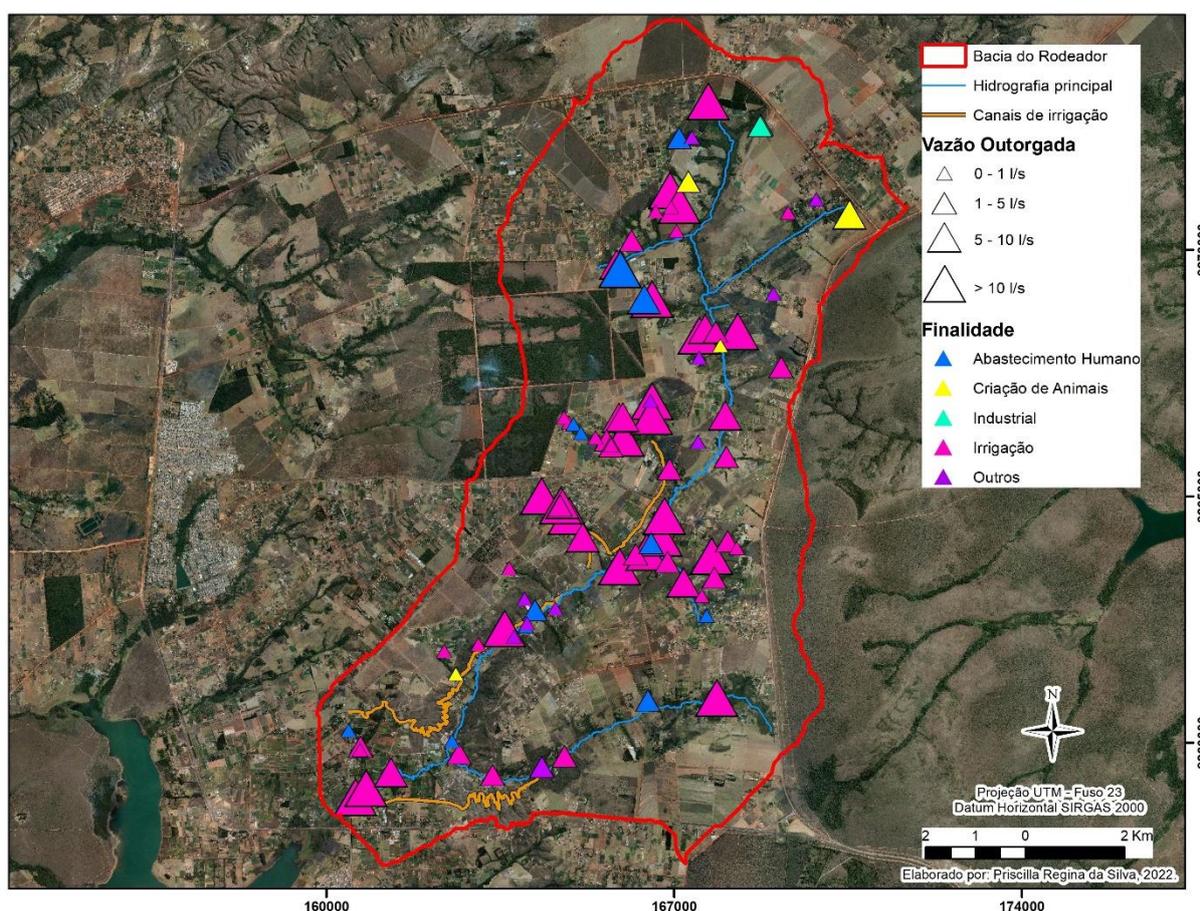


Figura 51 - Outorgas superficiais categorizadas por vazão e finalidade principal na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador - DF (Adasa – maio de 2021)

A vazão superficial total outorgada contabiliza 1.066,79 l/s. A finalidade que possui maior número de pontos outorgados e igualmente a maior vazão total é a irrigação que conta com 67 captações que acumulam uma vazão de 1.041,76 l/s, mais de 95% do total outorgado

na bacia. A irrigação na bacia do Rodeador possui uma vazão média maior que a bacia do Capão Comprido, de aproximadamente 3,3 l/s, isso pode ser justificado devido a bacia do Rodeador possuir propriedades rurais de extensões superiores às presentes no território do Capão Comprido e também devido a presença de canais de irrigação mais significativos. A bacia abrange 4 canais de irrigação: Cristal, Guariroba, Jatobazinho e Rodeador, sendo esses dois últimos responsáveis pelas maiores captações outorgadas, com 210 l/s e 260 l/s, respectivamente. O canal do Jatobazinho conta com cerca de 50 usuários e o do Rodeador por volta de 100 usuários, considerando esses como pontos outorgados a vazão média altera-se para 3,5 l/s.

De modo geral, as demais finalidades também apresentaram vazões superficiais médias maiores que as da outra bacia, excetuando-se a finalidade “outras”, que apresentou a menor média, ressalta-se que a atividade principal dessa finalidade é igualmente a piscicultura, mas a desigualdade de valores é provavelmente a extensão dos tanques de peixe e sua estrutura.

Quanto às vazões insignificantes presente na classe de registro de uso, 45% das outorgas possuem captação inferior ao 1 l/s, e dessas 36% têm a finalidade principal de abastecimento humano e 27% de irrigação.

Comparando-se a vazão média total do ribeirão Rodeador ponderada por esse estudo (1.540 l/s), com a vazão máxima total outorgada (1.067 l/s), observa-se que 70% da vazão média encontra-se outorgada, percentual menor do que o observado na bacia do Capão Comprido.

## **5.2.2 Cenários de uso do solo**

Conforme visto no subtópico precedente, a região apresenta características essencialmente rurais. Observa-se a dinamicidade da produção agrícola mesmo em um curto período de tempo, a qual é capaz de impactar no comportamento hidrológico do território. A composição de cenários de uso de solo ao longo dos anos contribui para a compreensão de suas repercussões no ciclo hidrológico, principalmente quanto à disponibilidade de água.

### **5.2.2.1 Uso do solo - bacia do Capão Comprido**

Os mapas de uso do solo alusivos a cada cenário foram elaborados via vetorização manual em diferentes escalas, a depender da qualidade de cada aerofotografia ou imagem de satélite. A Tabela 26 exhibe a evolução da ocupação territorial nos últimos 60 anos.

Tabela 26 - Área e porcentagem de cada cenário de uso do solo na bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido (DF).

Uso do solo		1964		1980		2009		2019	
		Área	%	Área	%	Área	%	Área	%
1	Mata de Galeria	65,99	3,95	69,46	4,16	53,25	3,19	67,61	4,05
2	Cerrado (Savana)	1124,04	67,30	771,63	46,20	50,96	3,05	39,78	2,38
3	Cerrado (Campo)	355,71	21,30	179,59	10,75	372,48	22,30	360,95	21,61
4	Grandes Culturas	114,70	6,87	363,15	21,74	157,06	9,40	155,77	9,33
5	Fruticultura	-	-	21,99	1,32	87,46	5,24	96,25	5,76
6	Olericultura	-	-	145,16	8,69	448,45	26,85	290,39	17,38
7	Pastagem	-	-	23,10	1,38	278,37	16,67	329,52	19,74
8	Silvicultura	-	-	64,67	3,87	46,03	2,76	100,79	6,04
9	Água	-	-	0,62	0,04	5,57	0,33	8,00	0,48
10	Estrada não pavimentada	9,19	0,55	19,87	1,19	14,63	0,88	18,74	1,12
11	Estrada Pavimentada	-	-	2,10	0,13	8,14	0,49	8,72	0,52
12	Benfeitorias-Agrovila	0,45	0,03	8,74	0,53	139,64	8,36	186,36	11,16
13	Solo exposto	-	-	-	-	8,04	0,48	7,20	0,43

Área - em hectare (ha) / % - porcentagem total do uso na bacia

As figuras 52 a 55 ilustram de maneira mais categórica o uso e ocupação do solo para cada um dos cenários na bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido. Conjuntamente, apresenta-se uma breve interpretação e explanação das mudanças observadas entre os períodos, correlacionadas com informações averiguadas quanto ao uso do solo à época analisada.

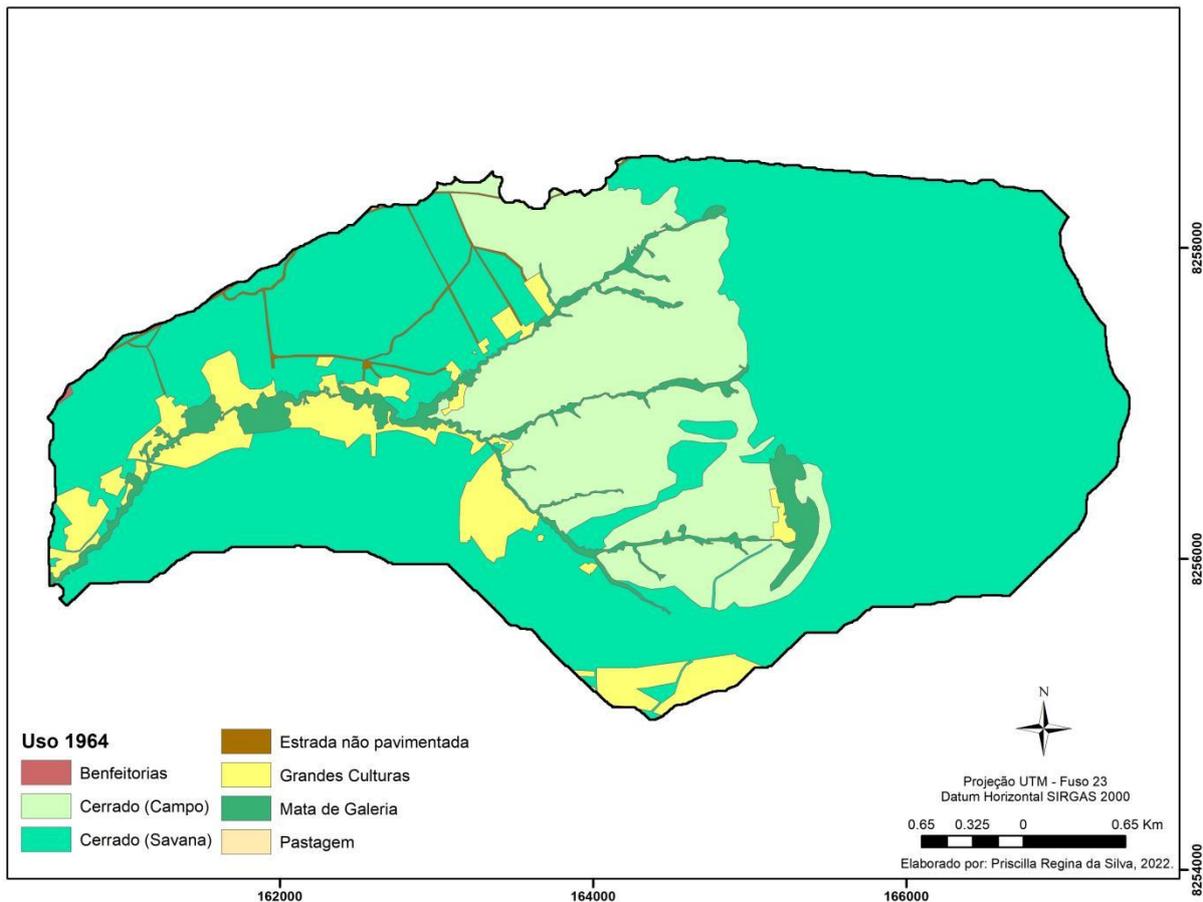


Figura 52 - Uso do solo ano de 1964 - Bacia Capão Comprido (Imagem base: Fotos aéreas Serviço Geográfico do Exército / GeoPortal).

O uso do solo referente ao ano de 1964 manifesta a alta incidência de áreas de vegetação nativa, decorrendo em mais de 90% de sua área, sendo 67% de cerrado senso restrito (savana) com a presença considerável de árvores e arbustos.

As atividades agrícolas presentes consistiam basicamente no cultivo de grandes culturas, como milho, cultivadas em sequeiro na época chuvosa e encontradas prioritariamente às margens do curso d'água, devido à qualidade do solo e acesso à água. A criação de gado estava presente na área, contudo a formação de áreas de pastagem não era uma prática comum, sendo aproveitada a pastagem natural da própria vegetação do cerrado.

As áreas de benfeitorias não puderam ser observadas com nitidez, identificou-se apenas parcelas iniciais da agrovila do Inkra 08 e também uma reduzida quantidade de estradas.

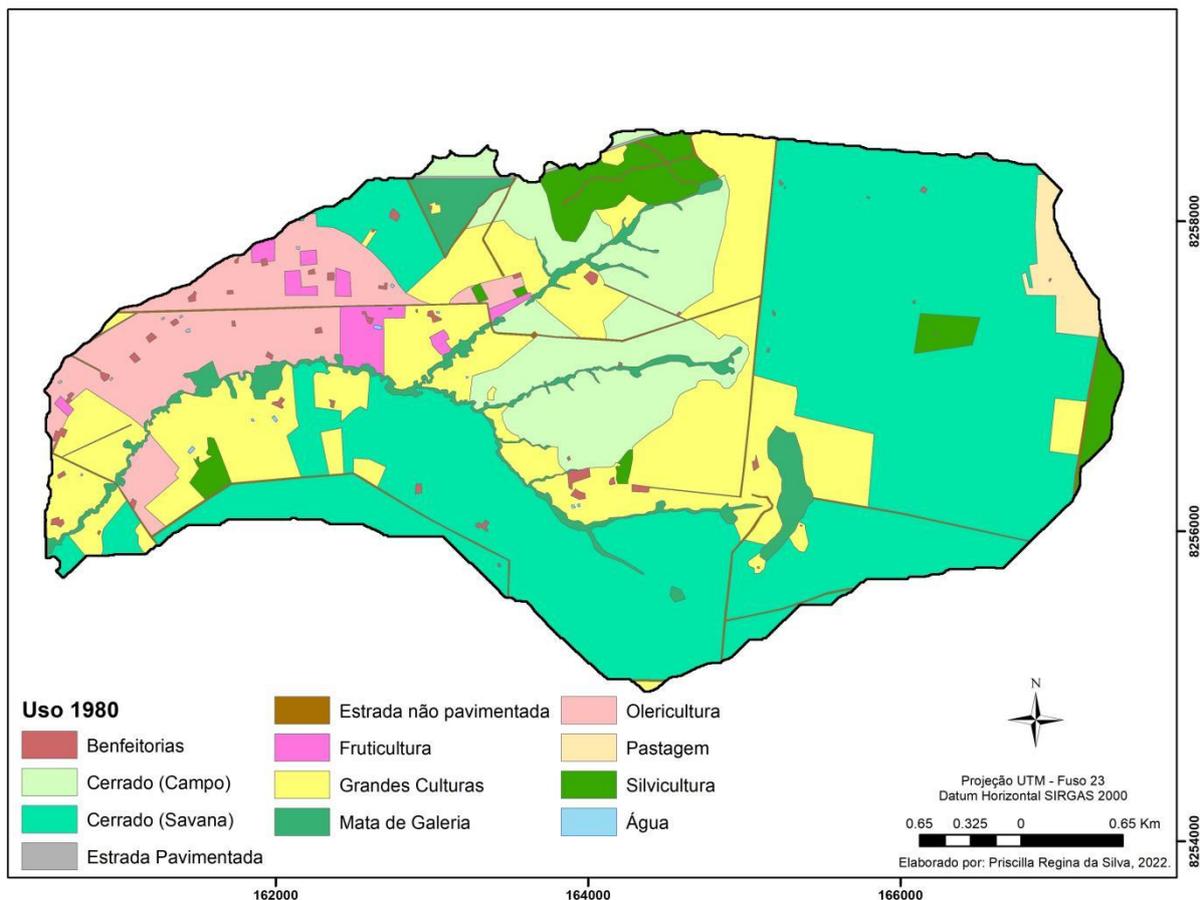


Figura 53 - Uso do solo ano de 1980 - bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido - DF (Imagem base: fotos aéreas Serviço Geográfico do Exército / GeoPortal).

O ano de 1980 desde logo manifesta a consolidação da ocupação agrícola e o parcelamento do solo em propriedades individuais, sobretudo na região próxima ao curso d'água. Identifica-se novas classes de atividade, como a olericultura e a fruticultura, contudo o cultivo em sequeiro de grandes culturas continua mais evidente e em área mais abrangente, observa-se agora áreas de pastagens cultivadas e também manchas de silvicultura, sendo a mais significativa a área da Pro-Flora, que atualmente é a Floresta Nacional de Brasília.

Existe, ainda, parcela relevante de áreas de vegetação nativa, correspondendo a mais da metade da bacia, contudo cerca de 40% a menos do que a observada no cenário anterior. No que tange às benfeitorias, foi possível identificar a localização de quintais e moradias, bem como áreas de reservatórios de água. A extensão de estradas é superior e conta com algumas vias pavimentadas.

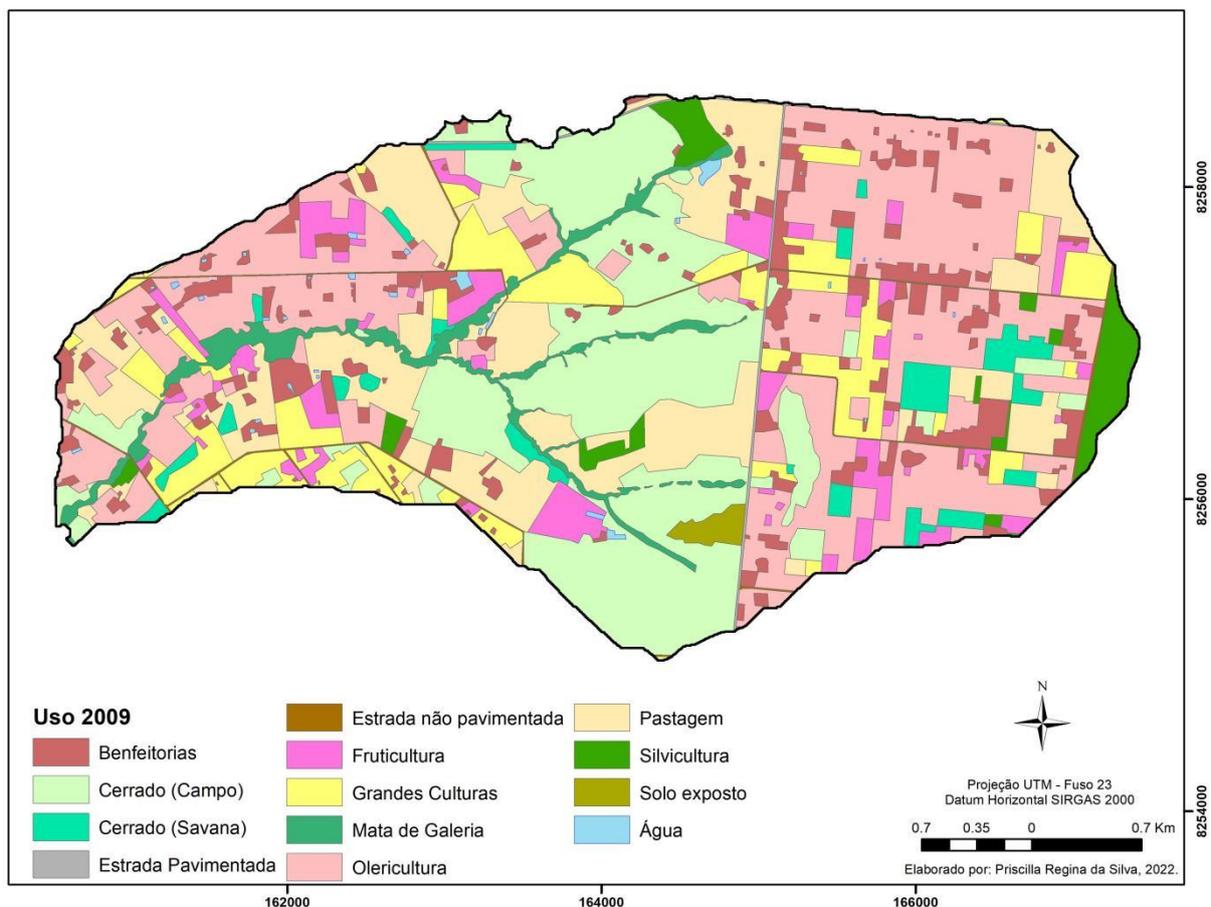


Figura 54 - Uso do solo ano de 2009 - bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido - DF (Imagem base: imagem aérea ortorretificada / Codeplan).

A mudança temporal de quase 30 anos entre o cenário 2 e 3 confirma a utilização agropecuária da região, a qual agora apresenta um maior número de propriedades rurais, porém em menores extensões. A atividade predominante é a olericultura, não obstante é perceptível também a evolução da fruticultura.

Quanto às áreas de vegetação nativa, essas não atingem sequer 30% da extensão da bacia, sendo agora predominante a vegetação campestre, que geralmente é identificada em locais mais declivosos da bacia ou então resultante do raleamento de fitofisionomias de cerrado savana.

A amplitude da feição benfeitoria, referente a moradias e parte de quintais, alargou-se consideravelmente quando somadas, passando de 135 ha e correspondendo a mais de 8% da bacia, o número de reservatórios de água para apoio à produção irrigada também foi ampliado e parte das estradas foram pavimentadas.

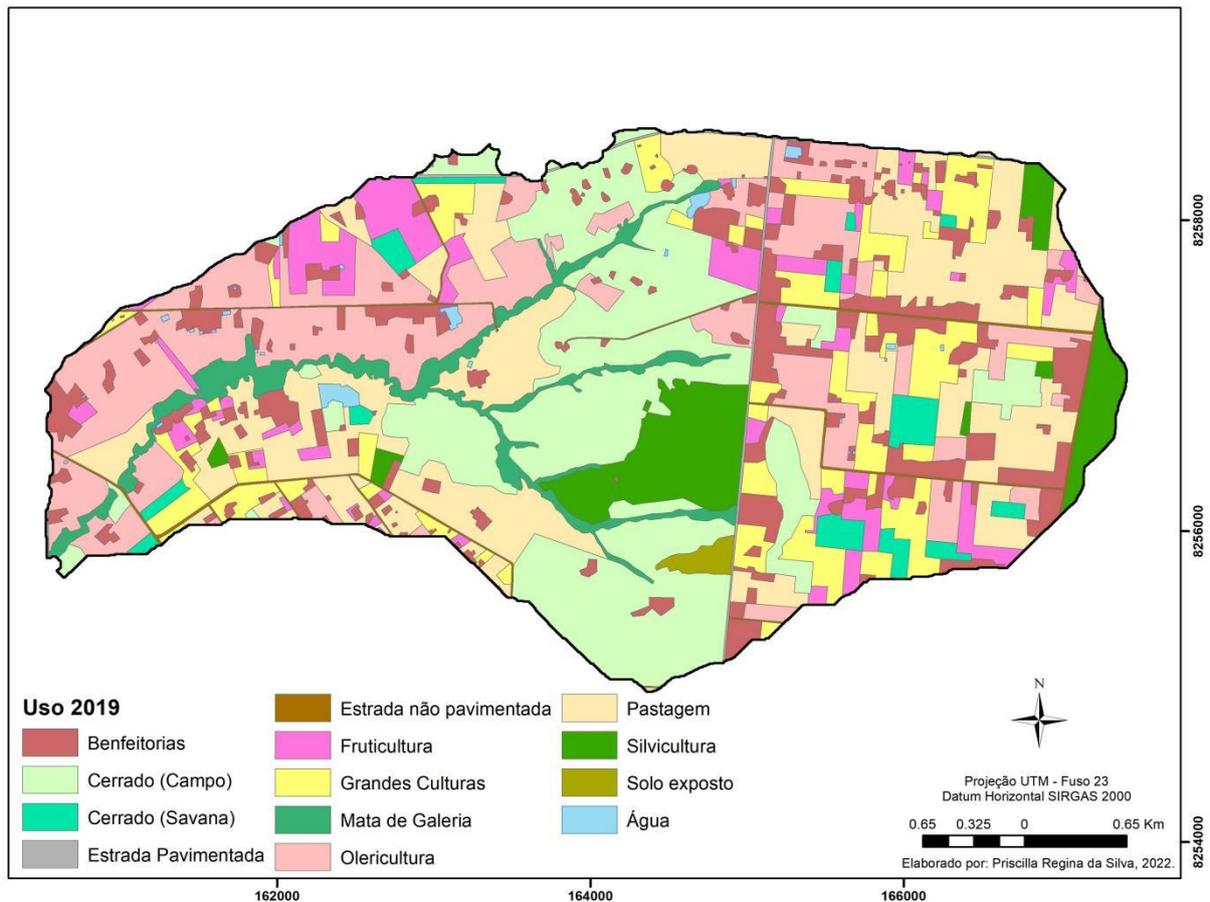


Figura 55 - Uso do solo ano de 2019 - bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido - DF (Imagem base: imagem *World Imagery Wayback* / ESRI e Imagens de satélite CBERS-4A / INPE ).

Quanto ao último e mais recente cenário, observou-se a estabilização da extensão total de vegetação nativa, porém um leve aumento na extensão da mata de galeria, o que pode ser resultado das ações de conservação e recuperação de APPs presente na bacia desde o ano de 2010, dentre elas o Projeto Descoberto Coberto.

Constatou-se um acréscimo de quase 3% da área total da bacia correspondente a classe “benfeitorias”, o que manifesta o crescimento do parcelamento e impermeabilização do solo. Observou-se um irrisório aumento de áreas de fruticultura e larga diminuição de áreas de olericultura, o que pode estar diretamente ligado às ações de controle da “Crise Hídrica” dos três anos anteriores e o receio dos produtores rurais no investimento em cultivos irrigados.

A área de silvicultura presente na bacia dobrou em extensão e a área de pastagem também teve um crescimento considerável.

### 5.2.2.2 Uso do solo - bacia do Rodeador

Assim como a bacia do Capão Comprido, os quatro cenários de uso do solo confirmam a expansão exponencial da atividade antrópica na bacia ao passar dos anos. A Tabela 27 exhibe a evolução da ocupação territorial.

Tabela 27 - Área e porcentagem de cada cenário de uso do solo na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador (DF).

Uso do solo		1964		1980		2009		2019	
		Área	%	Área	%	Área	%	Área	%
1	Mata de Galeria	445,78	3,94	276,16	2,44	543,47	4,81	545,50	4,82
2	Cerrado (Savana)	2884,35	25,51	1484,21	13,13	1027,11	9,08	896,65	7,93
3	Cerrado (Campo)	6383,46	56,45	4327,98	38,27	1839,01	16,26	1805,13	15,96
4	Grandes Culturas	1498,78	13,25	1599,71	14,15	1740,83	15,39	1796,10	15,88
5	Fruticultura	-	-	177,74	1,57	453,00	4,01	514,38	4,55
6	Olericultura	-	-	1138,61	10,07	1646,63	14,56	1784,26	15,79
7	Pastagem	-	-	2092,45	18,50	2511,92	22,21	2602,00	23,01
8	Silvicultura	-	-	31,96	0,28	1072,61	9,49	787,30	6,96
9	Água	-	-	3,56	0,03	40,09	0,35	48,19	0,43
10	Estrada não pavimentada	95,98	0,85	113,43	1,00	101,64	0,90	107,87	0,95
11	Estrada Pavimentada	-	-	-	-	40,76	0,36	46,86	0,41
12	Benfeitorias	-	-	62,54	0,56	282,79	2,50	369,00	3,26
13	Solo exposto	-	-	-	-	8,49	0,08	5,11	0,05

Área - em hectare (ha) / % - porcentagem total do uso na bacia

As figuras 56 a 59 ilustram de maneira mais categórica o uso e ocupação do solo para cada um dos cenários na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador. Conjuntamente, apresenta-se uma breve interpretação e explanação das mudanças observadas entre os períodos, correlacionadas com informações averiguadas quanto ao uso do solo à época analisada.

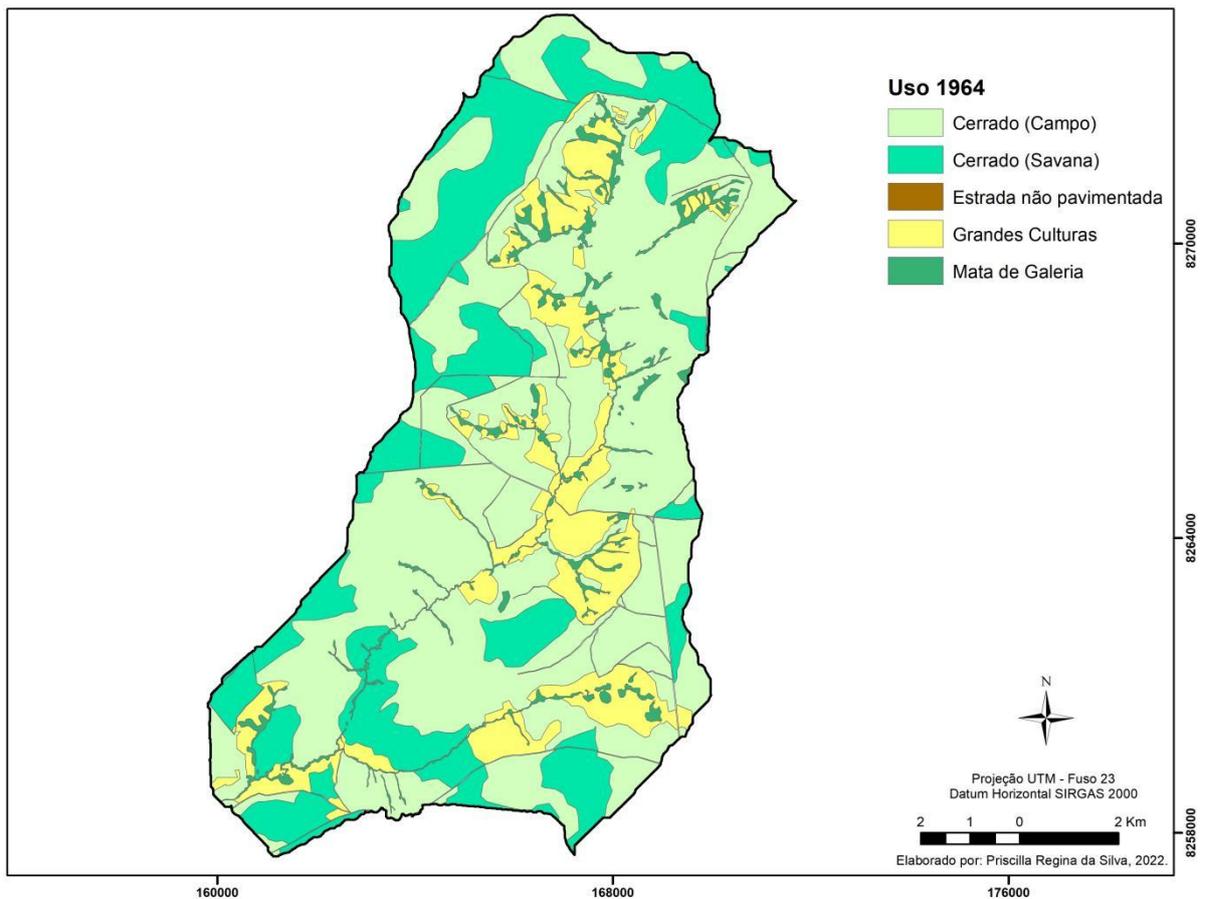


Figura 56 - Uso do solo ano de 1964 - bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador - DF (Imagem base: fotos aéreas Serviço Geográfico do Exército / GeoPortal).

A vegetação nativa é predominante nesse cenário, incidindo em 80% da bacia, sendo dominante o cerrado campestre, como as fitofisionomias de Campo Limpo e Campo Sujo, onde prevalece a vegetação herbácea, a qual possivelmente era utilizada como pastagem natural para o gado.

A atividade agrícola, assim como na bacia do Capão Comprido, baseava-se no cultivo de grandes culturas de sequeiro e localizada às margens dos cursos d'água. Identifica-se uma capilaridade média de estradas, porém as mesmas possuíam percurso assimétrico, em virtude da impossibilidade de passagem em áreas naturais como declives e áreas de brejos e vereda.

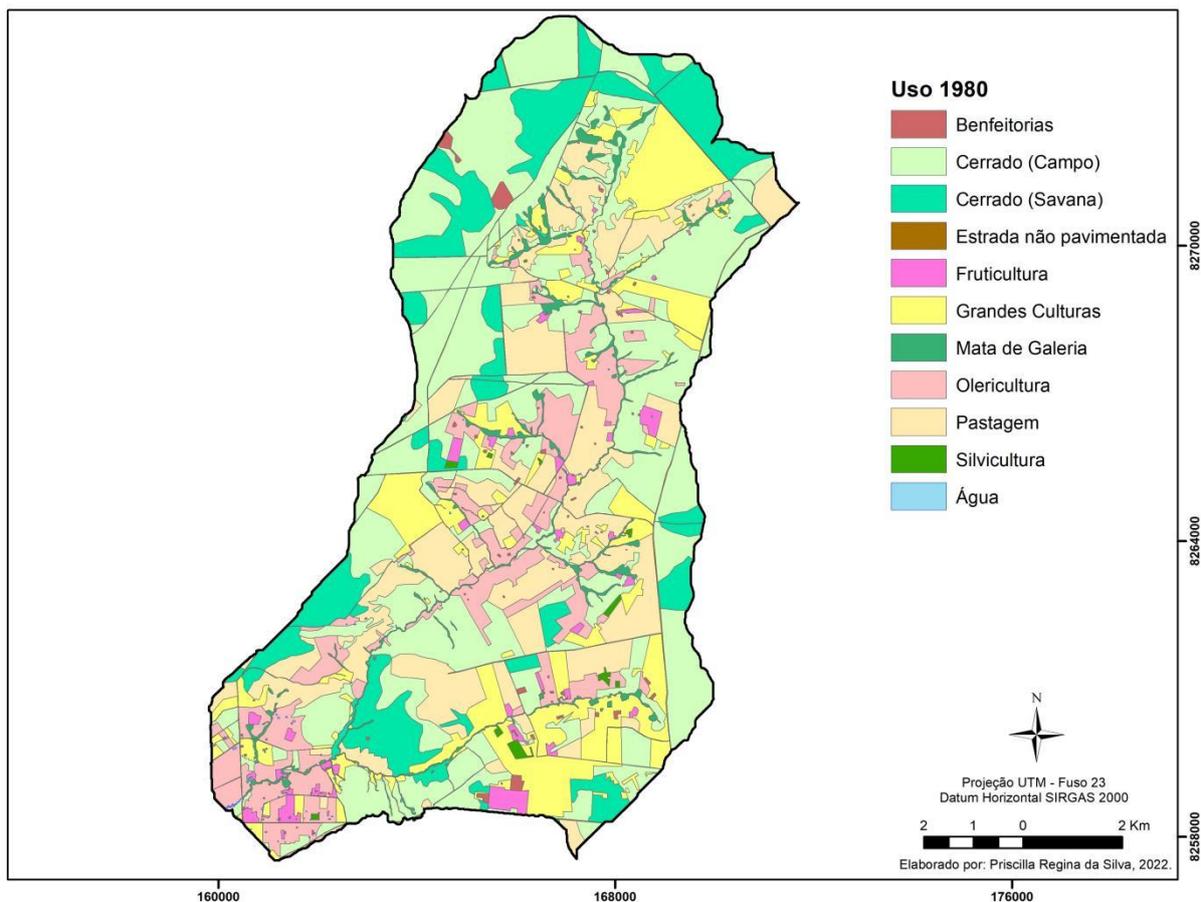


Figura 57 - Uso do solo ano de 1980 - bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador - DF (Imagem base: imagem aérea ortorretificada / Codeplan).

O cenário 2, referente ao ano de 1980, exibe a intensificação das atividades antrópicas na bacia e o decréscimo da vegetação nativa, que passa para cerca de 50% da área total. Áreas para pastagem exótica foram abertas, a atividade agrícola principal continua sendo o cultivo de grandes culturas em sequeiro, contudo, a existência da atividade de fruticultura e olericultura já pode ser observada.

Benfeitorias como casas e galpões já contabilizam mais de 62 hectares, o que demonstra a ocupação territorial mais acentuada e a presença de propriedades rurais de áreas menores.

Diferente da bacia do Capão Comprido, o Rodeador ainda não possuía estradas pavimentadas neste período e grande parte das não pavimentadas continua apresentando percurso irregular.

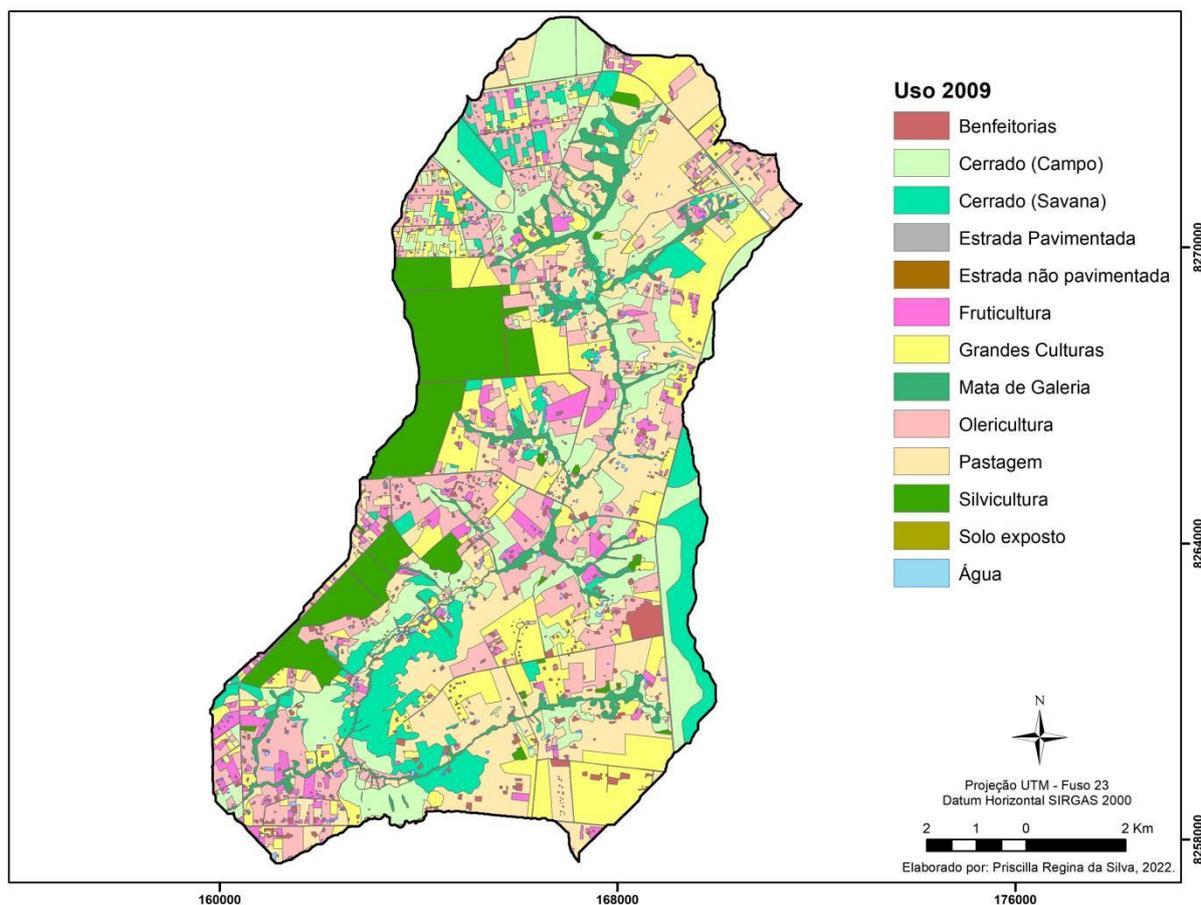


Figura 58 - Uso do solo ano de 2009 - bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador - DF (Imagem base: imagem *World Imagery Wayback* / ESRI e Imagens de satélite CBERS-4A / INPE ).

O cenário 3 apresenta a delimitação de novas propriedades rurais de áreas de 5 a 10 hectares, como o caso do assentamento Betinho na parte noroeste da bacia que conta com mais de 200 chácaras. Duas grandes áreas de silvicultura ficam em evidência na bacia, sendo a maior referente à Floresta Nacional de Brasília e a menor referente a área de reserva de propriedades assentadas pelo Incra nos anos 80. Há o aumento acentuado da atividade de fruticultura, com o acréscimo de mais de 250 ha considerando o último cenário e também da atividade de olericultura, que totaliza mais de 1500 ha cultivados. As áreas de vegetação nativa reduziram notavelmente, consistindo em 30% da bacia, entretanto observou-se o crescimento da vegetação florestal, principalmente da mata ripária.

No que se refere às áreas de benfeitorias, é perceptível a amplificação do número de moradias, galpões e construções de apoio às atividades rurais, todavia, já é possível identificar na bacia um condomínio residencial com características de ocupação mais intensiva. Quanto às estradas rurais, esse cenário apresenta certas vias de acesso pavimentadas, porém a maioria ainda são estradas sem pavimentação asfáltica.

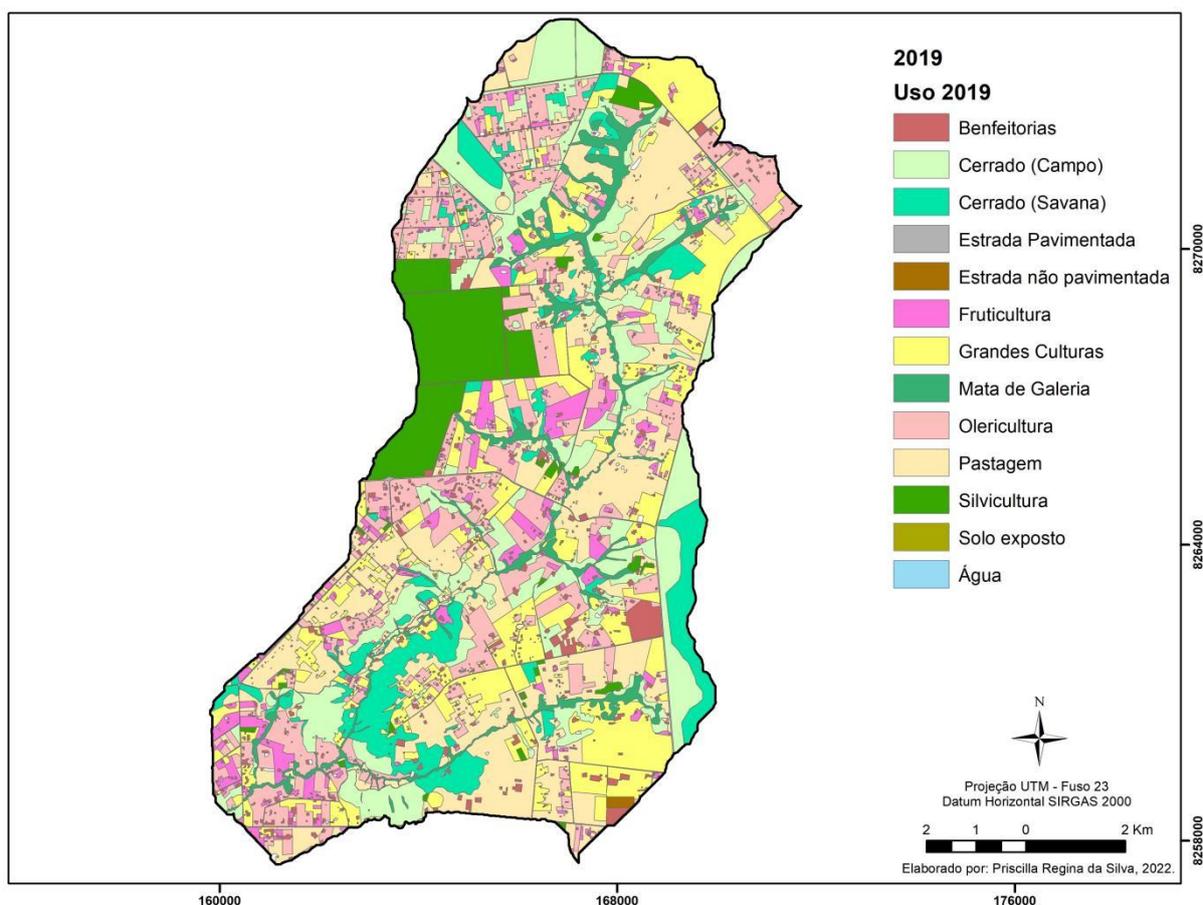


Figura 59 - Uso do solo ano de 2019 - bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador - DF (Imagem base: imagem *World Imagery Wayback* / ESRI e Imagens de satélite CBERS-4A / INPE ).

O cenário atual revela como principal tópico a ampliação do número de benfeitorias e o parcelamento do solo em pequenas propriedades, identifica-se ainda áreas de invasão e avanço da extensão dos condomínios residenciais.

As atividades agropecuárias não apresentaram acréscimo significativo em suas áreas, mantendo-se as mesmas porcentagens de ocupação da bacia do cenário anterior, isso pode ter sido motivado pelas restrições de uso da água para a irrigação e impedimento de obtenção de novas outorgas de água na região, ações que tiveram início no ano de 2016 e podem ter contribuído nessa estagnação.

Referindo-se ainda a temática água, observa-se um elevado número de reservatórios escavados e lonados, totalizando mais de 40 hectares quando somados, os quais são utilizados para a irrigação de frutas e hortaliças. Uma das áreas de silviculturas que eram evidentes no mapa do cenário anterior foi retirada e deu lugar a mais um assentamento de reforma agrária na região. As áreas de vegetação nativa não passaram por mudanças consideráveis em sua área, o que pode ser reflexo da consciência ambiental de sua população.

### 5.2.2.3 Mudanças e tendências observadas

A observação das mudanças do uso do solo divididas em três classes principais: Áreas Preservadas, Uso Antrópico – Agropecuária e Uso Antrópico – Infraestrutura, auxiliou na análise de tendência entre os períodos. As figuras 60 e 61 apresentam o gráfico de tendências de mudanças na ocupação e utilização do solo nas bacias hidrográficas do córrego Capão Comprido e do ribeirão Rodeador respectivamente.

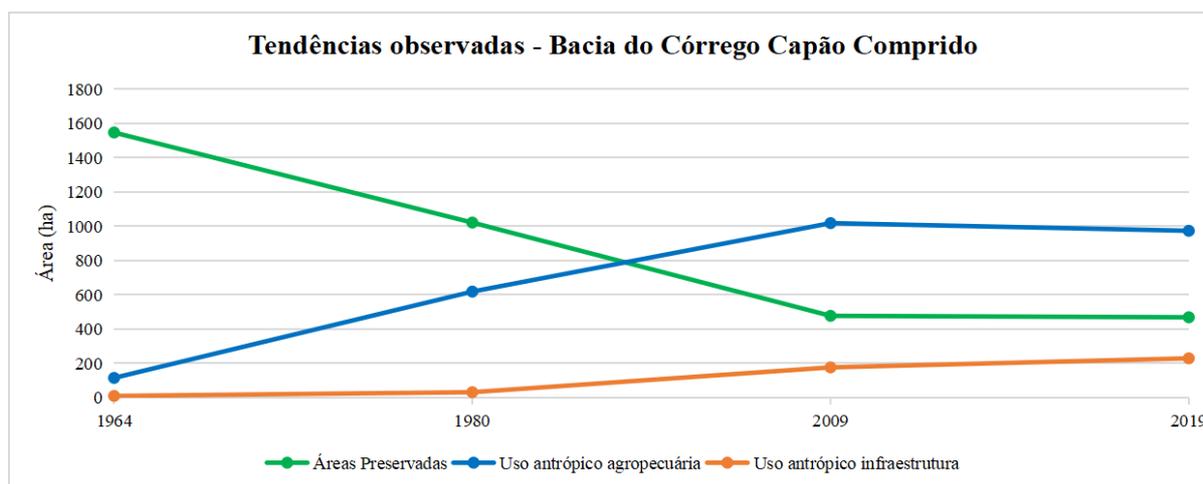


Figura 60 - Gráfico de tendências de mudança de uso do solo na bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido.

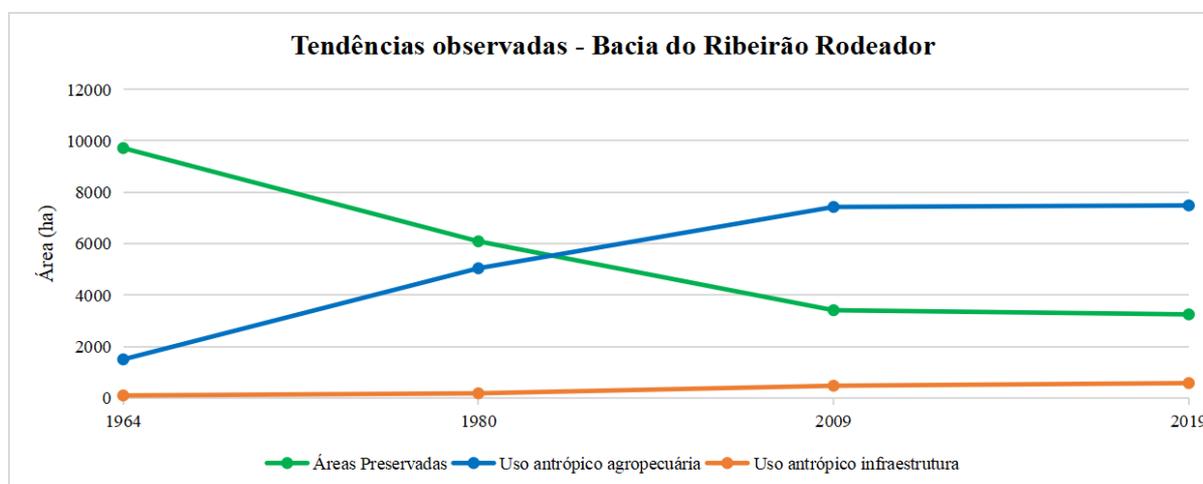


Figura 61- Gráfico de tendências de mudança de uso do solo na bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador.

A evolução do uso do solo em ambas bacias hidrográficas se comporta de maneira semelhante, evidenciando um comportamento homogêneo da ocupação da área em toda região, independente da dimensão da bacia estudada. Deste modo, desprende-se que as tendências aqui

observadas podem ser extrapoladas para a região a montante do reservatório do Descoberto que apresenta características semelhantes de ocupação.

Verifica-se que as áreas naturais preservadas foram as que mais sofreram redução em sua área total, principalmente quando comparados os três primeiros cenários. Fica evidente a intensificação da conversão de áreas naturais para àquelas destinadas às atividades agropecuárias até o ano de 2009. Todavia, observa-se a estagnação no quantitativo de área usufruída pela agropecuária no último período (2009 a 2019), revelando até mesmo um decréscimo de cerca de 3% de área total na bacia do Capão Comprido. Teixeira (2018) analisou a ocupação da APA da Bacia do Descoberto entre os anos de 2011 e 2014 e também verificou poucas alterações no uso da terra nesse período, o que indica a consolidação das atividades.

Da mesma maneira, ocorreu um estancamento na porcentagem de área referente à conversão de áreas naturais. Tal resultado pode indicar a melhoria da conscientização ambiental tanto da comunidade como os esforços dos órgãos públicos para a proteção ambiental de remanescentes e com o desenvolvimento sustentável. Contudo, conforme observado por Teixeira (2018), verifica-se a fragmentação da vegetação nativa e o isolamento dos fragmentos, o que dificulta a efetividade da conservação da biodiversidade e a oferta de serviços ecossistêmicos.

É perceptível a ampliação de áreas atinentes a implementação de infraestruturas e benfeitorias, as quais são prováveis produtos de parcelamentos do solo e processos de urbanização, denotando a especulação imobiliária fortemente presente na região. Assim, assinala-se a tendência de aumento de urbanização e de taxas de impermeabilização do solo na região, como já sinalizado por Torres (1997), que identificou taxas de expansão urbana de aproximadamente 20% entre os anos de 1988 e 1995 na região da APA da Bacia do Descoberto. Lima *et al.* (2019), da mesma forma, observaram desde o ano de 2016 uma maior incidência de parcelamento de propriedades na bacia do Ribeirão Rodeador e, ainda, Silva (2015) identificou o aumento do número de imóveis rurais menores que 2 ha na APA, mostrando o aumento do parcelamento e a substituição gradativa das áreas agrícolas por áreas urbanas.

Importante salientar que muitos produtores rurais da região têm encontrado adversidades na continuação do desenvolvimento das atividades agrícolas, principalmente após a “Crise Hídrica” que anunciou e exprimiu a insegurança hídrica da região e o impacto econômico negativo das medidas de controle que impedem a captação de água aos produtores irrigantes. Procedimentos legais que limitam os valores de outorga de recursos hídricos ou que até mesmo

proíbem a expansão da atividade de irrigação enfraquecem a atividade agropecuária e aumentam a especulação imobiliária e parcelamento irregular do solo.

### 5.3 MODELAGEM DAS BACIAS

#### 5.3.1 Sub-bacias, HRUs e LSUs

A modelagem realizada no SWAT+ fornece certos produtos geoespaciais, sendo o primeiro a segmentação da bacia em sub-bacias de drenagem. O segundo item é a inserção de unidades de paisagem (LSU), as quais, a partir do modelo de elevação, divide a bacia em áreas de várzea (*floodplain*) e áreas elevadas (*upland*). Essas unidades de paisagem, juntamente com a base de dados de solo, uso do solo e elevação, são a matriz para a composição das Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs), que podem ser visualizadas espacialmente.

A Figura 62 exibe as sub-bacias geradas pelo modelo na bacia do Capão Comprido e também a Unidade de Paisagem (LSU), a qual foi gerada pela opção *buffer*, que observa a largura dos cursos d'água.

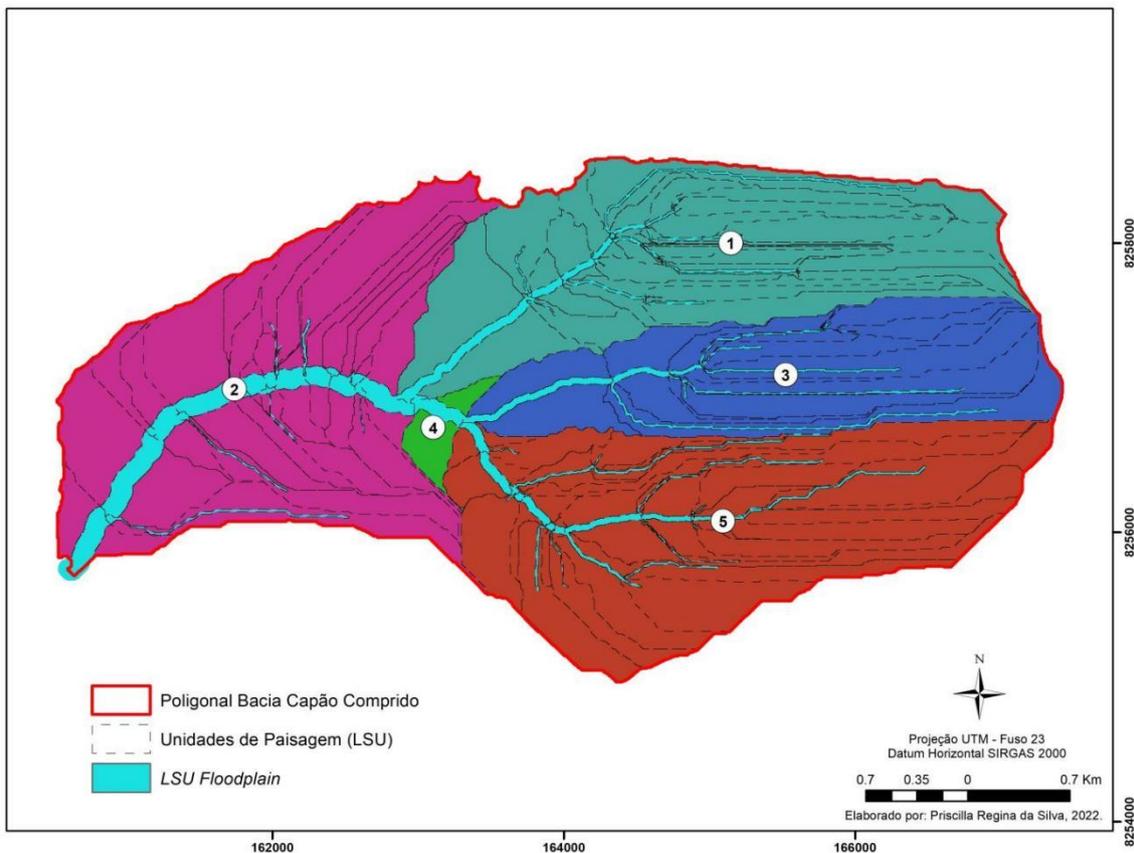


Figura 62 - Sub-bacias e unidades de paisagem da bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido (DF) geradas pelo modelo SWAT+.

A bacia do Capão Comprido foi subdividida em 5 sub-bacias, sendo a de maior extensão a sub-bacia 5, com 474,47 hectares e a menor a sub-bacia 4 de 20,82 hectares. No que tange às LSUs, foram geradas 188 unidades de paisagem que interligam as áreas altas com as mais baixas.

A Figura 63 apresenta as sub-bacias e as unidades de paisagem (LSUs) geradas para a bacia do Rodeador.

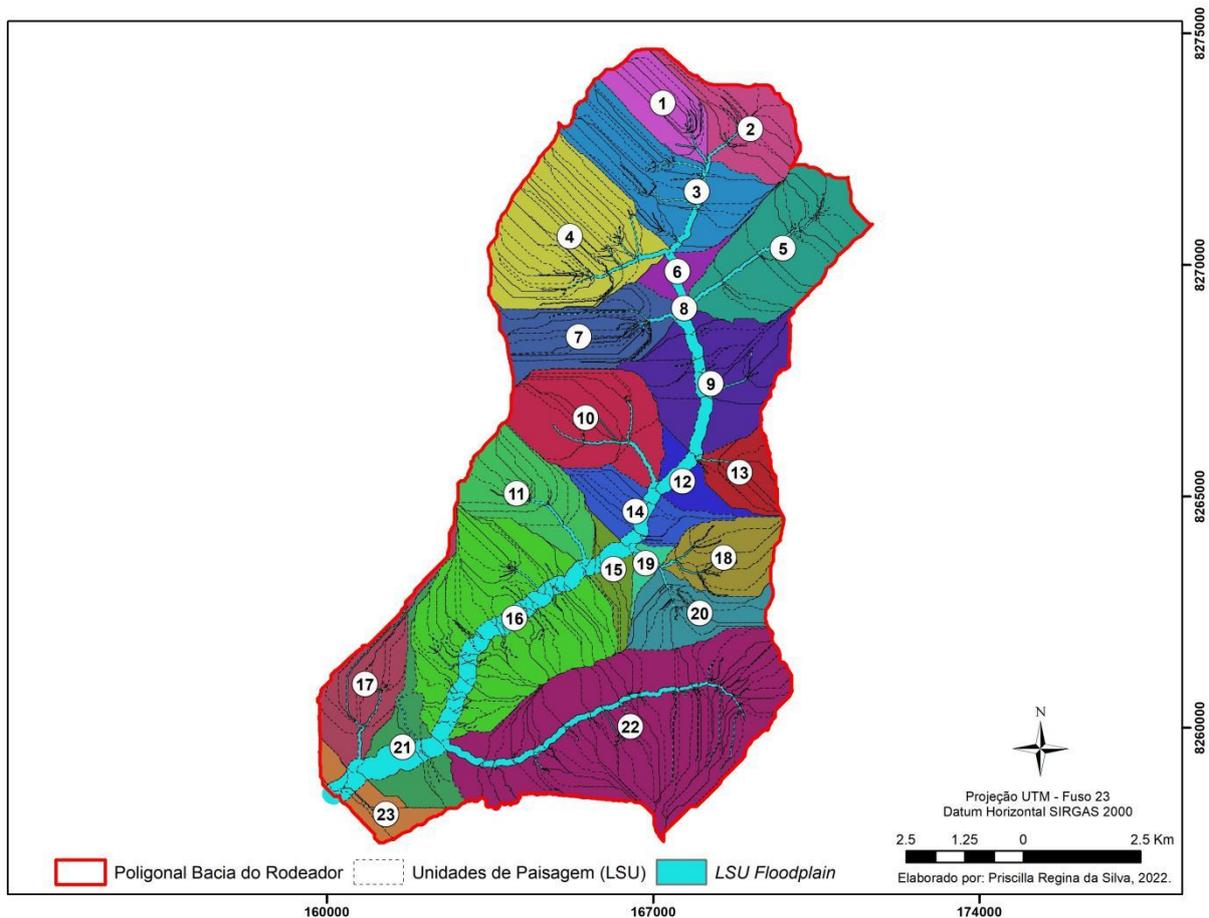


Figura 63 - Sub-bacias e unidades de paisagem da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador geradas pelo modelo SWAT+.

Quanto à bacia do Rodeador, gerou-se 634 LSUs e 23 sub-bacias, essas possuindo área média de 491,67 ha, sendo a maior a sub-bacia 22 com 1.900 ha. A simulação de cenários por bacia resultou em um número total de HRUs variado, isso devido a diferenças de uso do solo entre os períodos. Optou-se pela execução do modelo considerando todas as sub-bacias, HRUs e LSUs. A Tabela 28 apresenta a quantidade de HRUs geradas pelo modelo na análise da bacia e na simulação de cada cenário.

Tabela 28 - Quantidade de Unidades de Resposta Hidrológicas simuladas em cada bacia.

Cenários	HRUs - Capão Comprido	HRUs - Rodeador
Cenário 1 - 1964	1.106	4.303
Cenário 2 - 1980	1.433	5.601
Cenário 3 - 2009	1.749	6.765
Cenário 4 - 2019	1.748	6.848

### 5.3.2 Modelagem inicial

A modelagem inicial foi executada considerando os cenários da bacia do Capão Comprido, contou com a análise preliminar dos resultados obtidos realizada por comparação gráfica e cálculo de coeficiente *Nash-Sutcliffe* (NSE), PBIAS e  $R^2$ , sem a execução da calibração. Entretanto, o cenário 1 (1964) não passou por esse procedimento, devido à inexistência de dados observados nesse período.

As figuras 64 a 67 apresentam a comparação dos dados de vazão diária observados com os dados simulados nos três cenários de uso da bacia do Capão Comprido.

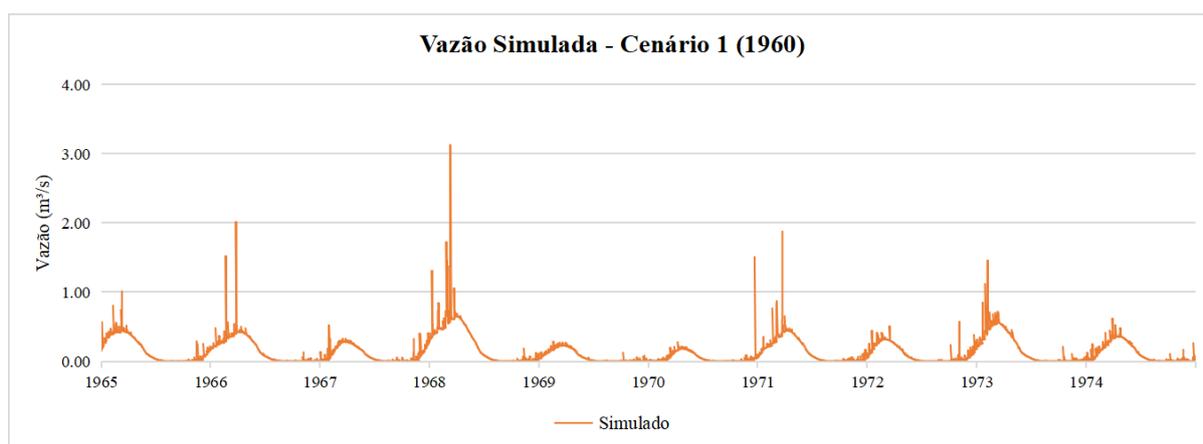


Figura 64 - Vazões simuladas e observadas sem calibração do córrego Capão Comprido no período de 1965 a 1974.

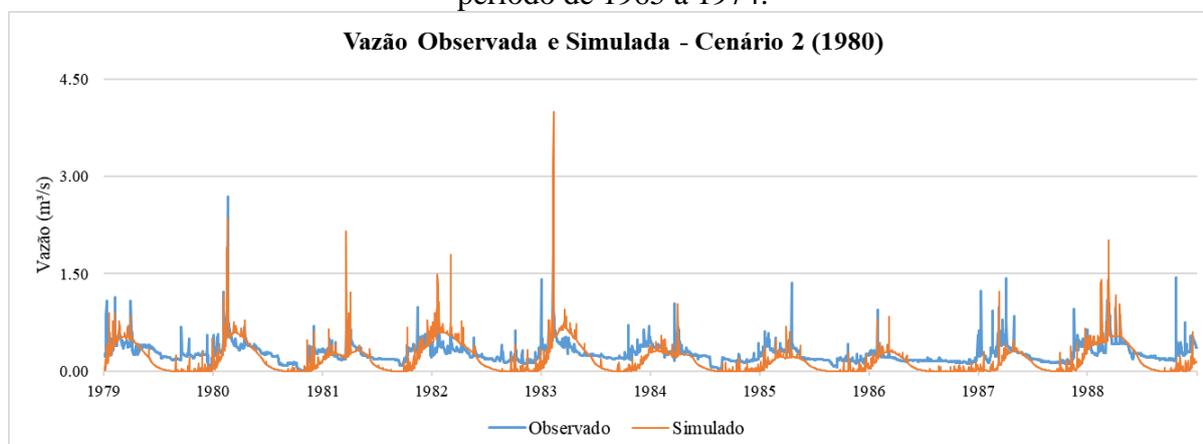


Figura 65 - Vazões simuladas e observadas sem calibração do córrego Capão Comprido no período de 1979 a 1988.

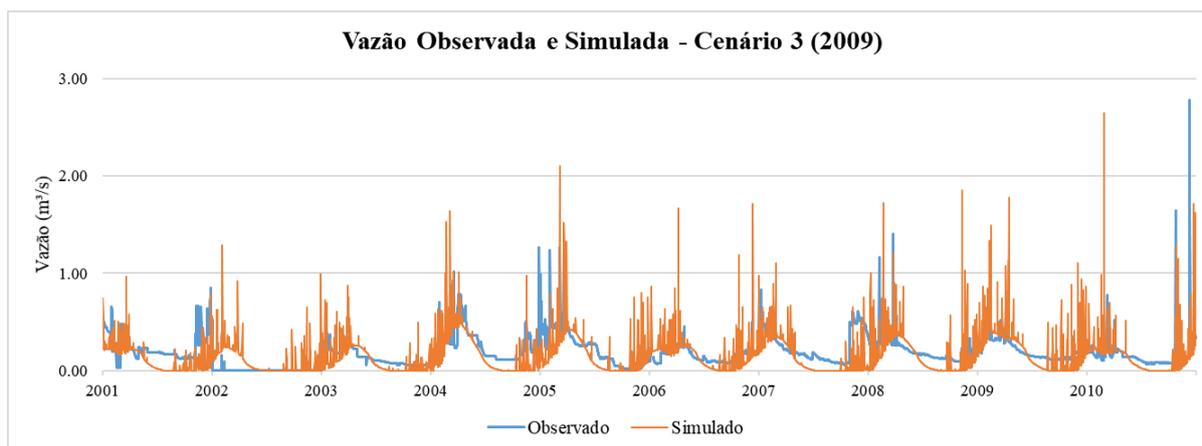


Figura 66 - Vazões simuladas e observadas sem calibração do córrego Capão Comprido no período de 2001 a 2010.

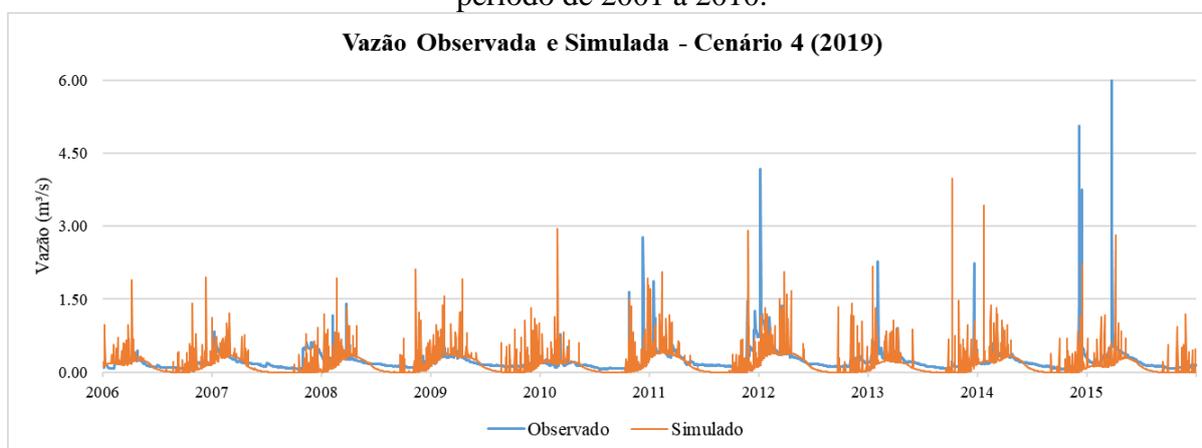


Figura 67 - Vazões simuladas e observadas sem calibração do córrego Capão Comprido no período de 2006 a 2015.

No que se refere à comparação entre as vazões simuladas e as observadas, o coeficiente NSE de todos os cenários ficaram abaixo de 0 e o PBIAS obteve resultados entre 10 e 32, como pode ser observado na Tabela 29. Segundo Moriasi *et al.* (2015), para a simulação de vazão considerada satisfatória os valores de NSE devem ser maiores que 0,50, o PBIAS menores que  $\pm 15$  e o  $R^2$  maior que 0,60. Assim, a avaliação de desempenho foi considerada insatisfatória nos três cenários.

Tabela 29 - Critérios de avaliação de desempenho calculados para os três cenários.

	<b>NSE</b>	<b>Desempenho</b>	<b>PBIAS</b>	<b>Desempenh</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Desempenh</b>
<b>Cenário 2</b>	-0,64	Insatisfatório	32,3	Insatisfatório	0,68	Satisfatório
<b>Cenário 3</b>	-0,77	Insatisfatório	10,89	Satisfatório	0,43	Insatisfatório
<b>Cenário 4</b>	-0,54	Insatisfatório	16,18	Insatisfatório	0,28	Insatisfatório

Já quanto à simulação de nutrientes, realizou-se a comparação e análise estatística de nitrogênio total e fósforo total simulado e observado referente ao cenário 4, devido a base

limitada de dados observados. As figuras 68 e 69 exibem a comparação entre os dados observados e os simulados referente à concentração de nutrientes.

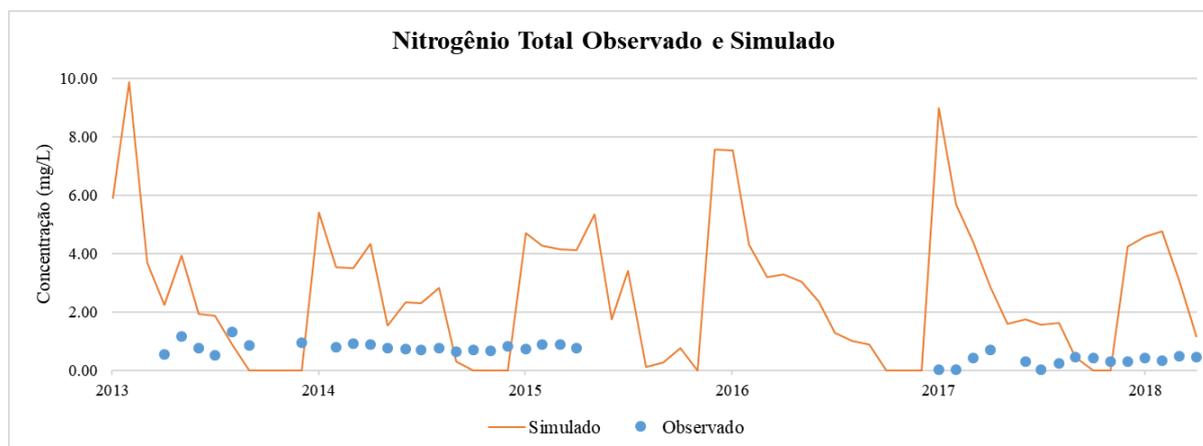


Figura 68 - Concentração de nitrogênio total observado e simulado córrego Capão Comprido.

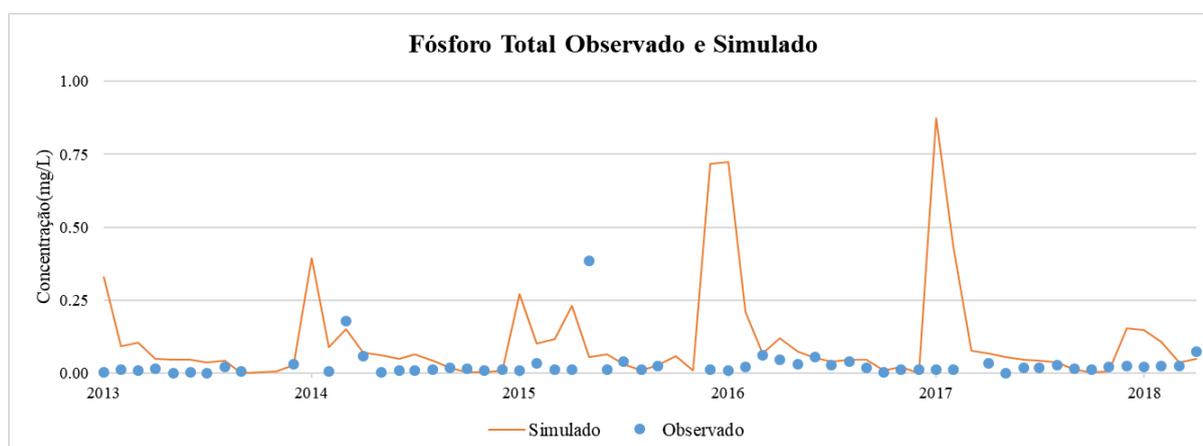


Figura 69 - Concentração de fósforo total observado e simulados córrego Capão Comprido.

As concentrações de nitrogênio total simuladas para o período escolhido apresentaram uma variação bem acentuada, com valores que variam de 0,0 a 9,87 mg/L, enquanto que as concentrações observadas apresentam o valor máximo de 1,30 mg/L para o período. No que tange às concentrações simuladas de fósforo total, essa alcançou o valor máximo simulado de 0,87 mg/L enquanto os dados observados não apresentam valores maiores que 0,39 mg/L para o mesmo período, supõe-se que essa diferenciação seja resultado da não calibração do modelo.

Todos os critérios de avaliação de desempenho apresentaram valores considerados insatisfatórios, como pode ser observado na Tabela 30.

Tabela 30 - Critérios de avaliação de desempenho calculados para nutrientes N e P.

	<b>NSE</b>	<b>Desempenho</b>	<b>PBIAS</b>	<b>Desempenho</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Desempenho</b>
<b>P total</b>	-13,91	Insatisfatório	-327	Insatisfatório	0,06	Insatisfatório
<b>N total</b>	-51,54	Insatisfatório	-638	Insatisfatório	0,10	Insatisfatório

### 5.3.3 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade realizada observou os parâmetros adaptados por Ferrigo (2014) para a região. A análise foi obtida por meio de iterações pelo método Sobol (2001) e seus resultados podem ser verificados nas figuras 70 a 72.

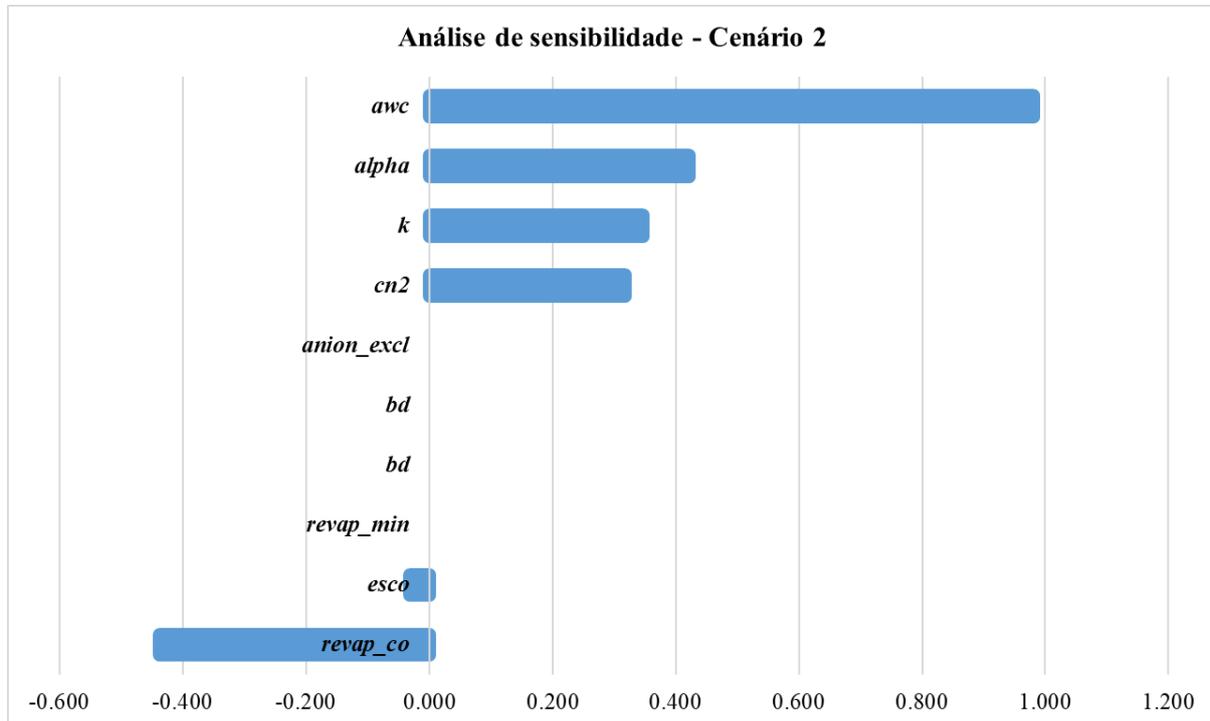


Figura 70 - Análise de sensibilidade - Cenário 2 (1980).

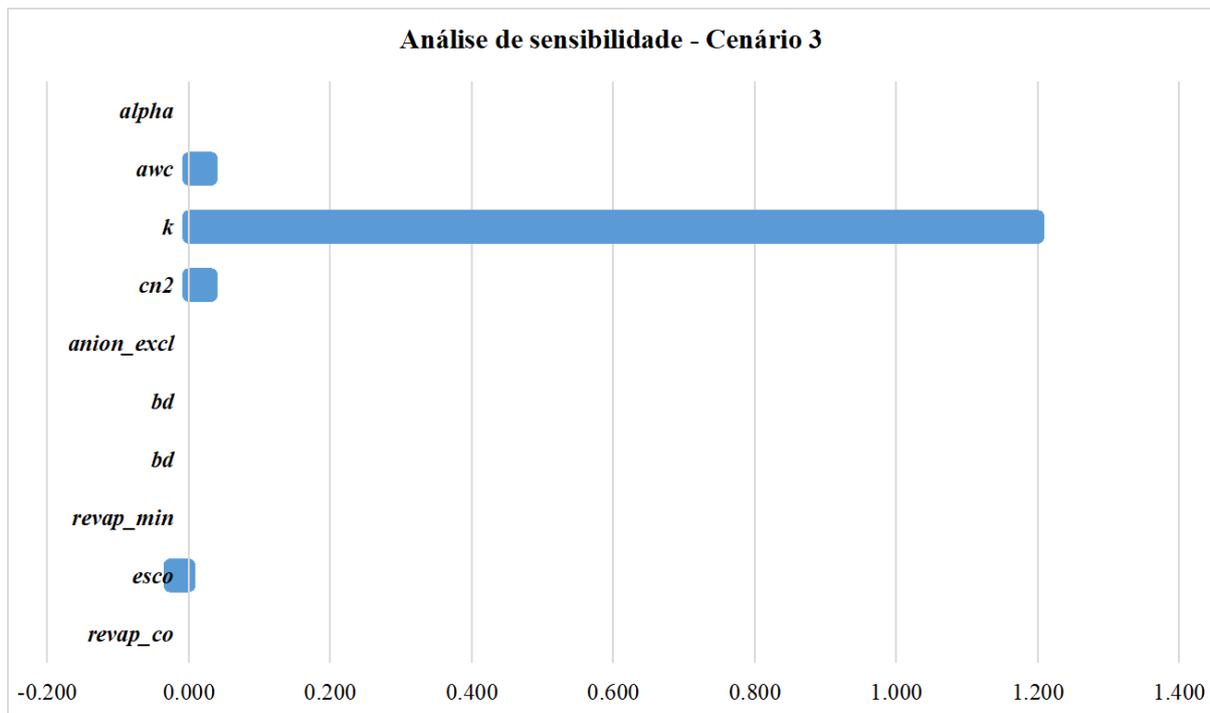


Figura 71 - Análise de sensibilidade - Cenário 3 (2009)

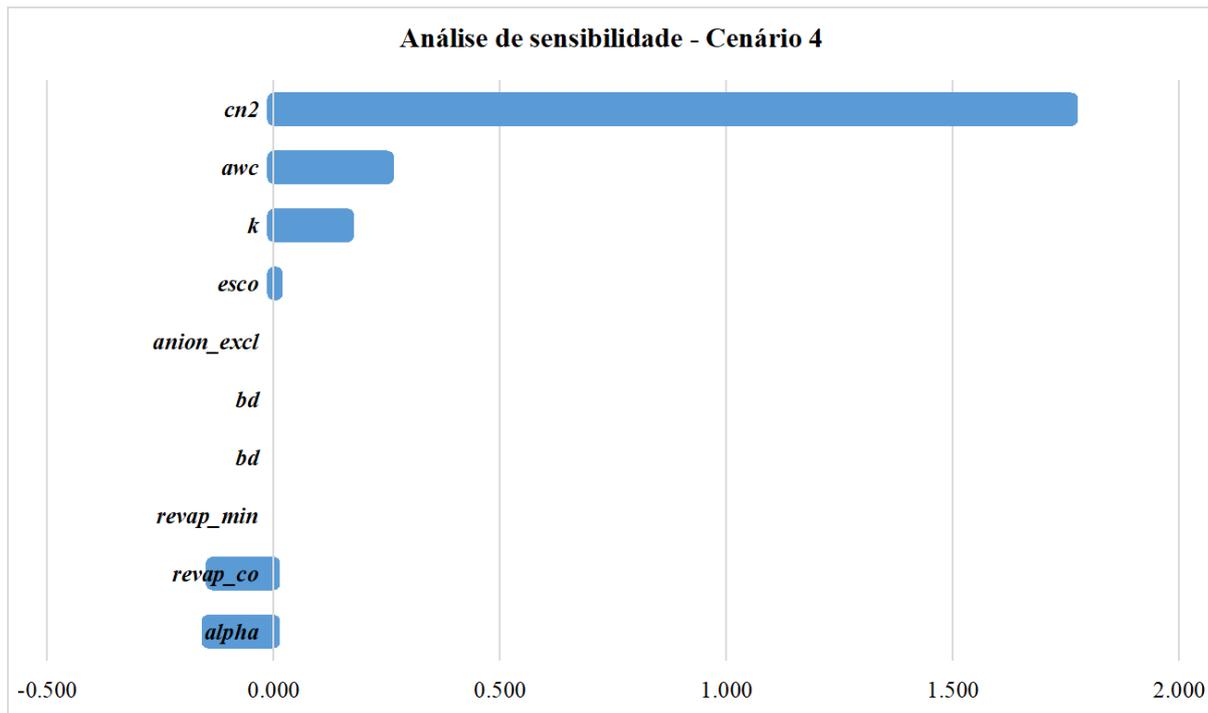


Figura 72 - Análise de sensibilidade - Cenário 4 (2019)

Os parâmetros *awc*, *k* e *cn2* apareceram entre os mais sensíveis nos três cenários, todos eles diretamente ligados a solo, fluxo de base e volume de escoamento.

Ressalta-se que a análise de sensibilidade só foi possível de ser realizada para os dados de vazão, pois a ferramenta SWAT+ Toolbox somente realiza a análise de Fósforo e Nitrogênio divididos em sua fração mineral e orgânica, os quais não foram disponibilizados os dados observados.

### 5.3.4 Calibração

A calibração do modelo foi realizada de forma automática no SWAT+ Toolbox por meio do algoritmo *Dynamically Dimensioned Search* (DDS) com iterações visando maximizar a função objetivo NSE, a partir dos dados observados de vazão diária.

Ressalta-se que a calibração foi realizada apenas para a bacia hidrográfica do Capão Comprido, observando os períodos citados na Tabela 15, de modo a replicá-la na bacia hidrográfica do Rodeador. A análise contou com o total de 3644 valores de vazões diárias referente ao cenário 2 e 3645 valores de vazões diárias para os cenários 3 e 4. Os valores resultantes da calibração estão apresentados na Tabela 31 e demonstrados graficamente nas figuras 73 a 76.

Tabela 31 - Parâmetros e valores de calibração resultantes para os três cenários na bacia hidrográfica do Capão Comprido.

Parâmetro	Método	Cenário 2 (1980)	Cenário 3 (2009)	Cenário 4 (2019)
<i>alpha</i>	substituição	0,014	0,71	0,004
<i>revap_co</i>	substituição	0,021	0,02	0,022
<i>cn2</i>	porcentagem	-26,739	-25,36	-29,884
<i>esco</i>	substituição	0,486	0,509	0,401
<i>awc</i>	porcentagem	-14,286	-13,112	-19,125
<i>k</i>	porcentagem	0,176	0,146	60,958

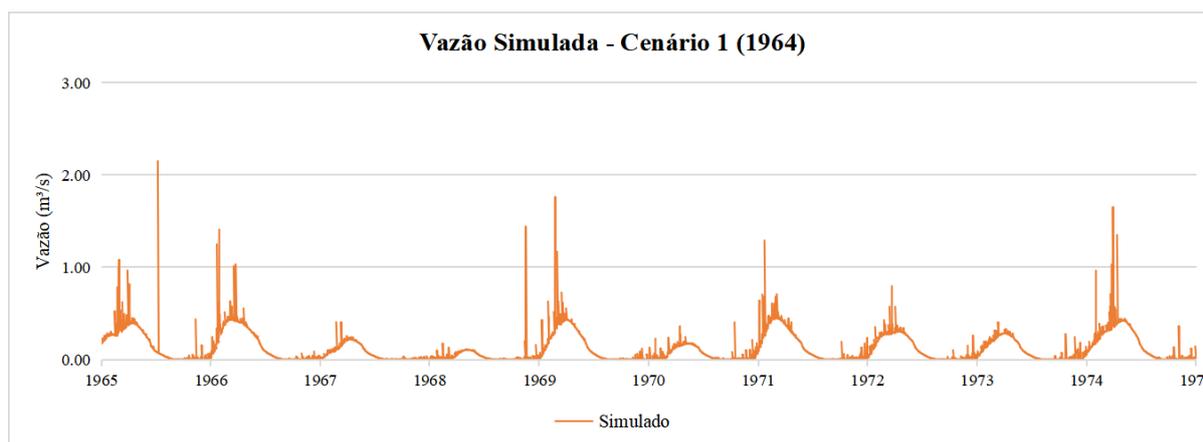


Figura 73 - Vazões simuladas do córrego Capão Comprido no período de 1965 a 1974 - após processo de calibração.

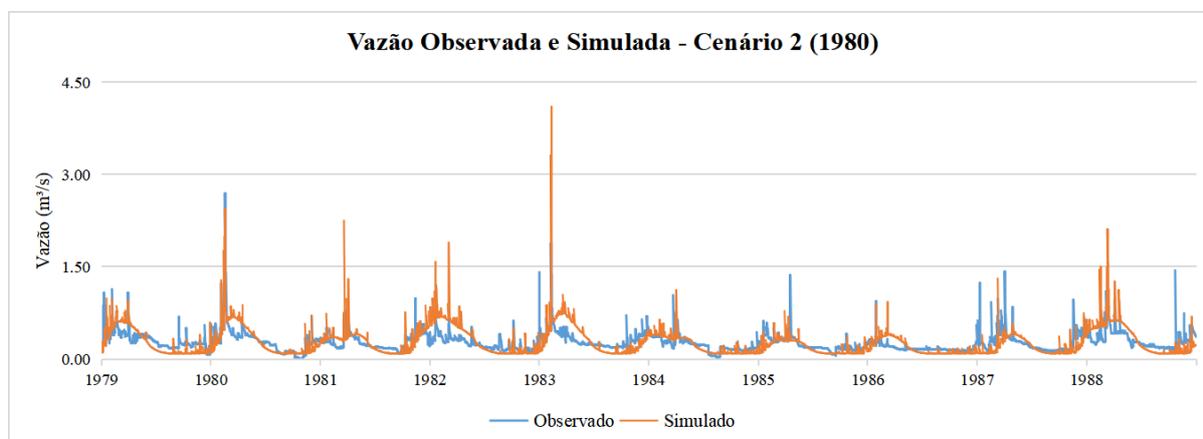


Figura 74 - Vazões simuladas e observadas do córrego Capão Comprido no período de 1979 a 1988 - após processo de calibração.

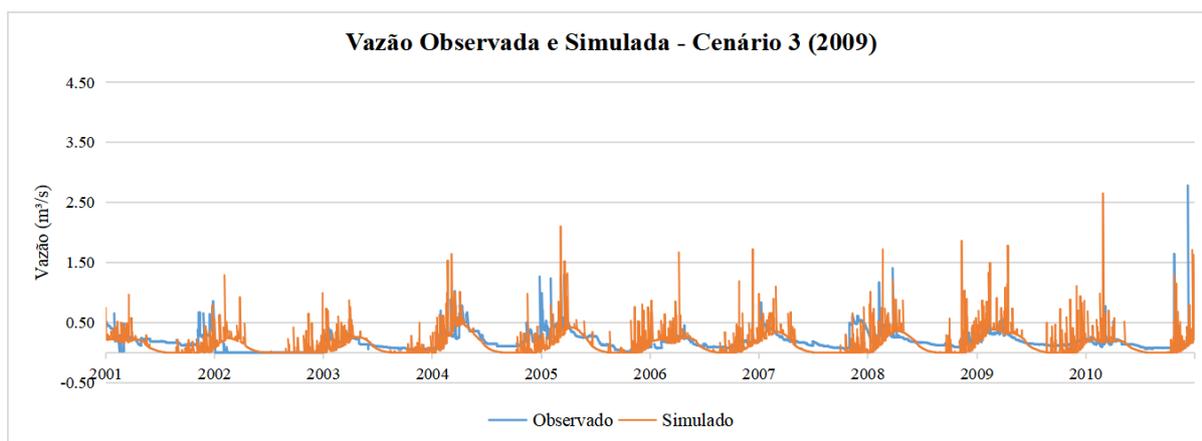


Figura 75 - Vazões simuladas e observadas do córrego Capão Comprido no período de 2001 a 2010 - após processo de calibração.

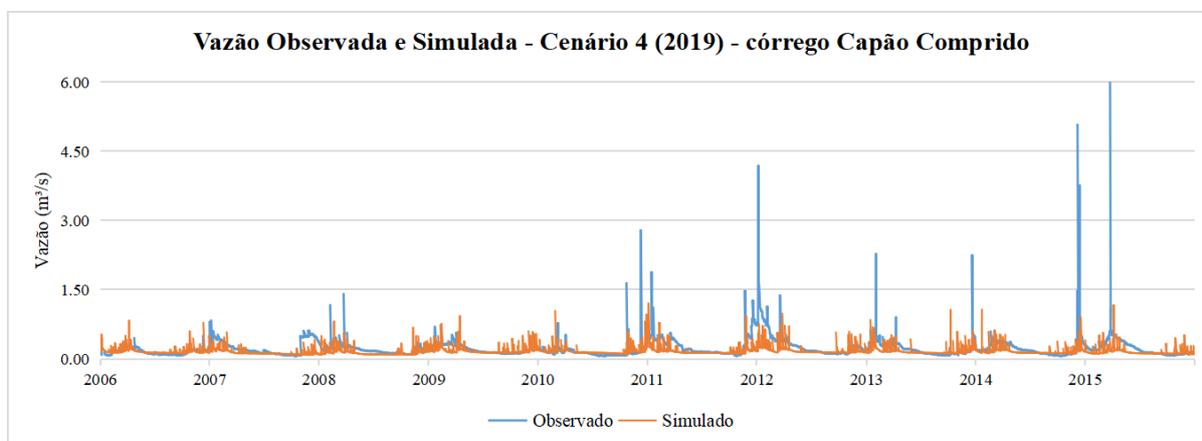


Figura 76 - Vazões simuladas e observadas do córrego Capão Comprido no período de 2006 a 2015 - após processo de calibração.

Com base na simulação com o emprego dos valores de melhor ajuste, observa-se uma melhor adaptação dos dados de vazão simuladas com os de vazão observadas. Quanto aos critérios de avaliação, verificou-se os novos valores dos coeficientes de eficiência NSE, PBIAS e  $R^2$ , apresentados na Tabela 32. Contudo, ressalta-se que nem todos os critérios avaliaram como satisfatório o desempenho do modelo (MORIASI *et al.*, 2015).

Tabela 32 - Critérios de avaliação de desempenho calculados para os três cenários.

	NSE	Desempenho	PBIAS	Desempenho	$R^2$	Desempenho
<b>Cenário 2</b>	0,35	Insatisfatório	0,88	Muito bom	0,68	Satisfatório
<b>Cenário 3</b>	0,15	Insatisfatório	13,77	Satisfatório	0,39	Insatisfatório
<b>Cenário 4</b>	0,502	Satisfatório	16,09	Insatisfatório	0,44	Insatisfatório

### 5.3.5 Verificação do modelo para a bacia do Capão Comprido

A verificação do modelo para a bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido observou os períodos listados na Tabela 15. Destaca-se que para o cenário 1 foram utilizados os valores provenientes da calibração do cenário 2. As figuras 77 a 80 apresentam os gráficos de comparação entre a vazão simulada e observada e a Tabela 33, os valores obtidos dos critérios de avaliação e seu desempenho calculado.

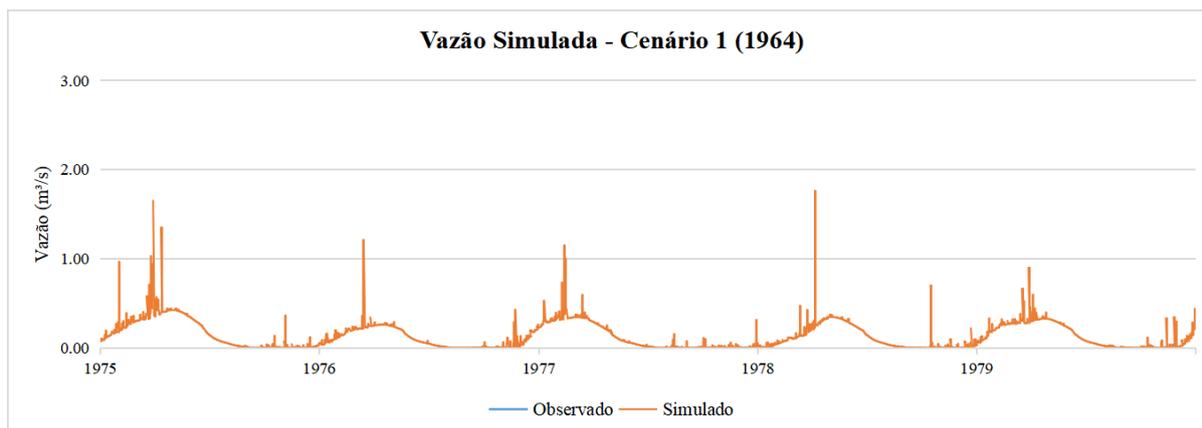


Figura 77 - Vazões simuladas do córrego Capão Comprido no período de 1975 a 1979.

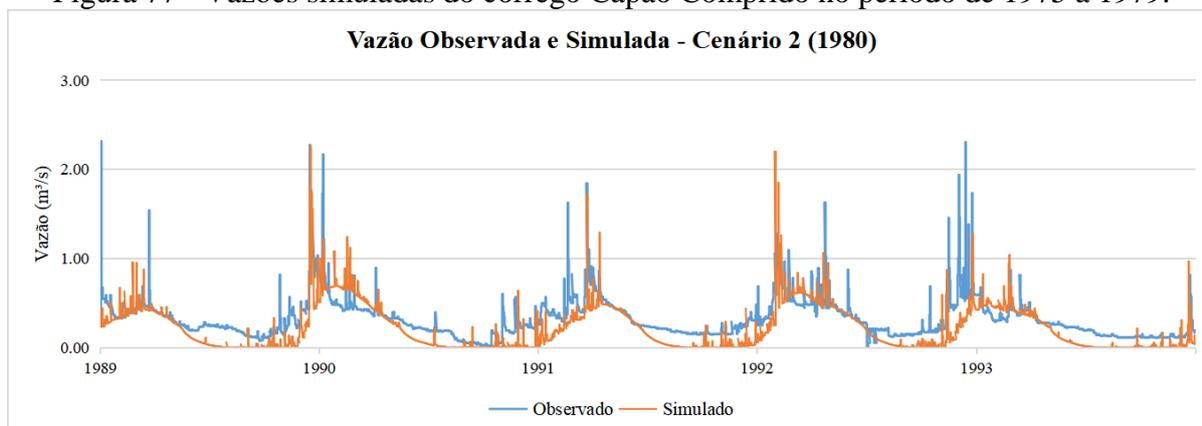


Figura 78 - Vazões simuladas e observadas do córrego Capão Comprido no período de 1989 a 1993 - verificação.

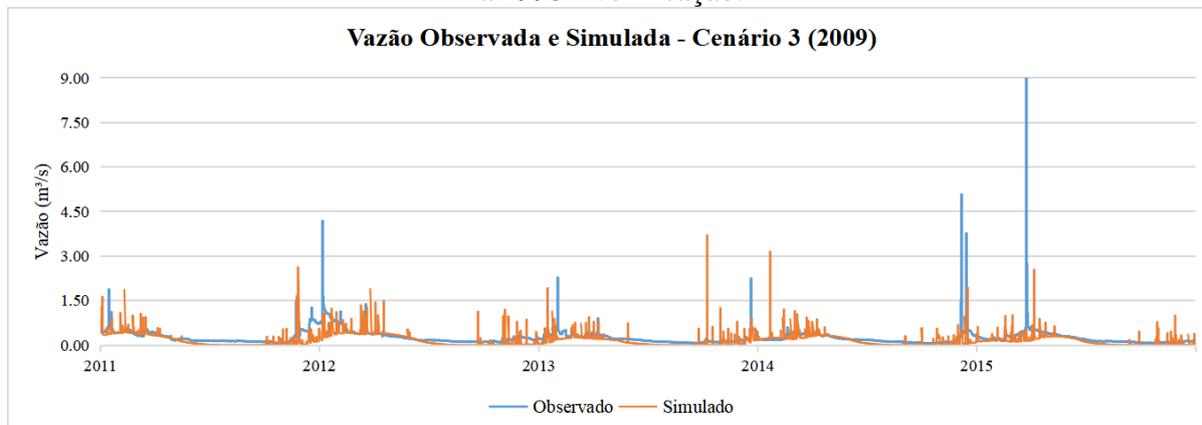


Figura 79 - Vazões simuladas e observadas do córrego Capão Comprido no período de 2001 a 2010 - verificação.

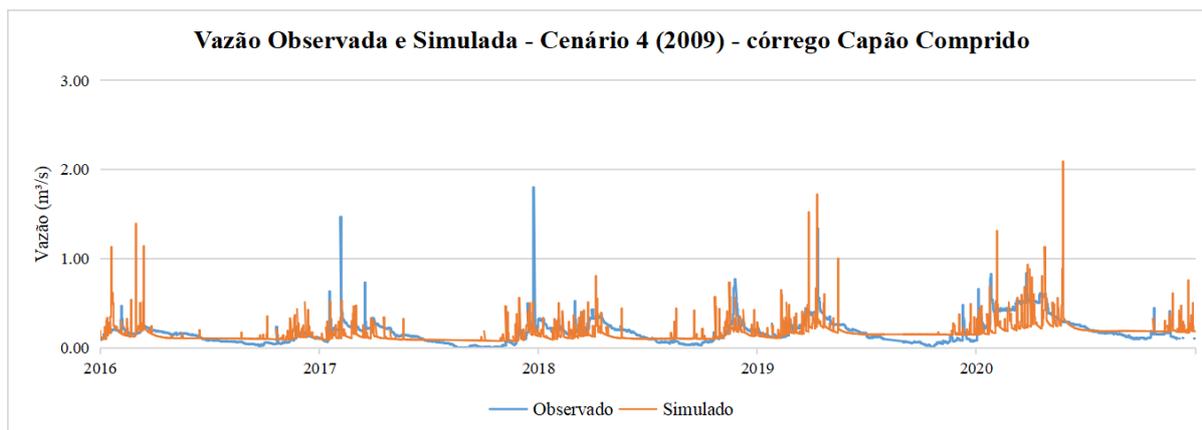


Figura 80 - Vazões simuladas e observadas do córrego Capão Comprido no período de 2006 a 2015 - verificação.

Tabela 33 - Critérios de avaliação de desempenho calculados para os três cenários.

	NSE	Desempenho	PBIAS	Desempenho	R <sup>2</sup>	Desempenho
<b>Cenário 2</b>	0,17	Insatisfatório	32,3	Insatisfatório	0,30	Insatisfatório
<b>Cenário 3</b>	-0,20	Insatisfatório	27,38	Insatisfatório	0,43	Insatisfatório
<b>Cenário 4</b>	0,18	Insatisfatório	-2,14	Satisfatório	0,41	Insatisfatório

As figuras 81 e 82 apresentam os gráficos de comparação entre nitrogênio e fósforo total observados e simulados, respectivamente, e a Tabela 34, os valores obtidos dos critérios de avaliação e seu desempenho calculado.

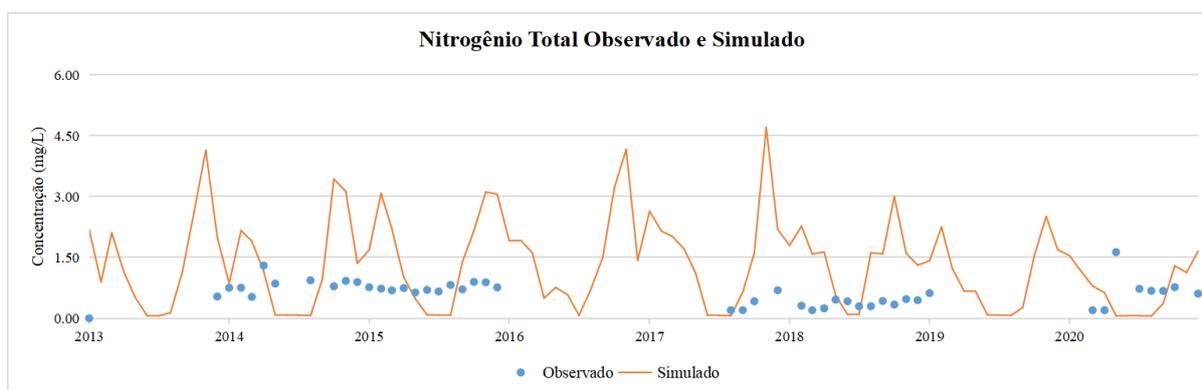


Figura 81 - Concentração de nitrogênio total observado e simulado do córrego Capão Comprido no período de 2013 a 2020 - verificação.

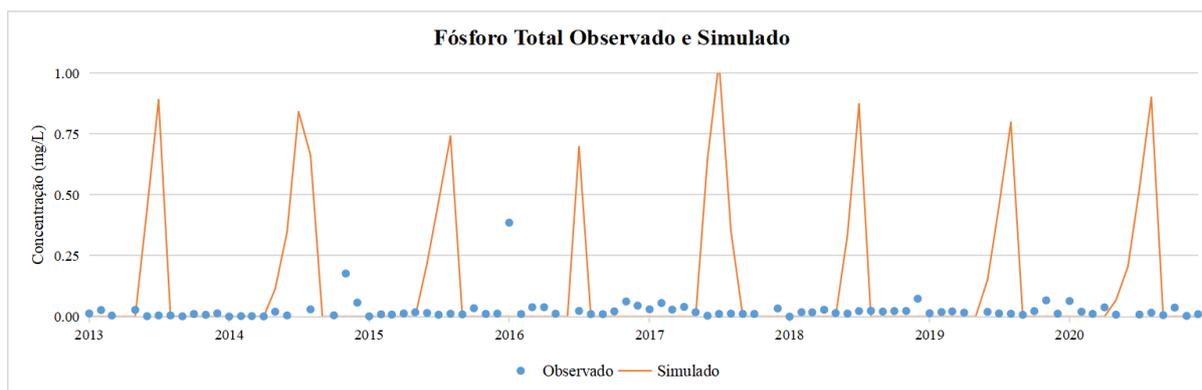


Figura 82 - Concentração de fósforo total observado e simulado do córrego Capão Comprido no período de 2013 a 2020 - verificação.

Tabela 34 - Critérios de avaliação de desempenho calculados para nutrientes N e P.

	NSE	Desempenho	PBIAS	Desempenho	R <sup>2</sup>	Desempenho
<b>P total</b>	-42,98	Insatisfatório	-431	Insatisfatório	0,11	Insatisfatório
<b>N total</b>	-3,11	Insatisfatório	-339	Insatisfatório	0,58	Satisfatório

### 5.3.6 Verificação do modelo para a bacia do Rodeador

A bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador não passou por processo de calibração específica, dessa maneira, a verificação do modelo para a bacia deu-se por meio da aplicação dos valores calibrados para a bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido, inclusive para o cenário 1 com o uso de valores calibrados para o cenário 2.

As figuras 83 a 86 apresentam os gráficos de comparação entre a vazão simulada e observada e a Tabela 35, os valores obtidos dos critérios de avaliação e seu desempenho calculado.

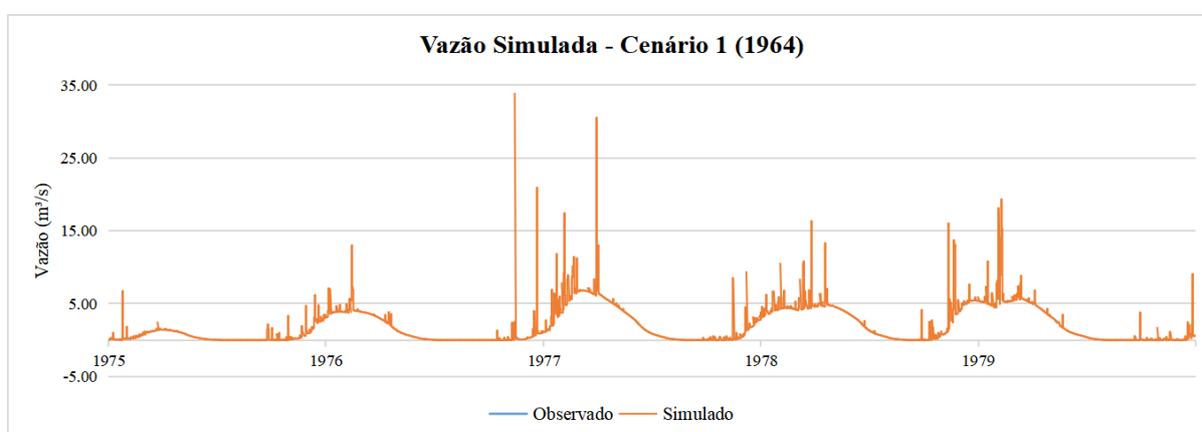


Figura 83 - Vazões simuladas do ribeirão Rodeador no período de 1975 a 1979.

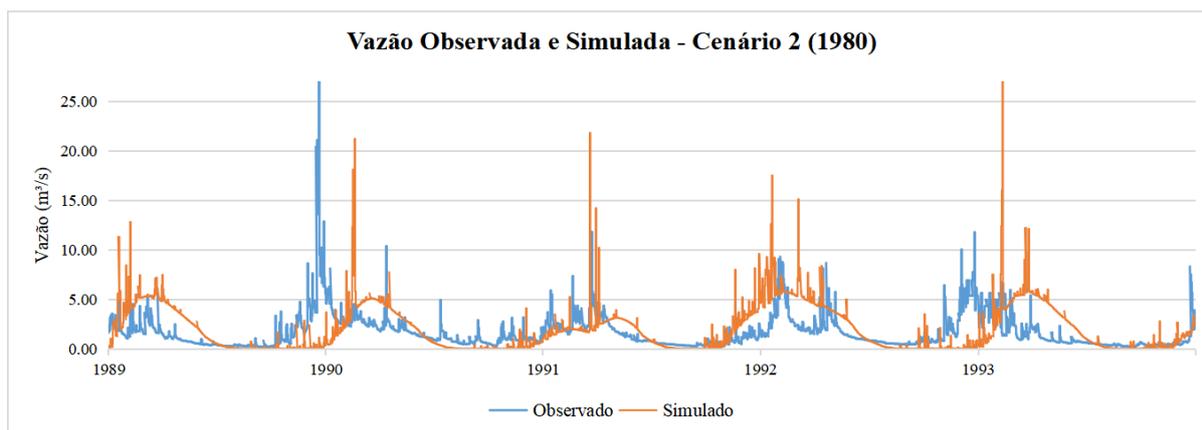


Figura 84 - Vazões simuladas e observadas do ribeirão Rodeador no período de 1989 a 1993 - verificação.

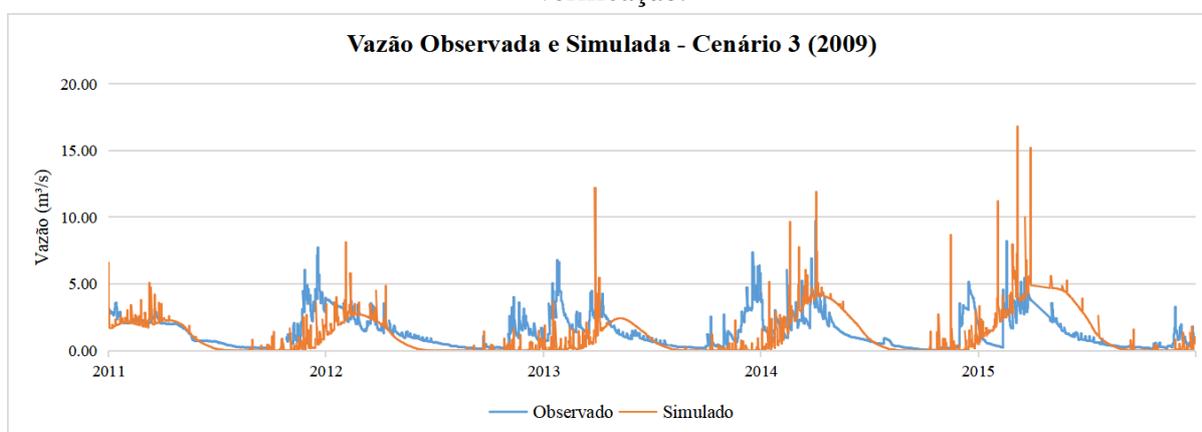


Figura 85 - Vazões simuladas e observadas do ribeirão Rodeador no período de 2011 a 2015 - verificação.

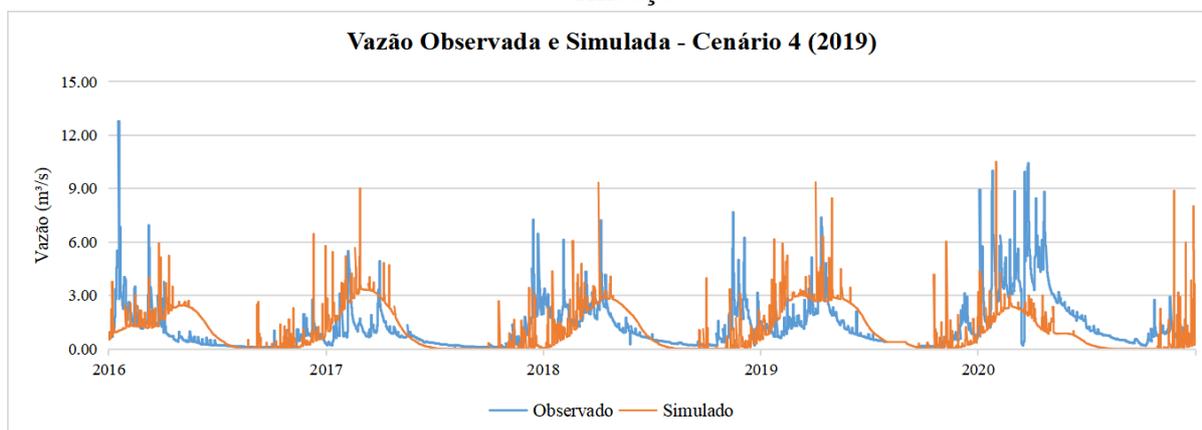


Figura 86 - Vazões simuladas e observadas do ribeirão Rodeador no período de 2016 a 2020 - verificação.

Tabela 35 - Critérios de avaliação de desempenho calculados para os três cenários.

	<b>NSE</b>	<b>Desempenho</b>	<b>PBIAS</b>	<b>Desempenho</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Desempenho</b>
<b>Cenário 2</b>	-1,09	Insatisfatório	-18,45	Insatisfatório	0,23	Insatisfatório
<b>Cenário 3</b>	-0,157	Insatisfatório	13,39	Satisfatório	0,43	Insatisfatório
<b>Cenário 4</b>	0,24	Insatisfatório	6,77	Bom	0,36	Insatisfatório

Os valores dos critérios de avaliação de desempenho para a verificação foram todos insatisfatórios em ambas as bacias (MORIASI *et al.*, 2015), apresentando maior discrepância quando verificado os componentes Nitrogênio Total e Fósforo Total, que não passaram por calibração específica.

Brighenti (2015) descreve que a calibração e a verificação de funções objetivos tende a apresentar valores mais satisfatórios quando individualizada a análise e a simulação dos dados separados em anos úmidos e em anos secos.

Entende-se, assim, que os valores dos critérios de avaliação de desempenho obtidos podem ser aperfeiçoados e melhorados, principalmente considerando a importância da escolha da série histórica, com acesso a um conjunto de dados observados mais confiável (nutrientes), a continuidade de verificação de parâmetros mais sensíveis e sua amplitude de valores, bem como a utilização de softwares de análise de sensibilidade e de calibração automática mais amigáveis e adaptados, visto que o SWAT+ Toolbox se mostrou incipiente na configuração de parâmetros para análise de sensibilidade e na aplicação de dados observados mais complexos para calibração.

Ressalta-se que, mesmo com resultados considerados insatisfatórios para calibração e verificação, esses não invalidam o emprego da modelagem hidrológica no que tange a observação de comportamentos hidrológicos de uma bacia a partir de alterações no manejo e de uso do solo e da água, objetivo desse estudo.

### **5.3.7 Simulação do uso do solo e impactos no balanço hídrico**

A simulação no SWAT+ resulta na visualização de dados e valores relativos a parâmetros que compõem o ciclo hidrológico da bacia hidrográfica, dentre eles: precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial, escoamento sub-superficial, percolação, capilaridade, fluxo de retorno e recarga de aquífero profundo. As figuras 87 e 88 representam o ciclo hidrológico médio simulado a partir do modelo calibrado para cada um dos cenários e em cada uma das bacias hidrográficas objetos desse estudo. As tabelas 36 e 37 exibem um resumo dos valores, em milímetros (mm), das principais propriedades do ciclo hidrológico relativas a cada cenário de uso do solo de cada uma das bacias hidrográficas da área de estudo, de forma a correlacionar as mudanças na ocupação do território e a evolução do comportamento hidrológico entre os períodos.

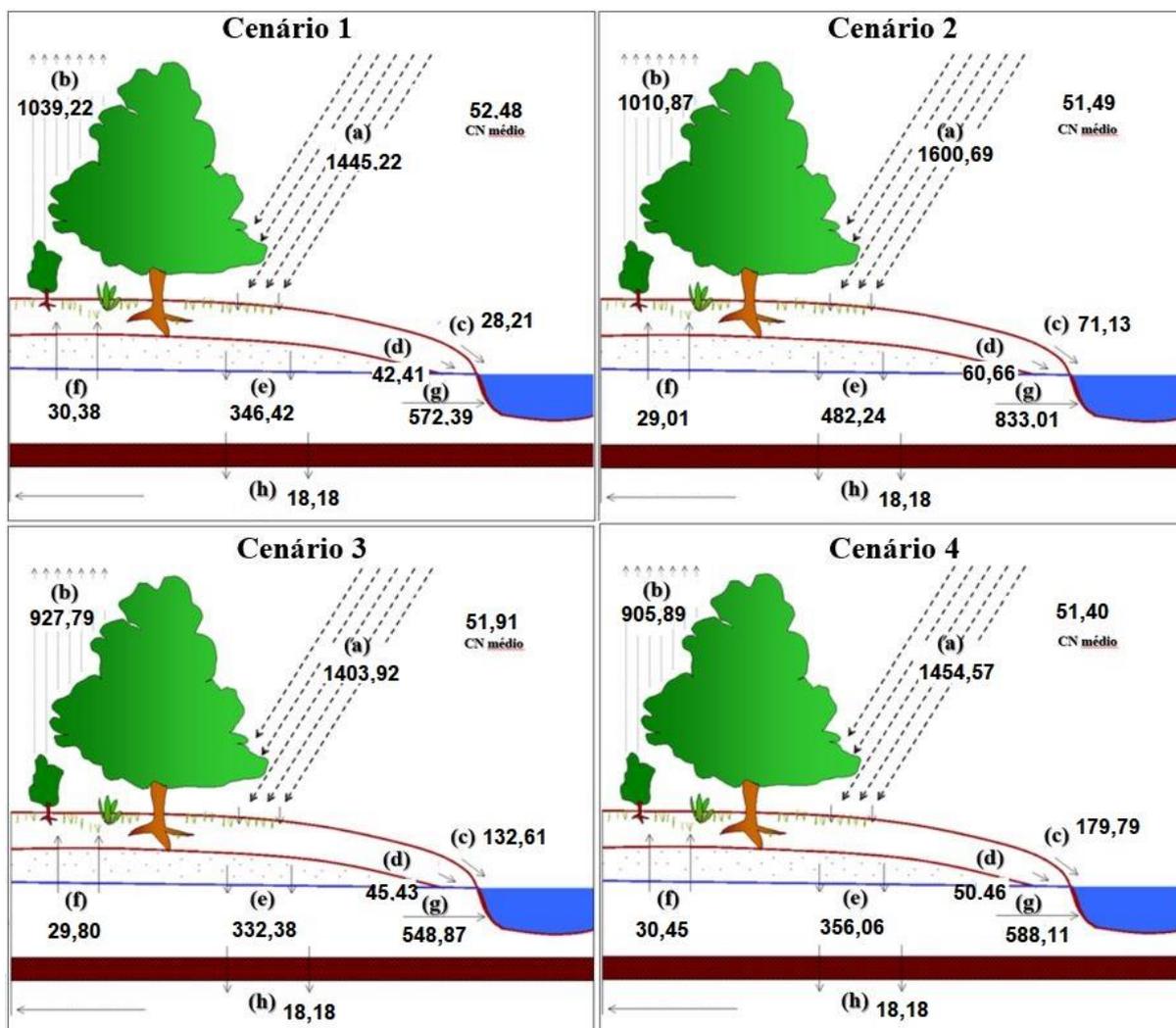


Figura 87 - Ciclo hidrológico médio simulado pelo SWAT+ nos 4 cenários de usos distintos da bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido (DF).

Tabela 36 - Valores simulados (mm) de parâmetros componentes do ciclo hidrológico médio da bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido (DF) para cada cenário de uso do solo.

Bacia Hidrográfica - Córrego Capão Comprido					
	Componente do Ciclo Hidrológico	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
(a)	Precipitação	1445,22	1600,69	1403,92	1454,57
(b)	Evapotranspiração	1039,22	1010,87	927,79	905,89
(c)	Escoamento Superficial	28,21	71,13	132,61	179,79
(d)	Escoamento Sub-superficial	42,41	60,66	45,43	50,46
(e)	Percolação	346,42	480,24	332,38	356,06
(f)	Capilaridade	30,38	29,01	29,8	30,45
(g)	Fluxo de retorno	572,39	833,01	548,87	588,11
(h)	Recarga de aquífero profundo	18,18	18,18	18,18	18,18

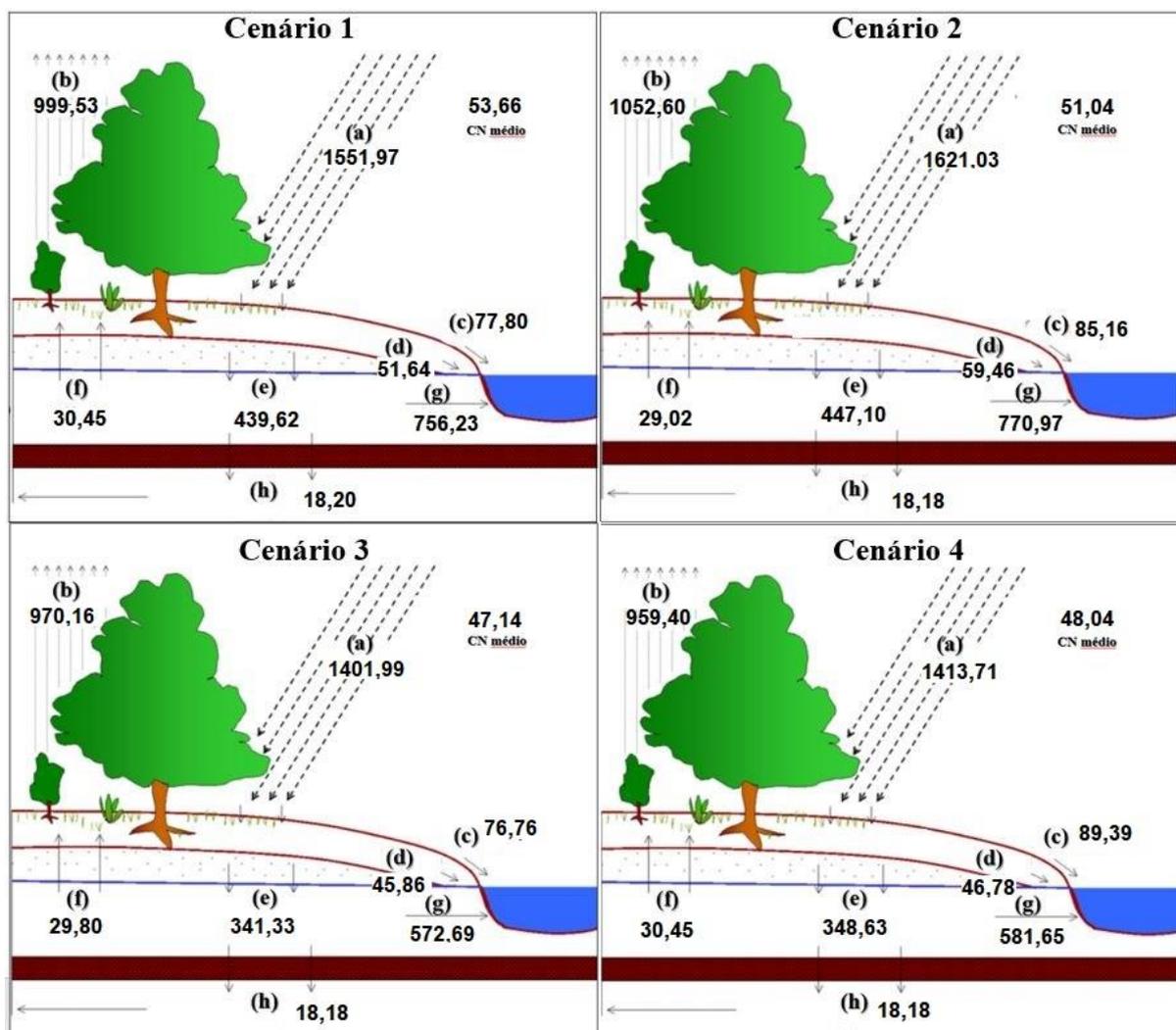


Figura 88 - Ciclo hidrológico simulado pelo SWAT+ nos 4 cenários de usos distintos da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador (DF).

Tabela 37 - Valores simulados (mm) de parâmetros componentes do ciclo hidrológico médio da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador (DF) para cada cenário de uso do solo.

Bacia Hidrográfica - Ribeirão Rodeador					
	Componente do Ciclo Hidrológico	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
(a)	Precipitação	1551,97	1621,03	1401,99	1413,71
(b)	Evapotranspiração	999,53	1052,60	970,16	959,4
(c)	Escoamento Superficial	77,80	85,16	76,76	89,39
(d)	Escoamento Sub-superficial	51,64	59,46	45,86	46,78
(e)	Percolação	439,62	447,10	341,33	348,63
(f)	Capilaridade	30,45	29,02	29,80	30,48
(g)	Fluxo de retorno	756,23	770,97	572,69	518,65
(h)	Recarga de aquífero profundo	18,20	18,18	18,18	18,18

As proporções e valores de cada componente do ciclo hidrológico obtidos assemelham-se em sua maioria aos resultantes do estudo de Ferrigo (2012), que simulou, dentre outras bacias hidrográficas afluentes do reservatório Descoberto, as duas bacias objetos desse estudo no período de 2005 a 2013. Diferencia-se os valores absolutos obtidos, principalmente os referentes ao escoamento sub-superficial, percolação e taxas de evapotranspiração, contudo isso pode ser explicado pelo período simulado que é distinto em cada cenário, o que interfere diretamente nas médias resultantes.

Ferreira (2021) obteve valores de evapotranspiração que variam de 737 a 995 mm, a partir da simulação no SWAT de uma bacia hidrográfica no cerrado com média incidência de áreas protegidas, utilizando de diversas metodologias de cálculo de evapotranspiração potencial e com precipitação similar as bacias hidrográficas deste estudo (1481 mm). Já Castro (2013), obteve uma média de evapotranspiração de 620 mm do total precipitado, em uma bacia hidrográfica de intensa produção agrícola e baixa incidência de áreas de vegetação nativa, porém com precipitação inferior a observada neste estudo (1103 mm).

Verifica-se que a evolução do uso e ocupação do solo apresentadas pelos cenários, com tendência de crescimento de atividades antrópicas e a diminuição de áreas de cobertura vegetal naturais, correlaciona-se com os resultados do balanço hídrico e dos componentes do ciclo hidrológico.

A diminuição de áreas de cobertura vegetal pode ser considerada a principal causa do decaimento das taxas de evapotranspiração das bacias no decorrer dos anos. A urbanização de áreas e a fragmentação de propriedades rurais correlaciona-se com o aumento considerável do escoamento superficial e com a diminuição da percolação.

Também são observados nessa linha do tempo, resultados relativos à contribuição da descarga dos aquíferos nos cursos d'água, também verificado no estudo referente a águas subterrâneas da bacia do Rodeador realizado por Araújo (2018). Isso demonstra que a melhoria e a consistência de áreas naturais interferem diretamente no fluxo do escoamento subterrâneo e sub-superficial, o que impacta na regularidade das vazões disponíveis nos mananciais superficiais durante todo o ano hidrológico. Ressalta-se que o cenário 2 (1980) apresentou valores superiores ao cenário 1 (1964) quanto a esses dois componentes, contudo, aquele cenário foi o que apresentou o maior valor médio de precipitação, chegando a 1621 mm na bacia do Rodeador e 1600 mm na bacia do Capão Comprido, sendo que a precipitação média anual de ambas as bacias não alcança 1500 mm. Essa variação na precipitação corrobora no aumento proporcional dos demais componentes do ciclo hidrológico, inclusive nas taxas

contínuas de percolação, resultando na possível saturação do solo de forma mais contínua, diminuindo a água infiltrada e aumentando as taxas de escoamento superficial.

Percebe-se um mesmo padrão de valores em ambas as bacias e em todos os cenários no que se refere à recarga de aquífero profundo. Isso pode ser motivado pelo fato desses aquíferos só receberem recarga na sua área de afloramento (fraturas) e também pelo equacionamento do SWAT, em que a recarga do aquífero profundo é resultante de um coeficiente de percolação baseado nas características pedo/geológicas. Ressalta-se que a água de recarga de aquífero profundo não é ponderada nos futuros cálculos hídricos da bacia, sendo considerada como uma perda no sistema (Nietsch *et al.*, 2011). Visando melhores resultados na simulação de águas subterrâneas no modelo, recomenda-se sua integração com outros modelos voltados especificamente para água subterrânea, como o MODFLOW (Pereira, 2018; Araújo, 2018).

Salienta-se que a simulação dos cenários não abordou as captações superficiais e subterrâneas de água, as quais, seguramente, impactam expressivamente no balanço hídrico das bacias, principalmente nas vazões dos cursos d'água disponíveis (captações superficiais) e na influência no volume de águas subterrâneas (aquíferos fraturado e poroso).

## **5.4 PARAMETRIZAÇÃO DE BANCO DE DADOS SWAT**

### **5.4.1 Fertilizantes (*Fertilizer Database*)**

A Tabela 38 apresenta a base de dados construída para utilização no modelo SWAT+, conforme levantamento dos fertilizantes nitrogenados e fosforados mais usualmente recomendados e aplicados no Distrito Federal.

Ressalta-se que a composição química do COL e do Lodo de esgoto são oriundas das médias dos valores de Nitrogênio Amoniacal e Nitrogênio Kjeldahl, Ortofósforos e Fósforo Total, além da relação referente às proporções minerais e orgânicas dos elementos. Utilizou-se três análises físico-químicas de leiras do composto de lixo distintas e informação de composição dos lodos de esgotos proveniente de duas análises laboratoriais de dois lotes de lodo (2017 e 2018). Verificou-se notável diferença entre os teores de nitrogênio total, amônia e fósforo total quando se compara entre si os lotes de lodo de esgoto e as leiras de COL, o que manifesta a alta heterogeneidade entre eles.

Tabela 38 - Base de dados de fertilizantes configurada para utilização no SWAT+ na região.

Descrição	Código SWAT	FMIN N	FMIN P	FORG N	FORG P	FNH3 N
02-20-18	02-20-18	0.020	0.088	-	-	-
04-14-08	04-14-08	0.040	0.062	-	-	-
04-30-16	04-30-16	0.040	0.132	-	-	-
05-25-15	05-25-15	0.050	0.110	-	-	-
10-10-10	10-10-10	0.100	0.044	-	-	-
20-00-20	20-00-20	0.200	-	-	-	-
Ácido fosfórico	ACID_FOS	-	0.176	-	-	-
Fosfito de potássio	FOSF_P	-	0.118	-	-	-
Nitrato de cálcio	NITRT_CA	0.150	-	-	-	-
Nitrato de potássio	NITRT_PO	0.130	-	-	-	-
Salitre potássico do Chile	SALITRE	0.150	-	-	-	-
Sulfato de amônio	SULF_NH3	0.200	-	-	-	-
Superfosfato Simples	SUPERFOS	-	0.079	-	-	-
Termofosfato	TERMFOFOS	-	0.079	-	-	-
Ureia	UREIA	0.440	-	-	-	-
Cama de frango	CAM_FRA	0.010	0.004	0.030	0.030	0.990
Esterco de bovinos	EST_BOV	0.010	0.004	0.030	0.009	0.990
Esterco de suínos	EST_SUIN	0.026	0.011	0.019	0.007	0.990
Composto de Lixo Urbano	COL	0.004	0.016	0.016	0.060	-
Lodo de esgoto	LODO	0.002	0.002	0.023	0.015	-
Composto de poda urbana	PODA	0.002	0.000	0.008	0.000	-
Bokashi	BOKASHI	0.005	0.010	0.018	0.041	-

FMINN: Fração de N mineral ( $\text{NO}_3$  e  $\text{NH}_4$ ) presente no fertilizante (kg min-N/kg fertilizante)

FMINP: Fração de P mineral presente no fertilizante (kg min-P/kg fertilizante)

FORGN: Fração de N orgânico presente no fertilizante (kg org-N/kg fertilizante)

FORGP: Fração de P orgânico presente no fertilizante (kg org-P/kg fertilizante)

FNH3N: Fração de N mineral presente no fertilizante aplicada como amônia (kg  $\text{NH}_3$ -N/kg fertilizante)

#### 5.4.2 Implementos Agrícolas (*Tillage Database*)

O Apêndice C foi construído visando apresentar um catálogo dos implementos agrícolas exemplificado com imagens retiradas da internet e tradução livre de seus nomes, de forma que auxilie na identificação mais eficaz para configuração de base de dados de novos estudos, baseado no que o *Appendix A* (ARNOLD *et al.*, 2016) da documentação oficial do SWAT e ASAE (1998b).

A partir do cruzamento das informações desse catálogo e o levantamento dos implementos mais habitualmente utilizados na região do Distrito Federal, configurou-se a base de dados *tillage\_til*, conforme apresentado na Tabela 39.

Tabela 39 - Base de dados de implementos agrícolas utilizados no DF configurada para o SWAT+ na região de estudo.

Implemento	Código SWAT	EFFMIX	DEPTIL	RANRNS
Enxada	ENXADA	0.10	5	13
Arado	ARADO	0.85	100	50
Arado aiveca	AIVECA	0.95	150	30
Grade	GRADE	0.55	100	40
Escarificador	ESCARIF	0.30	150	20
Subsolador	SUBSOLA	0.45	350	15
Rolo faca (plantio direto)	ROLOFACA	0.20	25	5
Semeadora	SEMEADOR	0.70	100	-
Enxada rotativa	ROTATIVA	0.80	5	13
Encanteirador de rolo	ENCROLO	0.25	50	5
Encanteirador de disco	ENCDISCO	0.55	150	35
Rotoencanteirador	ENCROTO	0.55	150	30
Sulcadora	SULCADO	0.70	100	13
Roçadeira	ROCADE	0.30	100	15

EFFMIX: Eficiência de mistura / DEPTIL: Profundidade de mistura (mm) / RANRNS: Rugosidade (mm).

#### 5.4.3 Irrigação (*Irrigation Database*)

A parametrização referente a irrigação foi dividida em duas bases de dados distintas embasadas na eficiência dos sistemas de irrigação. A Tabela 40 refere-se à eficiência de irrigação considerada ideal e presente na Resolução 18/2020 da Adasa (ADASA, 2020).

Tabela 40 - Base de dados referente à irrigação ideal configurada para o SWAT+ na região de estudo.

IRRIGAÇÃO IDEAL							
Descrição	Código SWAT	EFF	SURQ	DEP_MM	SALT	NO3	PO4
Aspersão convencional	ASPERSAO	0.8	0.1	0	0	0	0
Pivô Central	PIVO	0.85	0.1	0	0	0	0
Gotejamento	GOTEJO	0.9	0	0	0	0	0
Sulco	SULCO	0.6	0.2	100	0	0	0
Microaspersão	MICRO	0.85	0.05	0	0	0	0

EFF: Eficiência do sistema de irrigação (0-1) / SURQ: Taxa de escoamento superficial (0-1) / DEP\_MM: Profundidade da irrigação (mm) / SALT: Concentração de sal (mg/Kg - ppm) / NO3: Concentração de NO3 - nitrato (mg/Kg - ppm) / PO4: Concentração de PO4 - fosfato (mg/Kg - ppm)

A Tabela 41 considera a eficiência atual dos sistemas, construída junto aos engenheiros agrônomos da Emater-DF.

Tabela 41 - Base de dados referente à irrigação atual configurada para o SWAT+ na região.

IRRIGAÇÃO ATUAL							
Descrição	Código SWAT	EFF	SURQ	DEP_MM	SALT	NO3	PO4
Aspersão convencional	ASPERSAO	0.60	0.15	0	0	0	0
Pivô Central	PIVO	0.85	0.10	0	0	0	0
Gotejamento	GOTEJO	0.85	0.05	0	0	0	0
Sulco	SULCO	0.60	0.20	100	0	0	0
Microaspersão	MICRO	0.80	0.10	0	0	0	0

EFF: Eficiência do sistema de irrigação (0-1) / SURQ: Taxa de escoamento superficial (0-1) / DEP\_MM: Profundidade da irrigação (mm) / SALT: Concentração de sais (mg/Kg - ppm) / NO3: Concentração de NO<sub>3</sub> - nitrato (mg/Kg - ppm) / PO4: Concentração de PO<sub>4</sub> - fosfato (mg/Kg - ppm)

As concentrações de sais, nitrato e fosfato não foram definidas, visto que essas concentrações podem variar pela qualidade da água utilizada como a fonte principal e, igualmente, pode ser configurada nos casos onde há fertirrigação.

#### 5.4.4 Práticas de Conservação do Solo (*Management Database*)

A Tabela 42, retratada a seguir, expressa as práticas de manejo habitualmente empregadas na região e seu valor P (prática de manejo agrícola e conservação do solo) considerando as classes gerais das culturas estipuladas por esse estudo. Ressalta-se que a parametrização dessas práticas embasou-se principalmente em valores estabelecidos na região pelo edital do Projeto Produtor de Água do Pipiripau (ADASA, 2021), considerando, também, considerando os valores contidos no manual do SWAT+ (ARNOLD *et al.*, 2016).

Tabela 42 - Práticas de manejo do solo e valores P da EUPS.

Descrição	Código SWAT	PFAC
Convencional	convenc	1.00
Rotação de culturas	rotacao	1.00
Plantio em nível (0-2%)	nivel_0_2	0.30
Plantio em nível (2-8%)	nivel_2_8	0.50
Plantio em nível (8-12%)	nivel_8_12	0.60
Plantio em nível (12-20%)	nivel_12_20	0.90
Terraços (0-2%)	terracos_0_2	0.12
Terraços (2-8%)	terracos_2_8	0.25
Terraços (8-12%)	terracos_8_12	0.25
Terraços (12-20%)	terracos_12_20	0.40
Plantio Direto	plant_direto	0.10
Faixas vegetativas	faixas	0.30

PFAC: Fator de Prática de Manejo Agrícola da EUPS.

#### 5.4.5 Crescimento de Plantas (*Plant Growth Database*) e Urbano (*Urban Database*)

A base de dados urbana e também a de crescimento de plantas, formadas a partir do agrupamento de bases de dados já existentes (FERRIGO, 2012; ARNOLD *et al.*, 2016; FERNANDES *et al.*, 2012), encontra-se no Apêndice D, o qual exhibe as principais espécies cultivadas na região (item 5.2.2 - Perfil Agrícola) e também a base de classes gerais de uso concebida para esse estudo e evidenciada no item 5.2.3 referente ao uso do solo. A Tabela 16 resume as culturas, as classes de vegetação nativa e aspectos urbanos aplicadas para a modelagem das bacias.

#### 5.4.6 Aplicação de banco de dados adaptado e análise dos resultados

A análise da aplicação de banco de dados SWAT+ adaptado adotou como uso do solo as culturas agrícolas específicas mais comuns na região (Tabela 16) e não mais as classes de cultivo, as quais foram subdivididas. Assim, as classes de uso do solo passaram de 10 classes gerais para 25 culturas específicas no total. Inseriu-se no modelo os principais fertilizantes químicos nitrogenados e fosfatados aplicados em cada espécie de cultivo (Apêndice A).

A separação das classes de cultivo por espécies cultivadas resultou em um número diferente de HRUs em cada uma das bacias hidrográficas, como relatado na tabela 43. Ressalta-se que, para a simulação da aplicação do banco de dados, foi utilizado como referência o uso do solo do ano de 2019 (Cenário 4).

Tabela 43 - Quantidade de Unidades de Resposta Hidrológica por divisão e subdivisão de classe de uso.

Uso do solo	Capão Comprido	Rodeador
Classes gerais de uso do solo	1.748	6.848
Subdivisão em cultivos agrícolas específicos	3.697	14.212

Enfatizou-se a análise dos ciclos de nutrientes no SWAT+, devido a inserção de fertilizantes, de forma a possibilitar uma análise comparativa dos resultados com o uso do banco de dados adaptado. Como a calibração por qualidade não obteve o sucesso desejado, a análise empregada baseou-se, precipuamente, na comparação dos componentes do ciclo de cada nutriente e seu comportamento nos exutórios das bacias, em substituição à análise de valores absolutos obtidos ao final do processo de modelagem.

As tabelas 44 e 45 apresentam os valores médios observados pelo período simulado referente às principais respostas dos componentes do ciclo de nitrogênio e do ciclo de fósforo,

respectivamente.

Tabela 44 - Valores em kg/ha de componentes do Ciclo do Nitrogênio.

<b>Ciclo do Nitrogênio (Kg/ha)</b>					
<b>Componentes</b>		<b>Capão Comprido</b>		<b>Ribeirão Rodeador</b>	
		<b>Padrão</b>	<b>Adaptado</b>	<b>Padrão</b>	<b>Adaptado</b>
(a)	Mineralização	0,99	7,76	1,24	9,09
(b)	Desnitrificação	0,78	1,59	0,99	1,94
(c)	Absorção da planta	0,01	0,07	0,01	0,10
(d)	Transição entre estável e ativo	-12,27	-10,79	-12,24	-10,42
(e)	Total de N	0	22,81	0	28,06

Tabela 45 - Valores em kg/ha de componentes do Ciclo do Fósforo.

<b>Ciclo do Fósforo (Kg/ha)</b>					
<b>Componentes</b>		<b>Capão Comprido</b>		<b>Ribeirão Rodeador</b>	
		<b>Padrão</b>	<b>Adaptado</b>	<b>Padrão</b>	<b>Adaptado</b>
(a)	P Fertilizante Orgânico	0,08	0,08	0,05	0,04
(b)	Mineralização	0,51	1,20	0,62	1,62
(c)	P Fertilizante Inorgânico	-0,24	4,18	-0,27	3,82
(d)	Transição entre estável e ativo	-0,32	3,33	-0,32	3,09
(e)	Total de P	0	15,16	0	15,19

Mesmo na simulação com dados considerados “padrão”, ou seja, no qual não foram definidas contribuições via fertilizantes, há a incidência de valores iniciais de ambos nutrientes. Isso se explica, pois, o próprio SWAT define valores padrão relativos aos níveis iniciais comuns dos reservatórios de nitrogênio e fósforo, quando esses não são definidos manualmente.

Verifica-se a variação dos valores entre o banco de dados “padrão” e o “adaptado” em ambas bacias e no ciclo de ambos elementos. Entretanto, os índices observados para o ciclo do nitrogênio se mostraram mais significativos do que quando comparado com o ciclo do fósforo, isso pode ser justificado devido à composição química dos fertilizantes dispostos e também a quantidade introduzida do mesmo. Essa dissemelhança pode ser percebida na Tabela 38 e igualmente no apêndice A. Ressalta-se ainda que o nitrogênio é considerado um elemento altamente reativo, o que impacta na sua mobilidade entre os reservatórios.

Examinando os componentes do ciclo do nitrogênio, identifica-se que a aplicação de fertilizantes nitrogenados afeta diretamente seus níveis e valores totais. A bacia do Capão Comprido recebeu a taxa média de 22,81 kg/ha, sendo que cerca de 30% foi mineralizado e a absorção da planta aumentou em 7 vezes quando confrontado com o “padrão”. A bacia do Rodeador apresentou a média de 28,06 kg/ha de nitrogênio total, sendo também por volta de

30% mineralizado e quase 40% fixado e a absorção da planta aumentou em 10 vezes. Percebe-se, ainda, a alta mobilidade do elemento quando observado os valores de transição de estável para ativo.

Quanto aos componentes do ciclo do fósforo, não foram observadas disparidades consideráveis nas taxas de fósforo orgânico, porém quando analisado os valores referentes ao inorgânico esses são bastante significativos. As taxas mineralizadas aproximam-se de 10% do total aplicado, sendo que a aplicação de fertilizantes fosfatados na bacia do Capão Comprido apresenta taxa média de 15,16 kg/ha e na bacia do Rodeador 15,19 kg/ha. A baixa mobilidade do elemento é capaz de ser reparada pelos valores de transição de estável para ativo.

Quando observado as concentrações de nitrogênio total e fósforo total no exutório do curso d'água principal de cada bacia (córrego Capão Comprido e ribeirão Rodeador), igualmente se faz perceptível a variação dos valores quando comparado o retorno da simulação de cada banco de dados utilizado.

As figuras 89 a 92 apresentam a carga mensal total de nitrogênio e a sua média mensal entre o período de 2010 e 2020, no exutório da bacia.

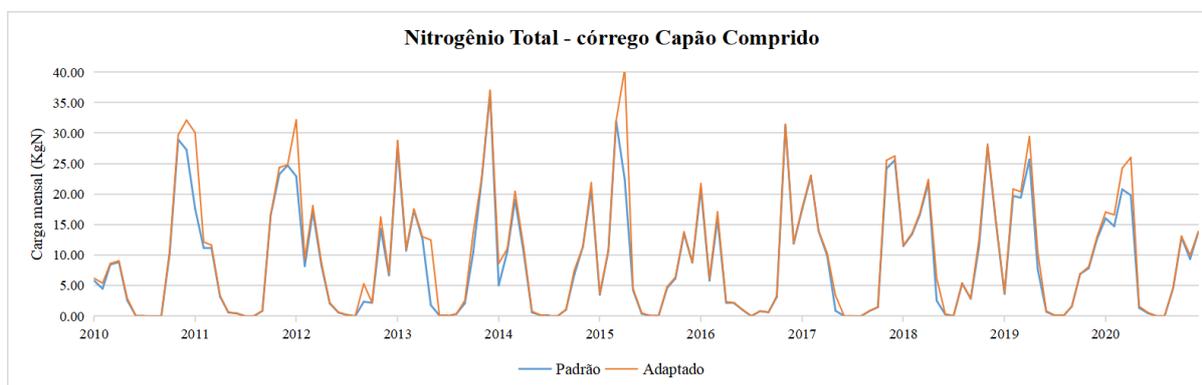


Figura 89- Gráfico comparativo das cargas mensais de nitrogênio total (Kg) entre os anos 2010 a 2020 - córrego Capão Comprido.

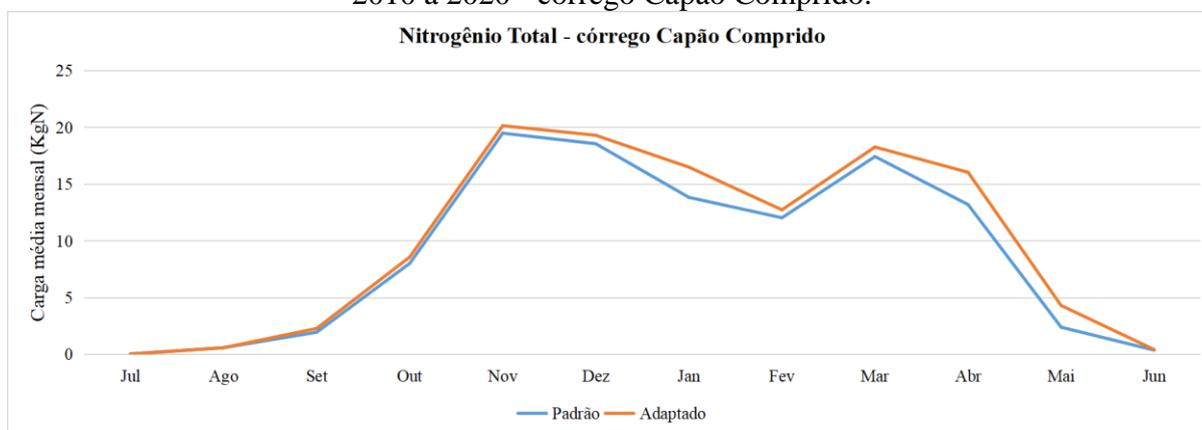


Figura 90 - Gráfico comparativo das cargas médias mensais de nitrogênio total (Kg) entre os anos 2010 a 2020 - córrego Capão Comprido.

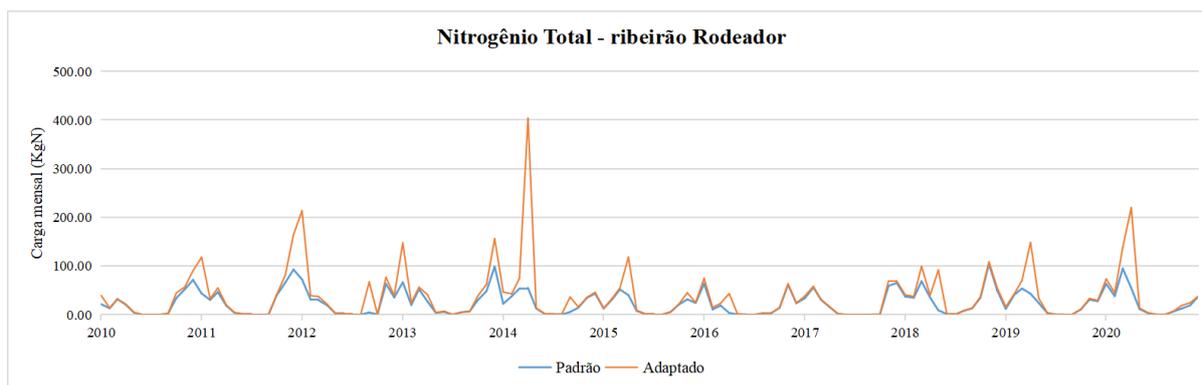


Figura 91 - Gráfico comparativo das cargas mensais de nitrogênio total (Kg) entre os anos 2010 a 2020 – ribeirão Rodeador.

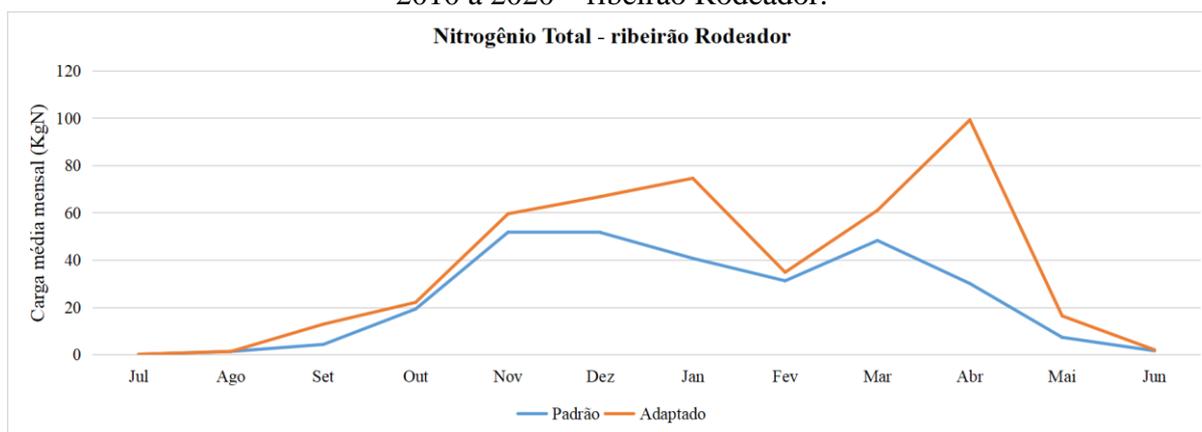


Figura 92 - Gráfico comparativo das cargas médias mensais de nitrogênio total (Kg) entre os anos 2010 a 2020 – ribeirão Rodeador.

Nota-se que, quando se insere o uso de fertilizantes, as cargas totais de nitrogênio são mais significativas, apresentando picos acentuados e pontuais, ocorrendo em dimensões diferentes ao decorrer dos anos, contudo apresentando o mesmo padrão de comportamento, com curva mais elevada durante o período chuvoso.

As figuras 93 a 96 apresentam a carga mensal total de nitrogênio e a sua média mensal entre o período de 2010 e 2020, no exutório das bacias.

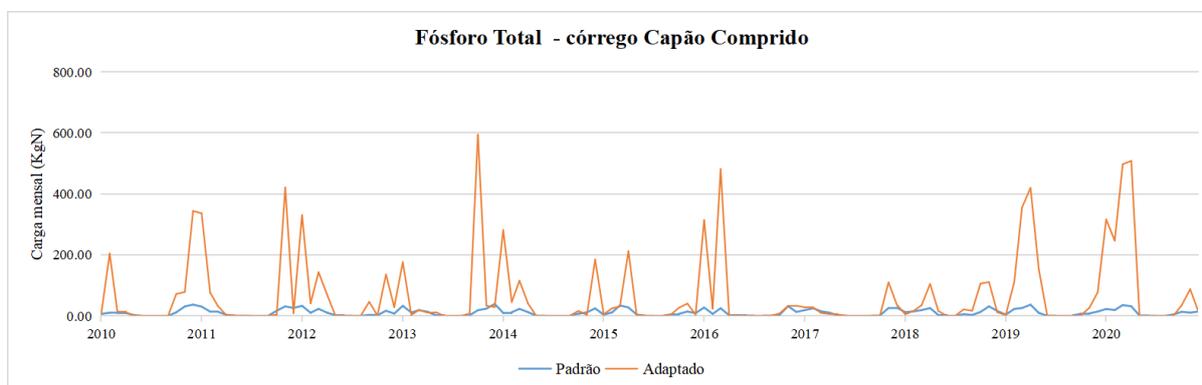


Figura 93- Gráfico comparativo das cargas mensais de fósforo total (Kg) entre os anos 2010 a 2020 - córrego Capão Comprido.

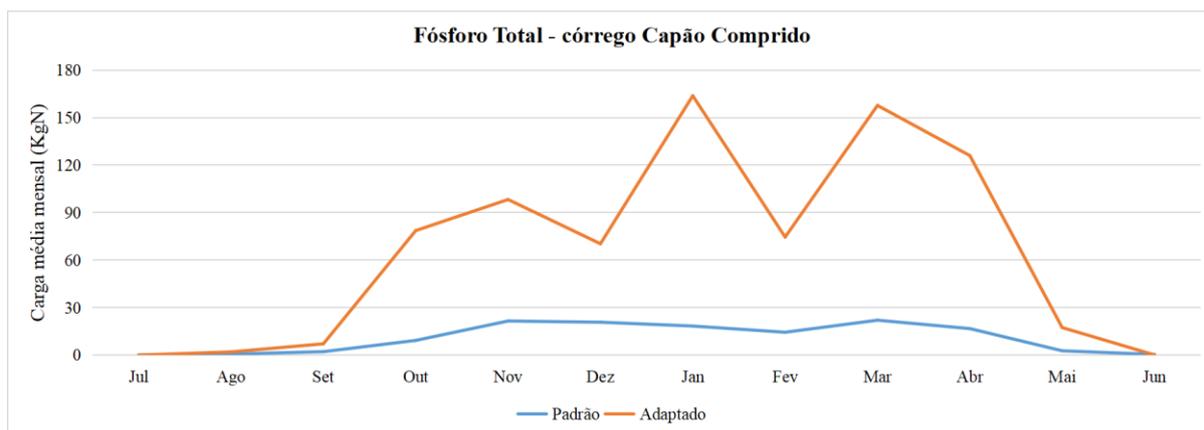


Figura 94 - Gráfico comparativo das cargas médias mensais de fósforo total (Kg) entre os anos 2010 a 2020 - córrego Capão Comprido.

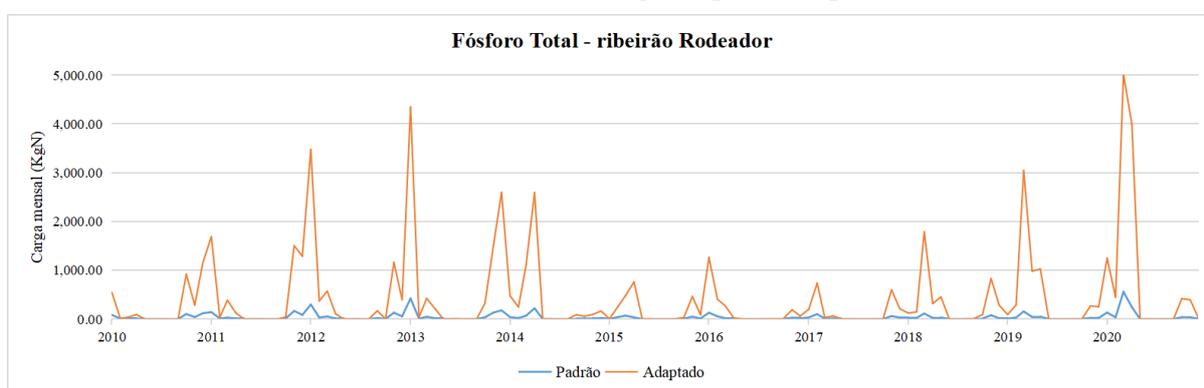


Figura 95 - Gráfico comparativo das cargas mensais de fósforo total (Kg) entre os anos 2010 a 2020 – ribeirão Rodeador.

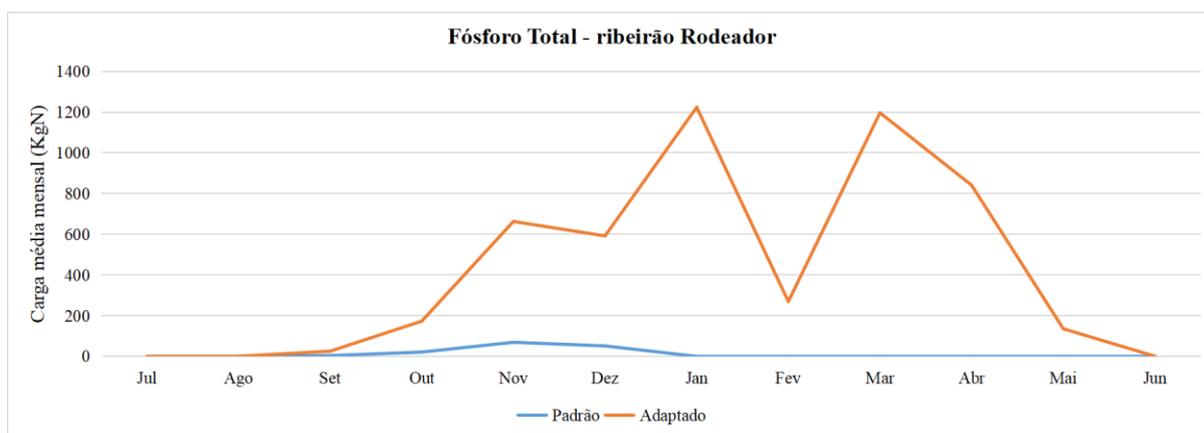


Figura 96 - Gráfico comparativo das cargas médias mensais de fósforo total (Kg) entre os anos 2010 a 2020 – ribeirão Rodeador.

No que tange às cargas de fósforo, essas apresentaram valores ainda mais elevados quando comparado o uso dos diferentes bancos de dados, ostentando picos extremamente acentuados de cargas mensais acumuladas quando inseridas as informações de uso de fertilizantes. A curva apresenta acentuação no início do período chuvoso, com dois picos principais nos meses de janeiro e março, que podem ser correlacionados à alta das precipitações e,

consequentemente, à elevação das vazões disponíveis. Após o período chuvoso ocorre o declive que também é enfático, tendendo a concentrações com valores próximos a zero.

Acredita-se que os picos mensais elevados (constando valores de 3 a 5 mil Kg de P nos meses de janeiro, março e abril no ribeirão Rodeador) sejam equivocados e possam decorrer de incorreções ou distorções no processo de modelagem, possivelmente resultantes da inserção, pelo modelo, do momento da aplicação do fertilizante, pois o mesmo considera uma aplicação direta e única, a depender da redução do nutriente disponível no solo, sendo que na agricultura, essa aplicação pode ser fracionada e em épocas diferentes a depender do cultivo agrícola.

Silva (2016) realizou análise similar de carga mensal de nutrientes, calculada por meio do modelo SWAT, provenientes da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador divididas em nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato e fósforo total. A apreciação dos padrões temporais dos nutrientes foi equivalente, com cargas baixas e picos no período de chuva e ocorrendo diferenças significativas nas magnitudes e nas durações dos picos ao longo dos anos.

Salienta-se que ambas bacias deste estudo são contribuintes de um ambiente lântico e de relevante interesse comum que é o Reservatório do Descoberto, que tem seu uso voltado para o abastecimento público de significativa parcela da população do DF. Assim, aconselha-se a utilização racional e congruente de fertilizantes na região, visto que sua utilização imprópria pode alterar os níveis de nitrogênio e fósforo no reservatório, acarretando em sua eutrofização e impossibilitando seu uso para o abastecimento humano ou aumentando o custo do tratamento da água para distribuição.

## **5.5 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE PRÁTICAS DE CONSERVAÇÃO DE SOLO**

### **5.5.1 Simulação do balanço hídrico de cenários conservacionistas e convencionais**

A simulação de cenários de práticas conservacionistas e convencionais contaram também com proposições de mudanças no uso do solo. As figuras 97 e 98 ilustram o cenário de uso do solo conservacionista (recuperação de APP, conservação de vegetação nativa e adoção de boas práticas) das bacias hidrográficas do Capão Comprido e do Rodeador, respectivamente, já as figuras 99 e 100 apresentam o cenário de continuidade de expansão de áreas de benfeitorias, apontando uma possível expansão urbana, e a não adoção de práticas aperfeiçoadas para o adequado uso do solo.

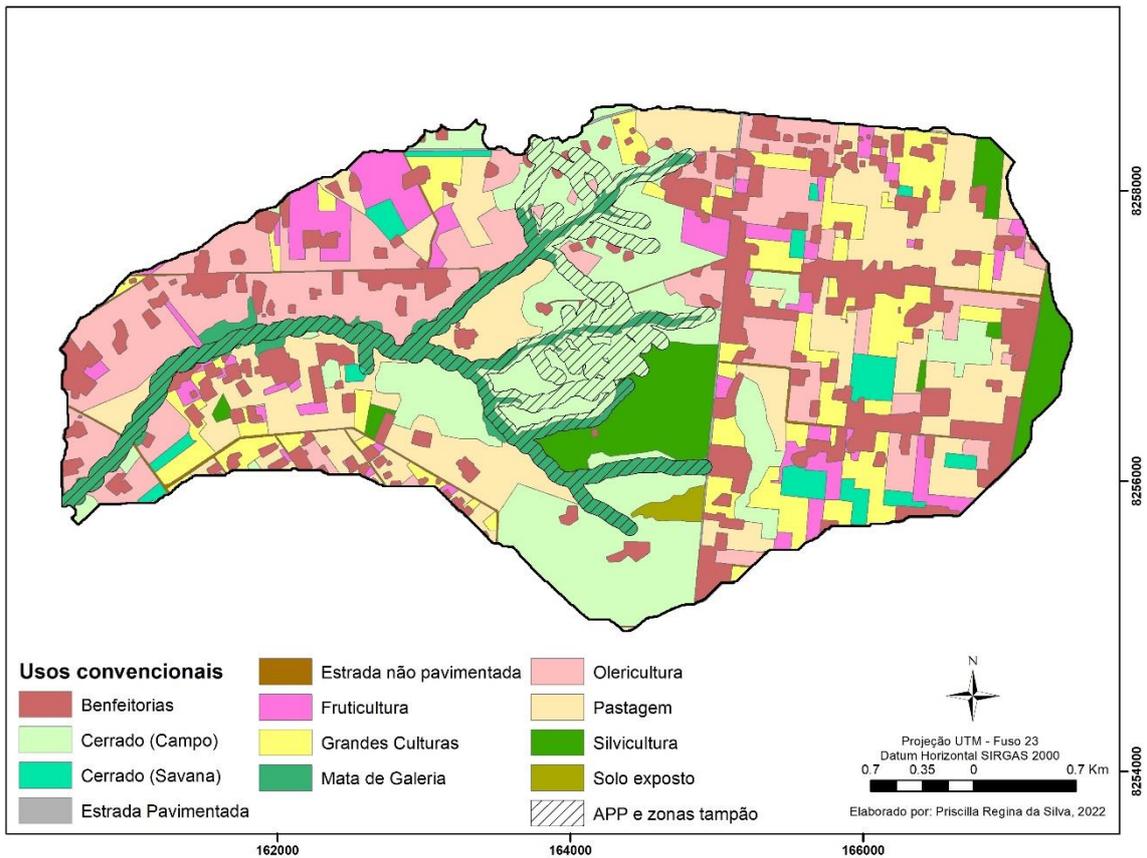


Figura 97 - Cenário de uso do solo com adição de práticas de conservação de água, solo e recuperação de vegetação nativa na bacia do córrego Capão Comprido (DF).

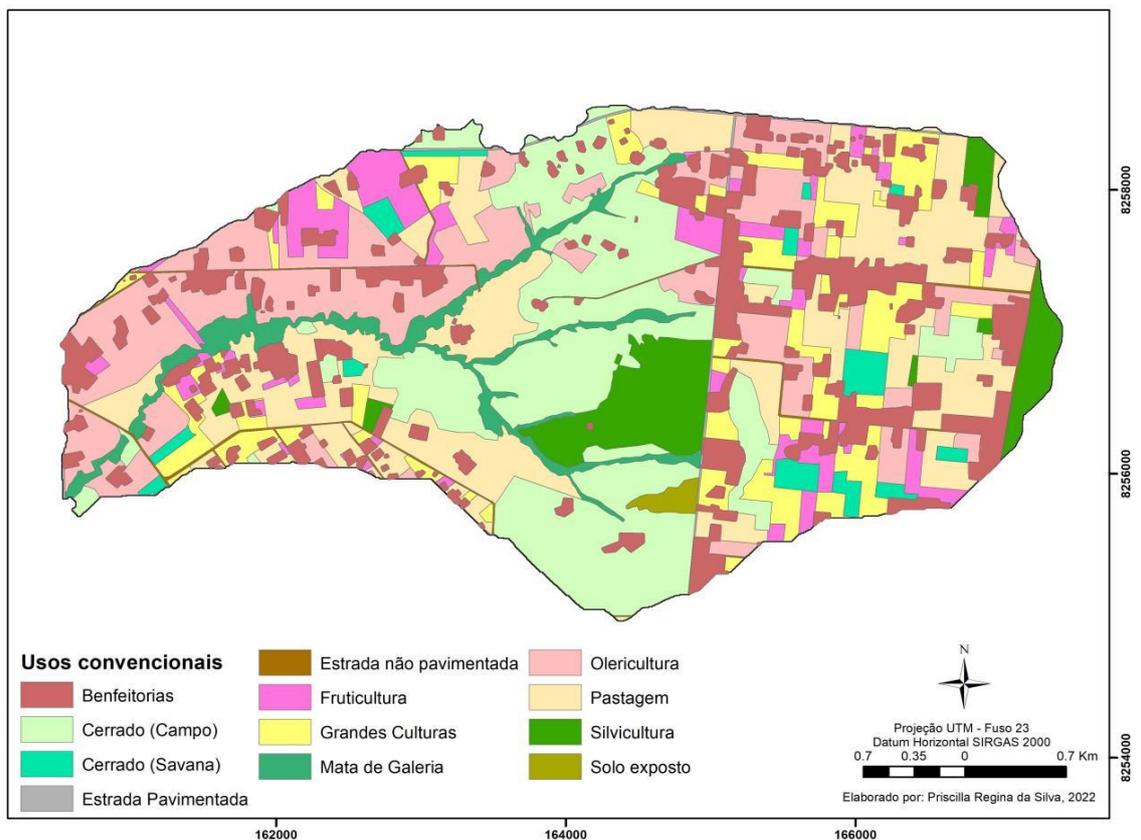


Figura 98 - Cenário de uso do solo com configuração de práticas convencionais de manejo de solo na bacia do córrego Capão Comprido (DF) e aumento de área urbanizada.

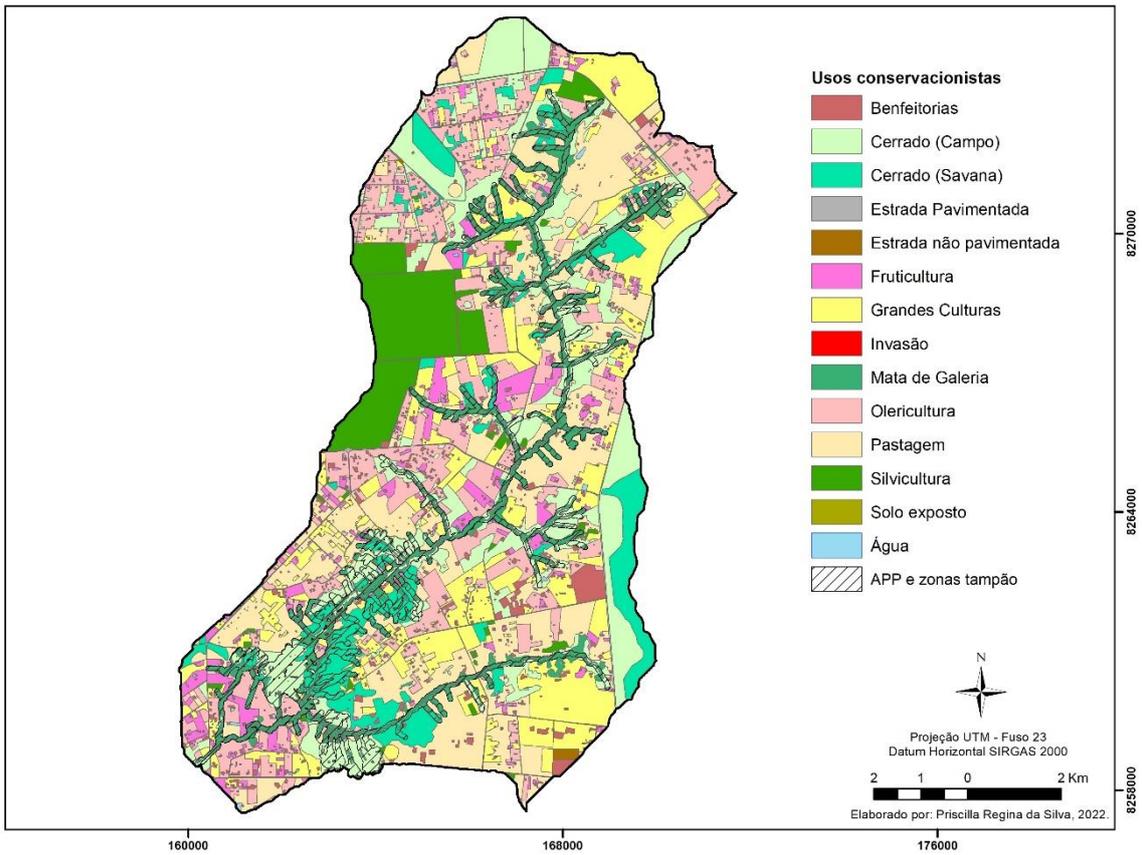


Figura 99 - Cenário de uso do solo com adição de práticas de conservação de água, solo e recuperação de vegetação nativa na bacia do ribeirão Rodeador (DF).

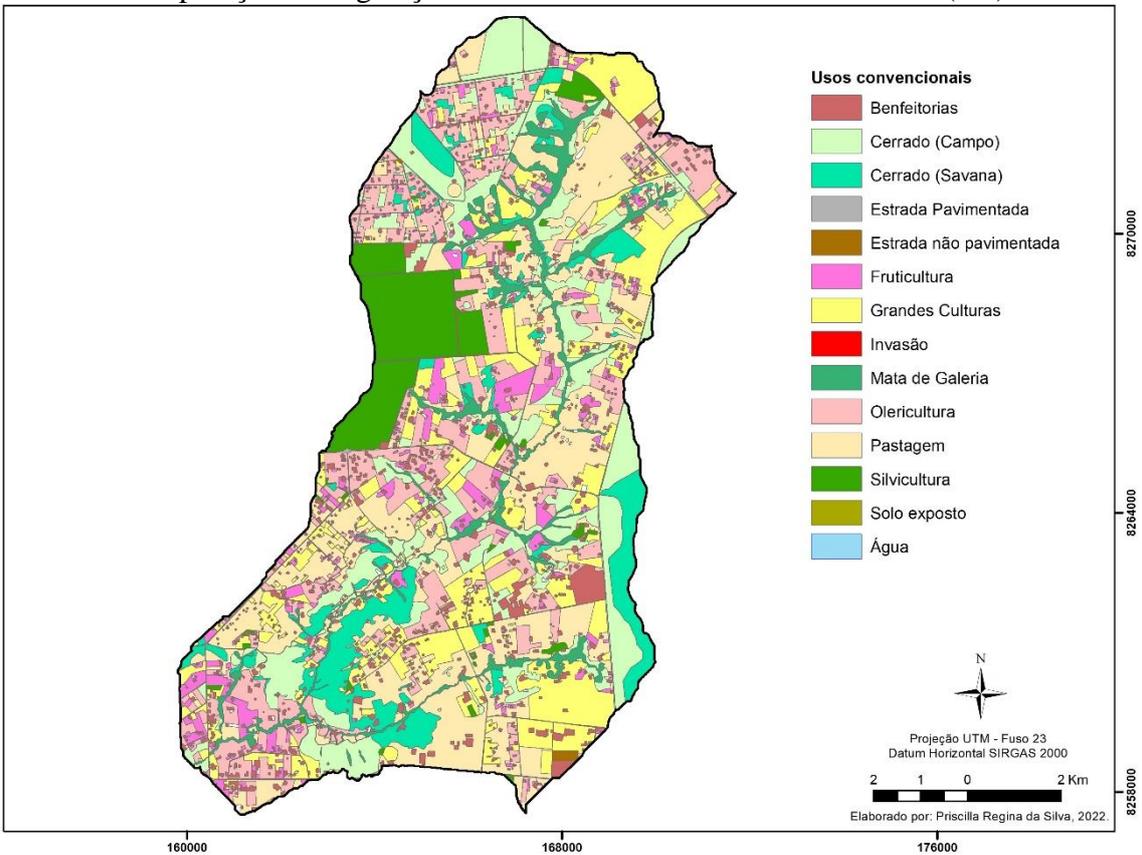


Figura 100 - Cenário de uso do solo com configuração de práticas convencionais de manejo de solo na bacia do ribeirão Rodeador (DF) e aumento de área urbanizada.

De modo geral, quando comparados o uso do solo dos dois cenários, observa-se o acréscimo de 3% nas áreas preservadas quando considerado o cenário conservacionista e 4% na cobertura de uso referente à infraestrutura, sobretudo as benfeitorias, no cenário convencional. Todavia, as áreas de uso agropecuário não sofreriam grandes alterações, mantendo seus percentuais de uso. As figuras 101 e 102 exibem as porcentagens de uso do solo para os cenários convencionais e conservacionistas de ambas as bacias.

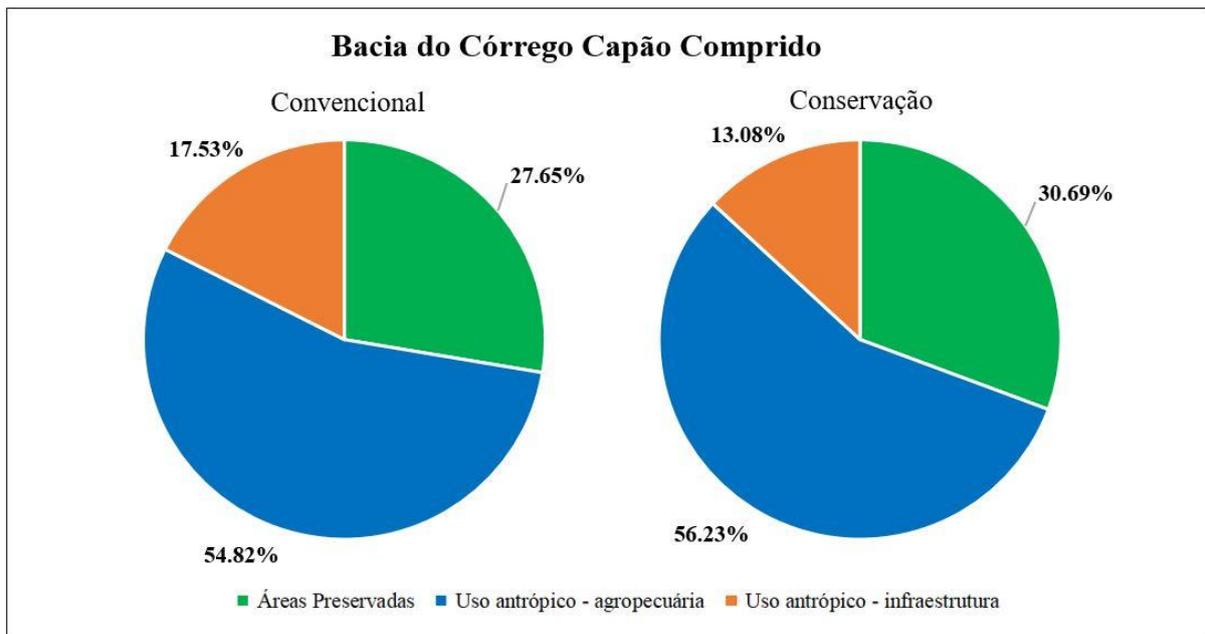


Figura 101 - Porcentagens de uso do solo para cenários convencional e conservacionista - Bacia hidrográfica Capão Comprido.

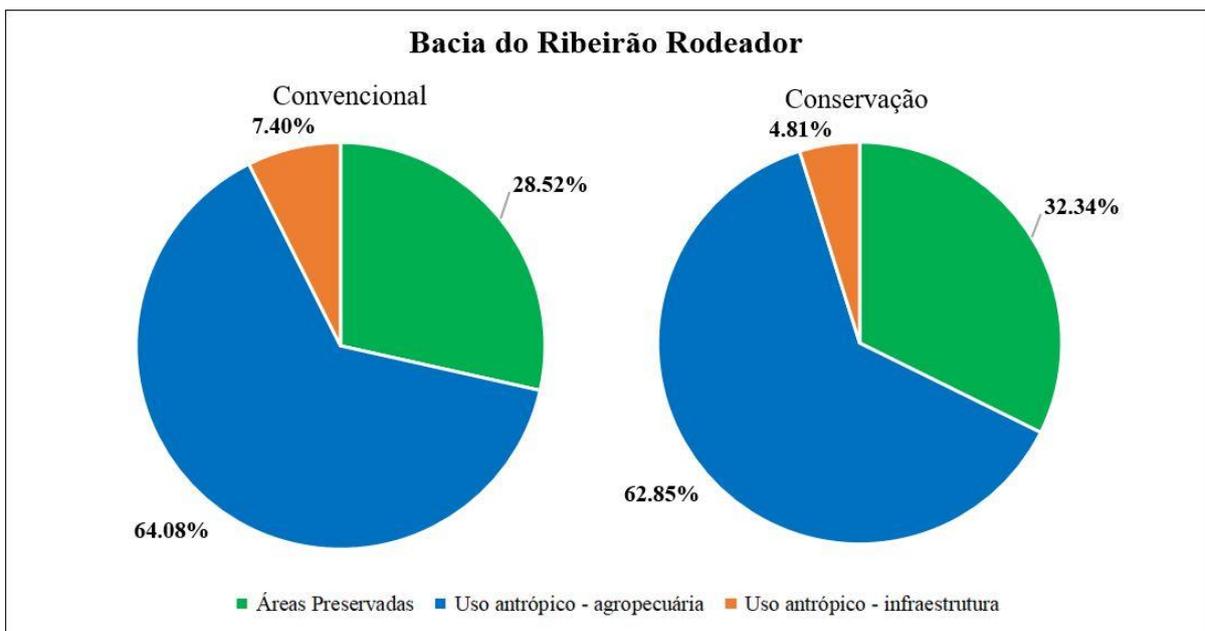


Figura 102 - Porcentagens de uso do solo para cenários convencional e conservacionista - Bacia hidrográfica ribeirão Rodeador.

Acerca da simulação hidrológica, de forma a proporcionar uma visão prospectiva da evolução das bacias hidrográficas, o período aplicado para a execução do modelo abordou o intervalo do começo do ano de 2006 ao final do ano de 2030, focando seus resultados aqui apresentados no intervalo de janeiro de 2020 a dezembro de 2030, precipuamente em valores médios anuais e mensais.

Ressalta-se que a adição de informações relativas ao uso de fertilizantes fosfatados e nitrogenados foi exitosa, bem como a configuração de práticas de manejo. Contudo, a configuração dos parâmetros de irrigação entre ideal e atual, bem como a incorporação de dados de captação de água não foram bem-sucedidas devido a falhas estruturais do próprio modelo que não foram sanadas pela equipe SWAT+ a tempo.

A resposta das simulações alusivas ao contraste dos cenários de práticas e manejo de cada bacia hidrográfica, no que tange aos componentes do ciclo hidrológico, podem ser observadas nas tabelas 46 e 48.

Tabela 46 - Valores simulados (mm) de parâmetros componentes do ciclo hidrológico da bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido (DF) para cenários conservacionista e convencional.

<b>Bacia Hidrográfica - Capão Comprido</b>				
	<b>Componente do Ciclo Hidrológico</b>	<b>Cenário Conservacionista</b>	<b>Cenário Convencional</b>	<b>Variação</b>
(a)	Precipitação	1408,5	1408,5	*
(b)	Evapotranspiração	955,02	920,59	-4%
(c)	Escoamento Superficial	149,94	195,1	30%
(d)	Escoamento Sub-superficial	53,94	54,58	1%
(e)	Percolação/Infiltração	260,66	249,69	-4%
(f)	Capilaridade	30,05	30,05	*
(g)	Fluxo de retorno	422,83	400,43	-5%
(h)	Recarga de aquífero profundo	23,43	22,32	-5%

Tabela 47 - Valores simulados (mm) de parâmetros componentes do ciclo hidrológico da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador (DF) para cenários conservacionista e convencional.

<b>Bacia Hidrográfica - Rodeador</b>				
	<b>Componente do Ciclo Hidrológico</b>	<b>Cenário Conservacionista</b>	<b>Cenário Convencional</b>	<b>Variação</b>
(a)	Precipitação	1414,41	1414,41	*
(b)	Evapotranspiração	1037,2	1013,84	-2%
(c)	Escoamento Superficial	67,71	95,94	42%
(d)	Escoamento Sub-superficial	57,43	55,85	-3%
(e)	Percolação/Infiltração	271,33	263,69	-3%
(f)	Capilaridade	29,96	29,96	*
(g)	Fluxo de retorno	439,49	429,25	-2%
(h)	Recarga de aquífero profundo	24,27	23,76	-2%

Tabela 48 - Razões entre componentes do balanço hídrico e ciclo hidrológico nos cenários conservacionista e convencional das bacias.

Razões (Balanço hídrico)	Capão Comprido		Rodeador	
	Conservacionista	Convencional	Conservacionista	Convencional
Deflúvio / Precipitação	0,44	0,46	0,40	0,41
Fluxo de base / Fluxo total	0,76	0,70	0,88	0,83
Escoamento superficial / Fluxo Total	0,24	0,30	0,12	0,17
Evapotranspiração / Precipitação	0,68	0,65	0,73	0,72

Percebe-se que o emprego de práticas conservacionistas impacta no aumento dos índices de evapotranspiração (2 a 4%), isso, presumivelmente, devido à conservação de vegetação nativa e recuperação de APPs e zona tampão, o que implica em um maior índice de cobertura vegetal. Da mesma maneira, verifica-se o incremento das taxas de percolação/infiltração do solo (3 a 4%) e inclusive na recarga do aquífero profundo (2 a 5%), podendo ser fundamentado pela adoção de técnicas como terraços, plantio direto e curvas de nível, os quais destinam-se exatamente para a diminuição da velocidade do escoamento superficial e a distribuição da água no solo de forma prolongada, o que contribui com a recarga dos aquíferos, como mostra os valores dos componentes atinentes às águas subterrâneas, inclusive impactando na recarga de aquífero profundo.

No que faz referência ao escoamento superficial, reforça-se a ocorrência de valor mais expressivo no cenário convencional do que no cenário conservacionista, com variação de 30 a 42%, em contraponto este último cenário possui maiores valores de percolação/infiltração e evapotranspiração, que corresponde por cerca 70% do total da água precipitada na bacia. Tal dado é extremamente relevante para a observação e suposição do comportamento hídrico de uma bacia hidrográfica, pois com valores de escoamento superficial superiores presume-se uma maior incidência de acontecimentos de eventos de cheias na época chuvosa e atenuação e decréscimo de vazões disponíveis nos cursos de água nos períodos de seca. Isto afeta diretamente atividades agropecuárias, principalmente àquelas que necessitam de acesso à água para garantia de produtividade, como é o caso da agricultura irrigada e a criação de animais.

Quando comparado os cenários conservacionista e convencional, quanto ao regime de vazões médias mensais dos exutórios de cada bacia hidrográfica, percebe-se valores mais acentuados no cenário convencional, como pode ser interpretado nas figuras 103 e 104, o que indica que em função da diminuição da infiltração nesse cenário, em consequência da maior compactação do solo, aumenta-se os níveis de escoamento superficial.

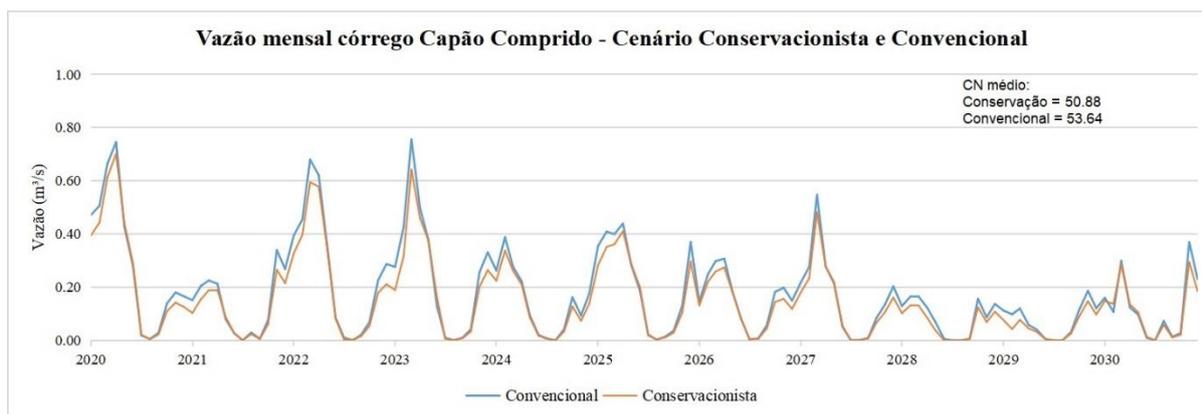


Figura 103- Vazão média mensal simulada para os cenários convencional e conservacionista para o período de 2020 a 2030 - bacia hidrográfica do Capão Comprido.



Figura 104- Vazão média mensal simulada para os cenários convencional e conservacionista para o período de 2020 a 2030 - bacia hidrográfica do Rodeador.

De modo geral, percebe-se em ambas as bacias que o comportamento da vazão do curso d'água comporta-se de maneira semelhante, com picos ligeiramente mais acentuados nos cenários convencionais.

Ressalta-se novamente que a vazão simulada não incluiu as captações de água e a utilização do recurso hídrico para irrigação, as quais impactam significativamente em seu comportamento. Araújo (2008) realizou a inserção de captações subterrâneas na modelagem da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador e observou o reflexo no hidrograma de fluxo de base, o qual se apresentou mais adequado às vazões observadas.

### 5.5.2 Visualização de resultados simulados – SWAT+

Com o propósito de conferir e examinar a ferramenta de visualização dos resultados oferecida pelo software SWAT+, efetuou-se a comparação dos cenários utilizando como base geoespacial os canais geolocalizados, as unidades de paisagem (LSU) e as unidades de respostas unitárias (HRU).

### 5.5.2.1 Canais de escoamento geolocalizados

A partir da apreciação dos resultados gerados em formato de canais geolocalizados, considerando valores médios anuais de vazão para o período de 2020 a 2030, não se verificou distinção visual relevante entre os cenários nas duas bacias, conforme exibido nas figuras 105 e 106 (Capão Comprido) e figuras 107 e 108 (Rodeador).

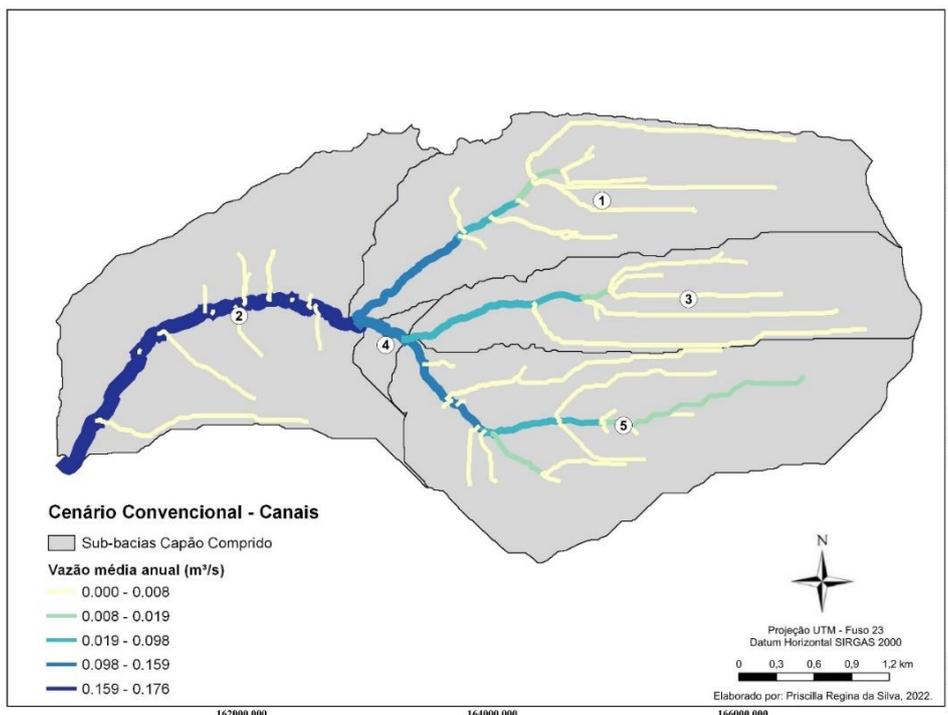


Figura 105 - Média anual (2020 a 2030) referente a valores de vazão de saída de cada canal - Bacia do Capão Comprido - Cenário Convencional.

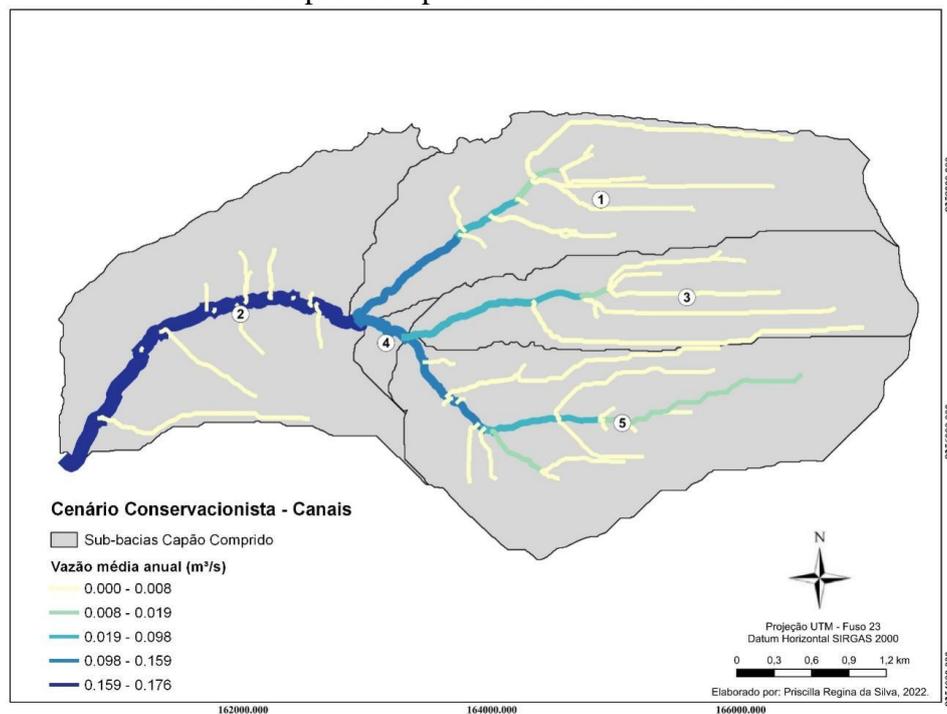


Figura 106 - Média anual (2020 a 2030) referente a valores de vazão de saída de cada canal - Bacia do Capão Comprido - Cenário Conservacionista.

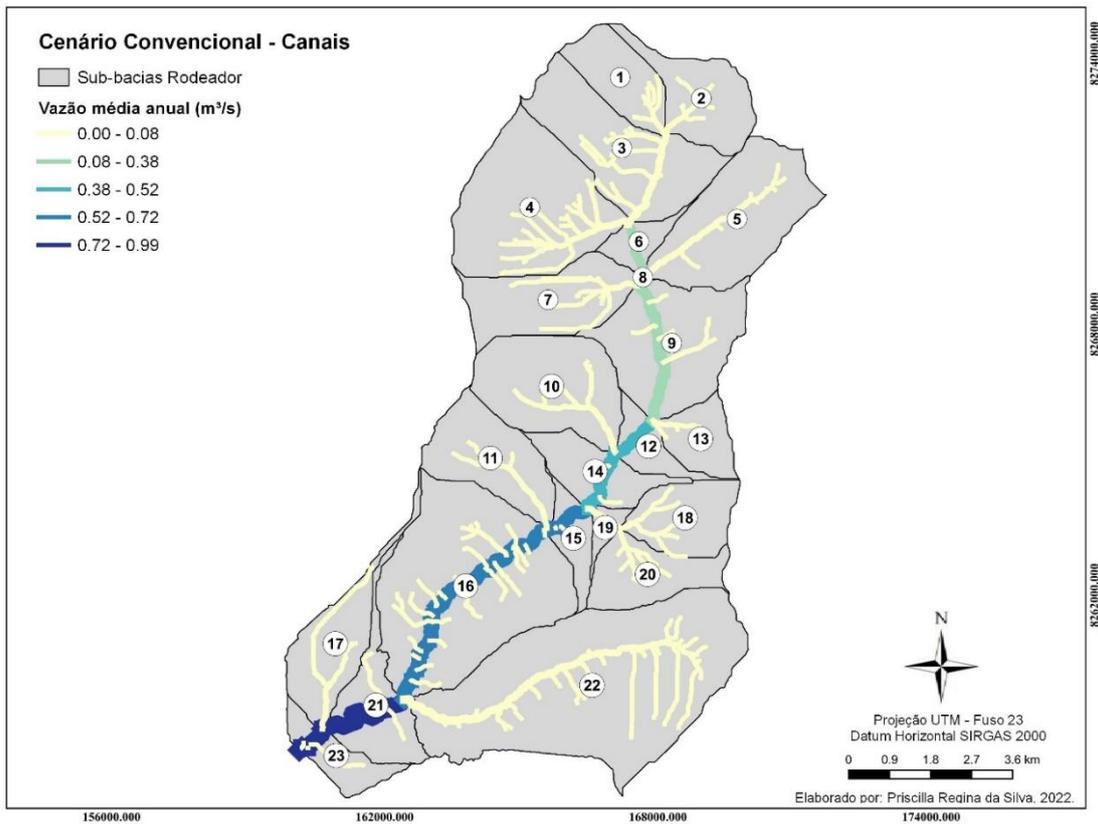


Figura 107 - Média anual (2020 a 2030) referente a valores de vazão de saída de cada canal - Bacia do Rodeador - Cenário Convencional.

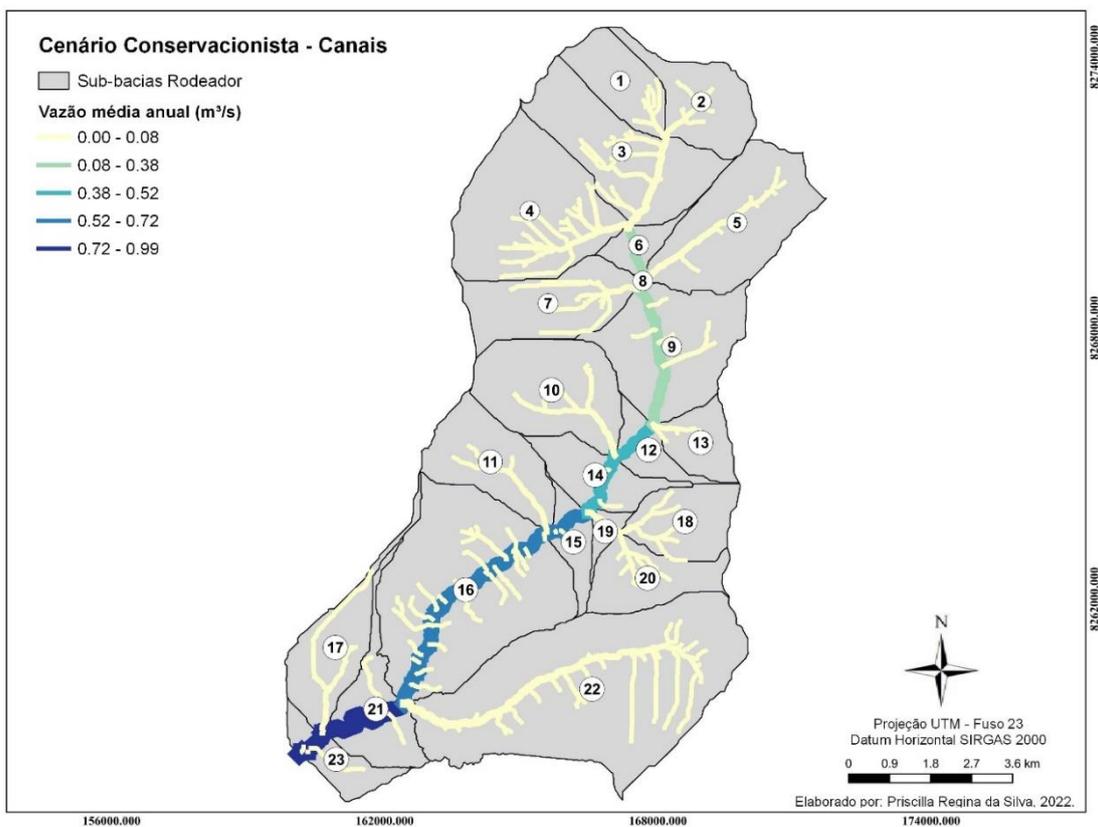


Figura 108 - Média anual (2020 a 2030) referente a valores de vazão de saída de cada canal - Bacia do Rodeador - Cenário Conservacionista.

Contudo, quando analisadas as vazões máximas mensais, verifica-se tênue diferenciação nos valores de determinados canais geolocalizados. Na bacia do Capão Comprido, o cenário convencional apresenta 5 canais com valores de vazão mensal máxima superiores ao cenário conservacionista, sendo três localizado na sub-bacia 1, um na sub-bacia 3 e um na sub-bacia 5 (figuras 109 e 110). Já quanto a bacia do Rodeador, as faixas de vazão mensal máxima são nitidamente semelhantes, atentando-se apenas a um canal com faixa de valor díspar, pertencente à sub-bacia 6 (figuras 111 e 112), proveniente do cenário conservacionista.

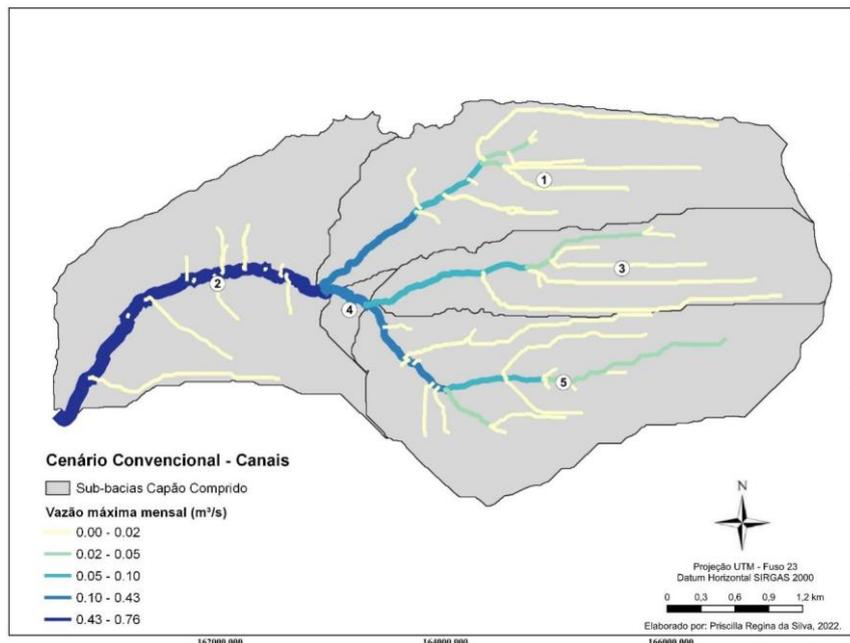


Figura 109- Máxima vazão mensal (2020 a 2030) referente a valores de vazão de saída de cada canal - Bacia do Capão Comprido - Cenário Convencional.

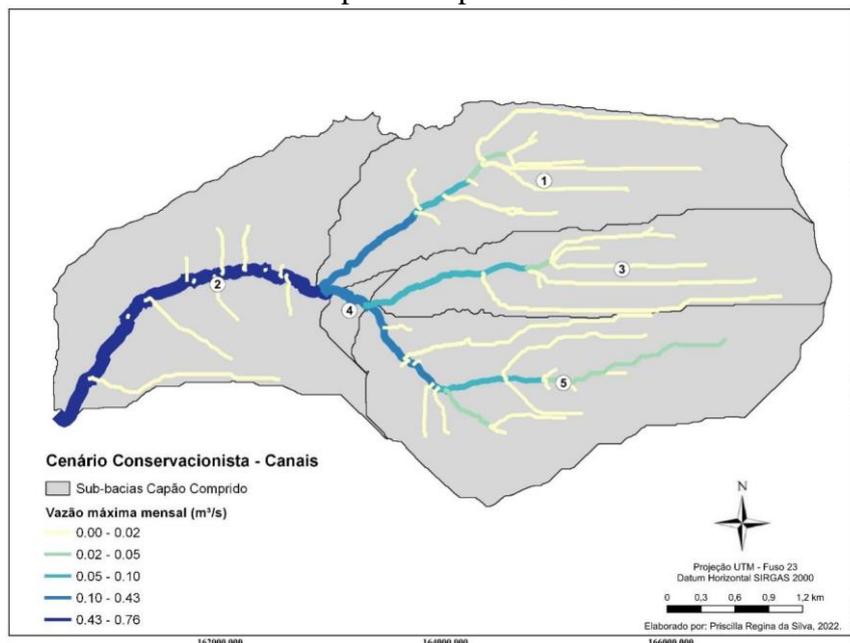


Figura 110- Máxima vazão mensal (2020 a 2030) referente a valores de vazão de saída de cada canal - Bacia do Capão Comprido - Cenário Convencional.

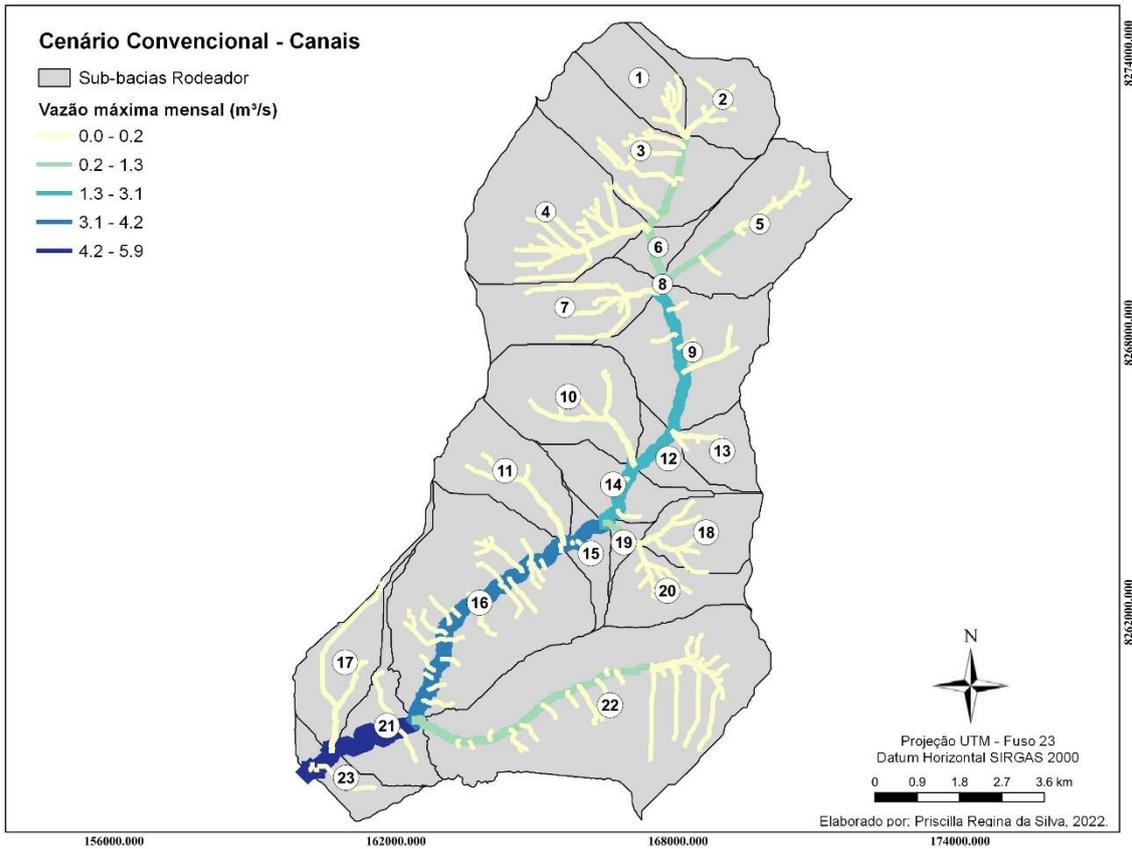


Figura 111 - Máxima vazão mensal (2020 a 2030) referente a valores de vazão de saída de cada canal - Bacia do Rodeador - Cenário Convencional.

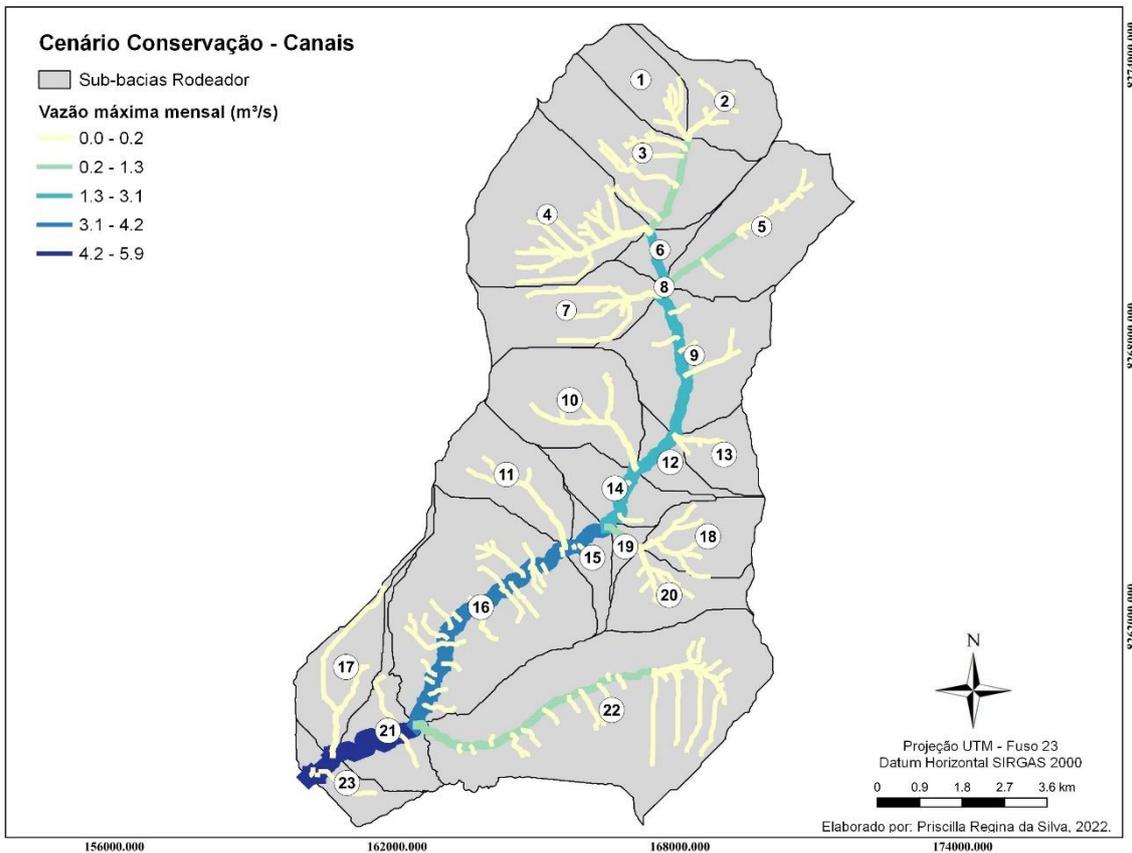


Figura 112- Máxima vazão mensal (2020 a 2030) referente a valores de vazão de saída de cada canal - Bacia do Capão Comprido - Cenário Conservacionista.

### 5.5.2.2 Unidades de paisagem (LSU)

Observando o comportamento do balanço hídrico das bacias pela diferenciação de cenários a partir de outro componente geolocalizado do SWAT+, as unidades de paisagem (LSU), percebe-se a diferenciação dos componentes hídricos pelas áreas de maior altitude (*upland*) e aquelas mais próximas aos cursos d'água (*floodplain*).

Ressalta-se que as unidades de paisagem classificadas como *upland* contam com superfícies de maiores dimensões, abrangendo um maior percentual da área total das bacias do que as *floodplain*. As porcentagens de cada unidade de paisagem e sua área média em cada bacia encontra-se descrita na Tabela 49.

Tabela 49 - Percentual das bacias e área média das classes de unidade de paisagem nas bacias do Capão Comprido e Rodeador.

<b>Unidades de Paisagem - LSU</b>			
<b>Bacia Hidrográfica</b>		<b><i>Upland</i></b>	<b><i>Floodplain</i></b>
Capão Comprido	Porcentagem da bacia	93%	7%
	Área média	16,50 ha	1,23 ha
Rodeador	Porcentagem da bacia	92%	8%
	Área média (ha)	33,17 ha	2,82 ha

Assim, considerando os componentes do balanço hídrico, analisou-se a diferenciação do comportamento desses em ambas bacias a partir de suas unidades de paisagem, fundamentando-se em componentes determinantes como o escoamento superficial, a percolação da água no solo e a evapotranspiração.

As figuras 113 a 116 referem-se às médias anuais de escoamento superficial em cada unidade de paisagem, e a tabela 50 contém valores médios desse por classe de LSU.

Tabela 50- Balanço Hídrico, componente Escoamento Superficial (mm), média anual considerando as unidades de paisagem em cada cenário construído para as bacias hidrográficas (período 2020 a 2030).

<b>Escoamento Superficial (mm)</b>			
<b>Bacia Hidrográfica</b>	<b>Cenário</b>	<b><i>Upland</i></b>	<b><i>Floodplain</i></b>
Capão Comprido	Convencional	183,08	183,44
	Conservação	140,81	161,36
Rodeador	Convencional	94,60	141,35
	Conservação	64,71	107,75

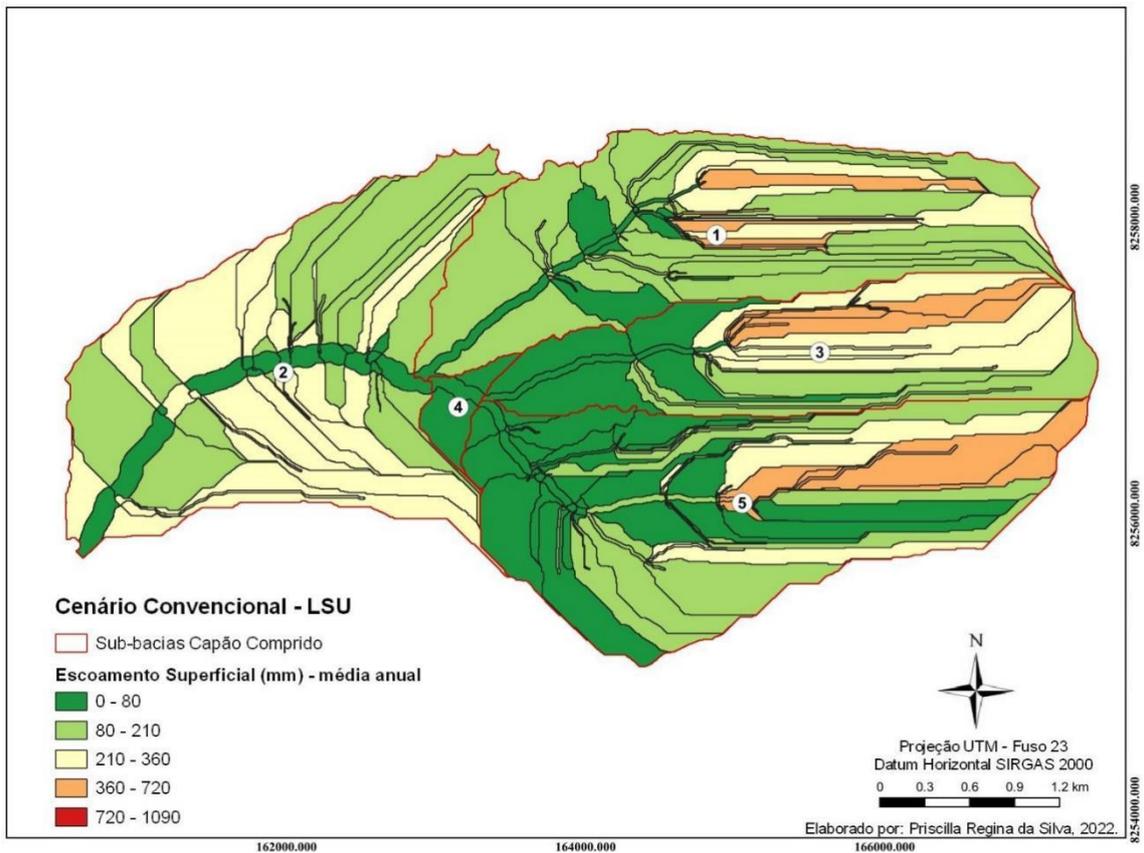


Figura 113 - Média anual referente ao escoamento superficial de cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Capão Comprido - Cenário Convencional.

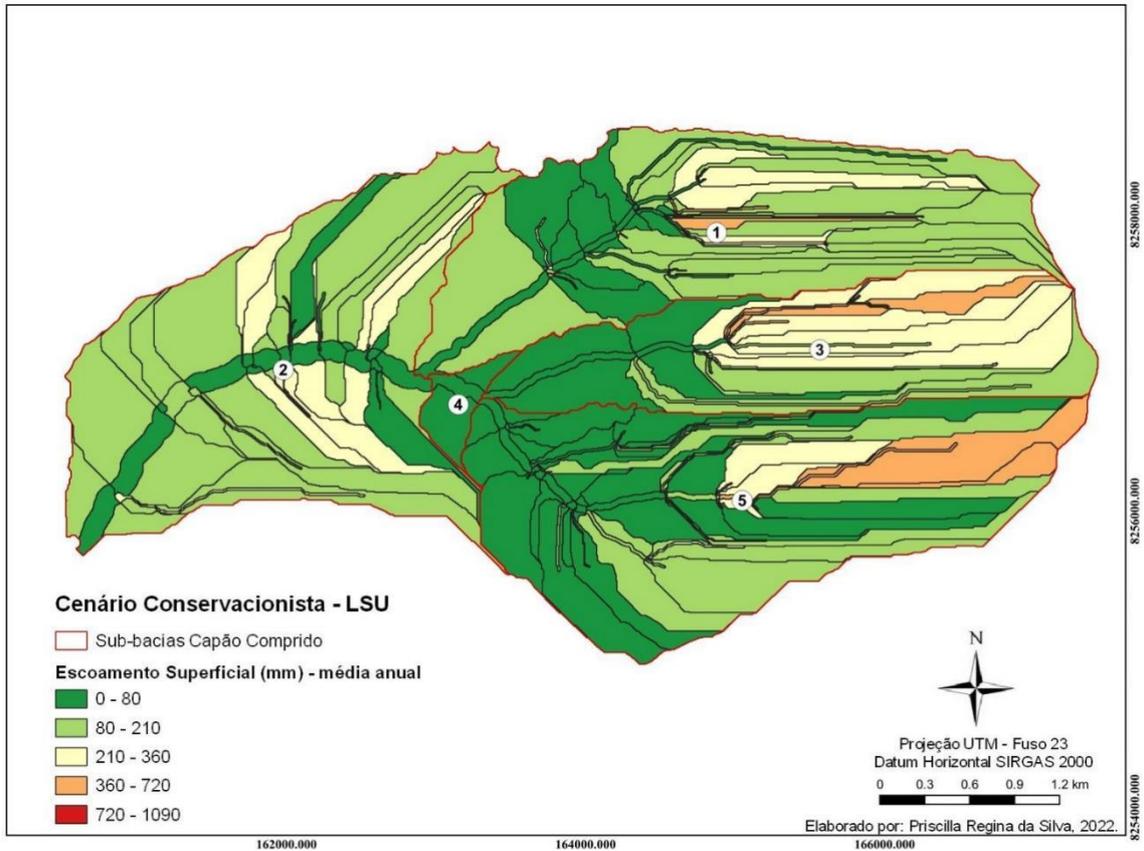


Figura 114 - Média anual referente ao escoamento superficial de cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Capão Comprido - Cenário Conservacionista.

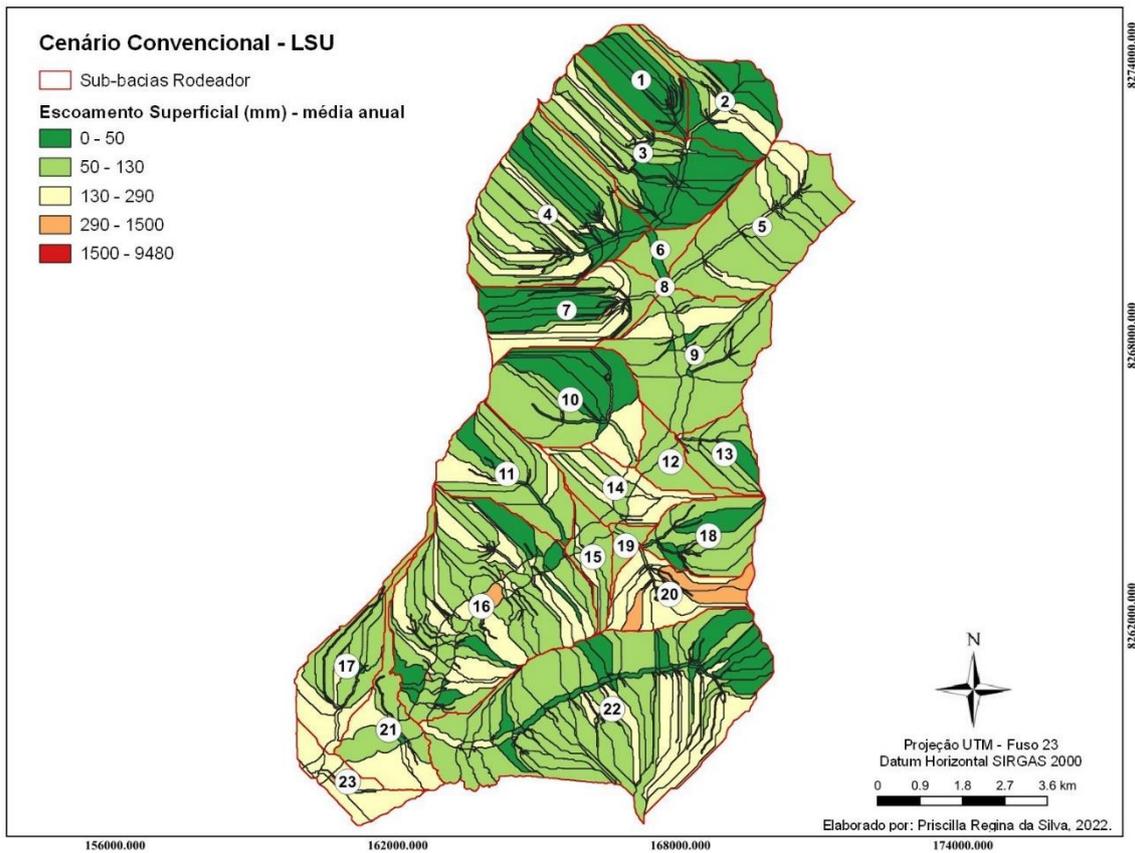


Figura 115 - Média anual referente ao escoamento superficial de cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Rodeador- Cenário Convencional.



Figura 116 - Média anual referente ao escoamento superficial de cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Rodeador - Cenário Conservacionista.

De maneira geral, constata-se os índices mais elevados nos cenários convencionais, sendo superiores nas unidades de paisagem *floodplain* em ambos os cenários e bacias. Quando se aprecia as médias anuais entre as unidades de paisagem, há distinção significativa entre os valores médios provenientes das *uplands* do que os das *floodplain*, sendo mais acentuados em ambos cenários da bacia do Rodeador e no cenário conservacionista da bacia do Capão Comprido. Entretanto, o cenário convencional da bacia do Capão Comprido não apresenta diferenciação significativa entre as unidades de paisagem, isso pode ser consequência da ocupação da bacia, onde a maior parte das benfeitorias se encontra nas áreas mais elevadas, o que, conseqüentemente, eleva a compactação do solo nesses locais.

Os cenários conservacionistas apresentam uma diminuição dos índices de escoamento em ambas classes de unidades de paisagem, sendo essa diminuição mais elevada nas áreas de *upland*. Tal fato indica que, considerando o balanço hídrico das bacias, essas taxas estão, possivelmente, se convertendo em infiltração, escoamento sub-superficial ou ainda evapotranspiração, devido ao aumento de área vegetada e adoção de práticas de manejo.

Quando se analisa a geolocalização, as unidades de paisagem que apresentam a coloração alaranjada indicam as maiores médias anuais. Grande parcela encontra-se em área de relevo plano a suave ondulado e de latossolo vermelho-escuro ou vermelho-amarelo, contudo, quando contempla-se o uso do solo, verifica-se que são áreas com maior incidência da classe de “benfeitorias”, o que justifica disporem de valores mais acentuados de escoamento superficial do que os de áreas de cambissolo com relevo ondulado, porém com uso de cerrado campestre ou pastagem terraceada. No caso da bacia do ribeirão Rodeador, por exemplo, as LSUs laranjadas coincidem com a localização de um dos maiores condomínios da região.

De maneira a realizar essa constatação analisou-se também o comportamento hidrográfico das unidades de paisagem quanto ao componente evapotranspiração. As figuras 117 a 120 e a tabela 51 referem-se as médias anuais referente às taxas de evapotranspiração.

Tabela 51- Balanço Hídrico, componente Evapotranspiração (mm), média anual - unidades de paisagem em cada cenário construído para as bacias hidrográficas (2020 a 2030).

<b>Evapotranspiração (mm)</b>			
<b>Bacia Hidrográfica</b>	<b>Cenário</b>	<b><i>Upland</i></b>	<b><i>Floodplain</i></b>
Capão Comprido	Convencional	939,16	1036,34
	Conservação	990,86	1045,80
Rodeador	Convencional	1074,80	1163,46
	Conservação	1098,15	1177,96

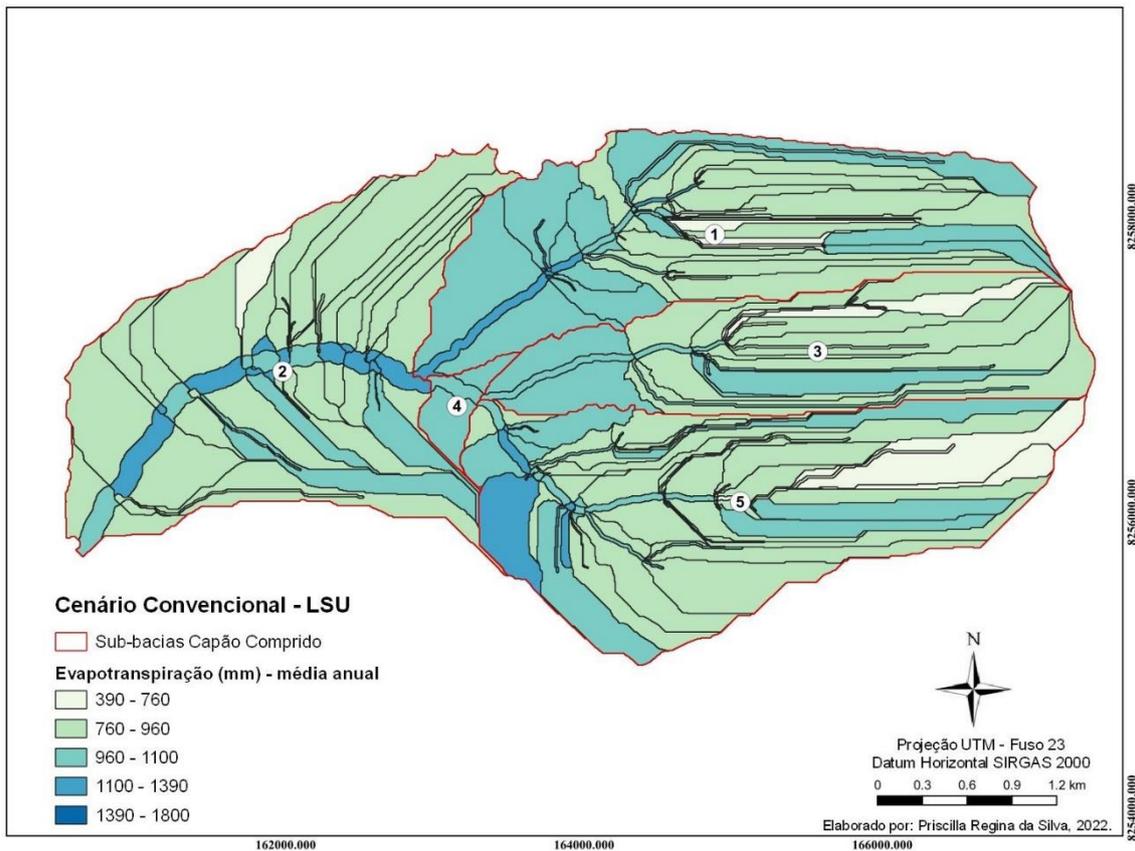


Figura 117- Média anual referente à evapotranspiração de cada unidade de paisagem (LSU) -  
Bacia do Capão Comprido - Cenário Convencional.

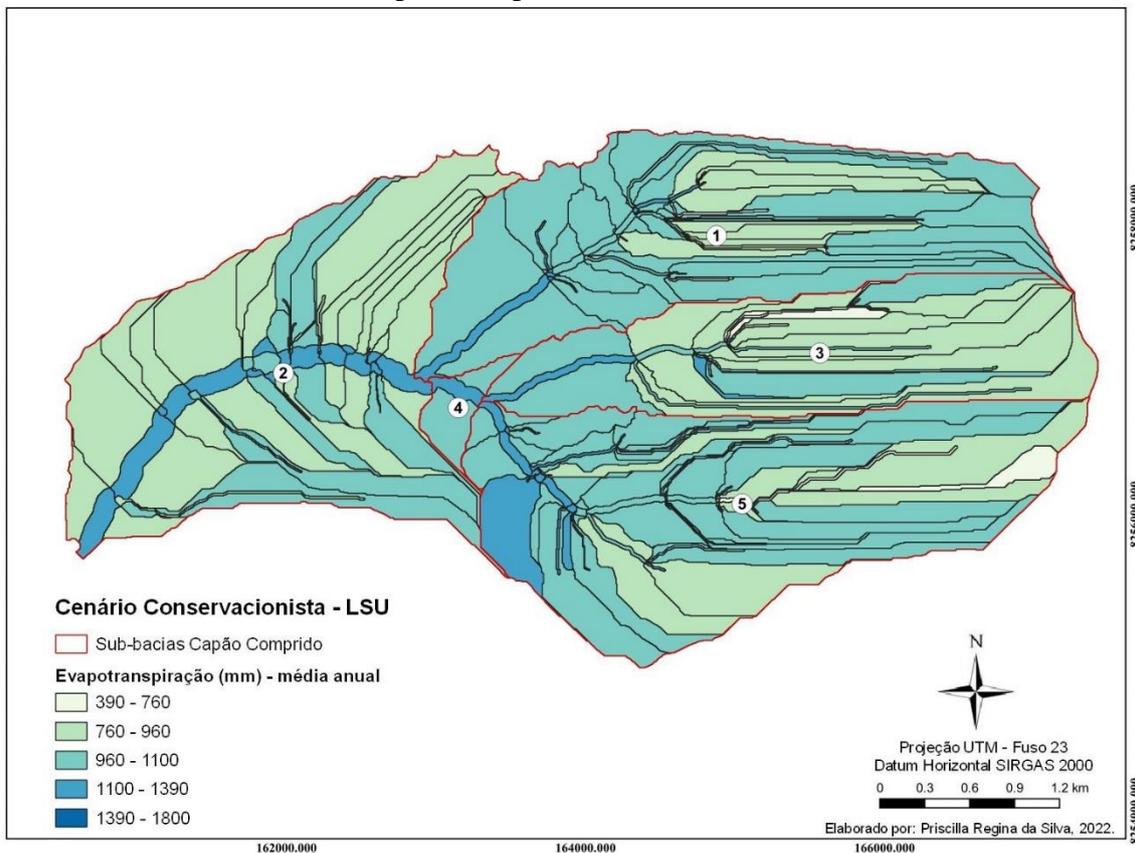


Figura 118- Média anual referente à evapotranspiração de cada unidade de paisagem (LSU) -  
Bacia do Capão Comprido - Cenário Conservacionista.

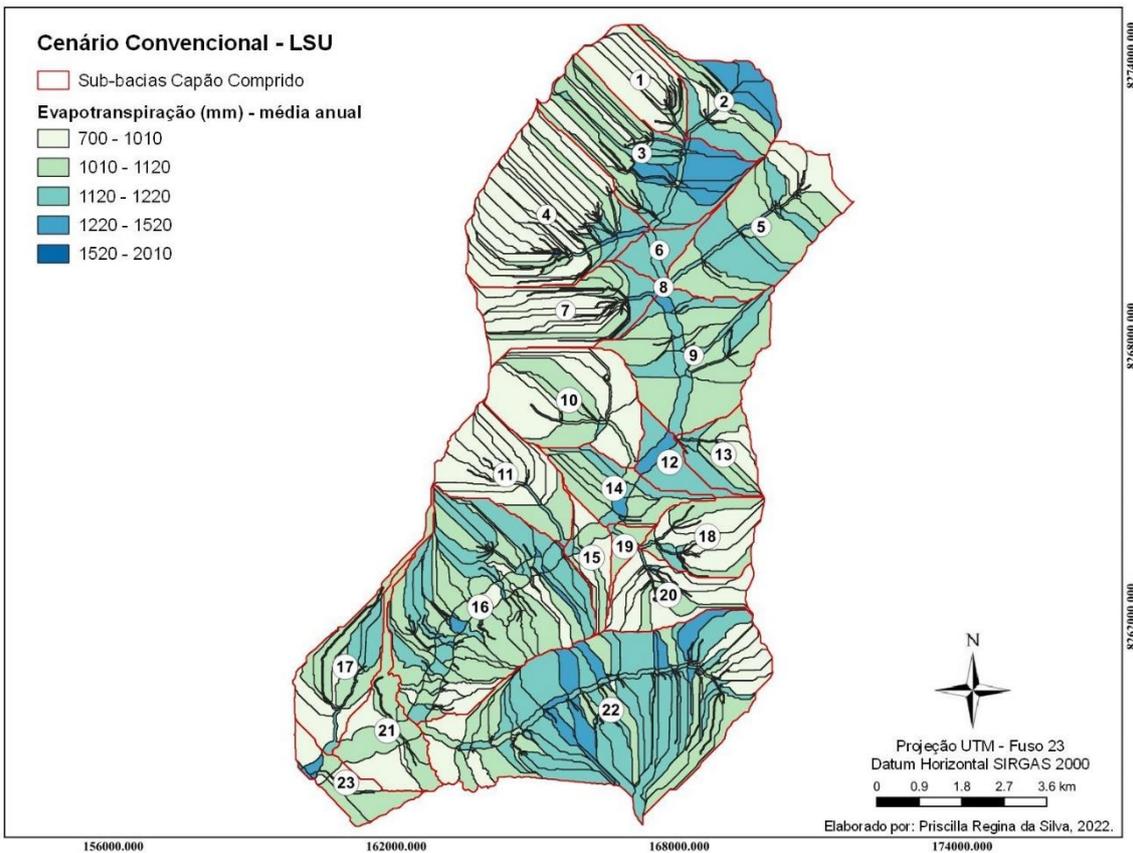


Figura 119- Média anual referente à evapotranspiração de cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Rodeador - Cenário Convencional.

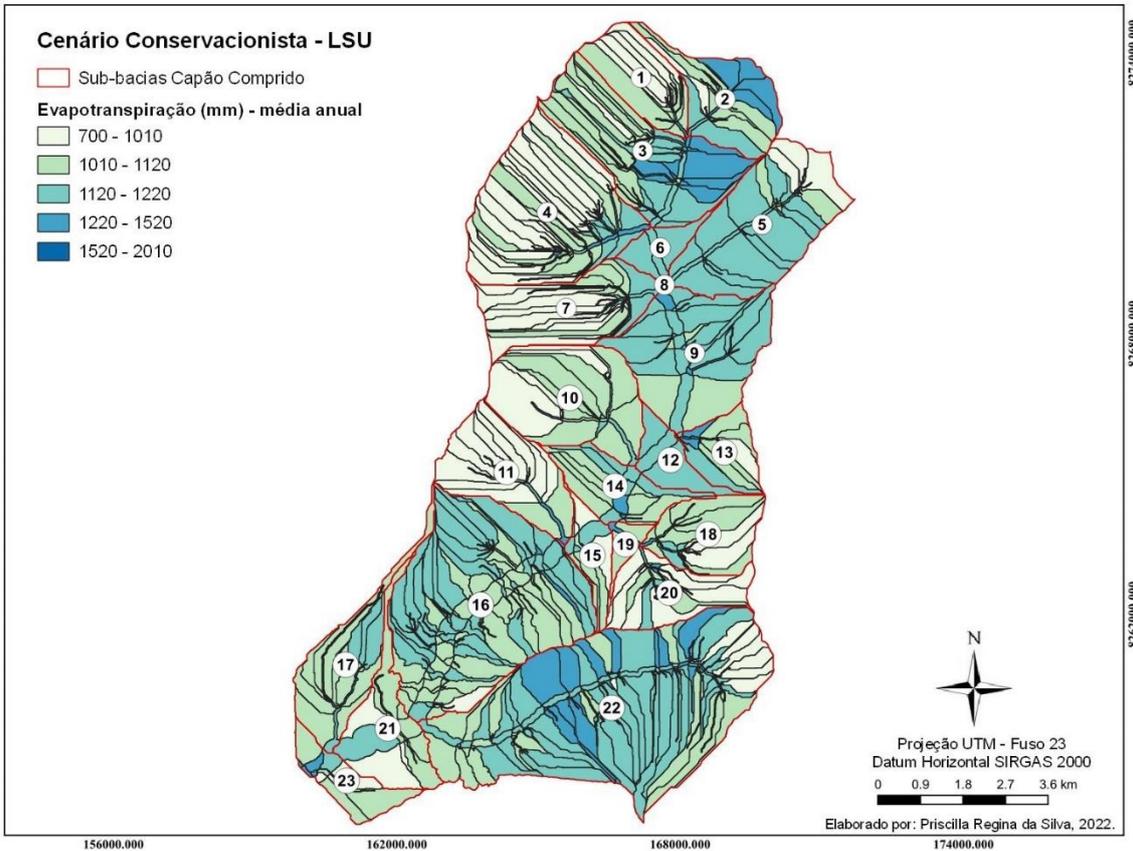


Figura 120- Média anual referente à evapotranspiração de cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Rodeador - Cenário Conservacionista.

Verifica-se, em contraponto com os índices de escoamento superficial, o crescimento de taxas voltadas à componente evapotranspiração nos cenários conservacionistas, justificado principalmente pela melhoria do manejo do solo e também pelo incremento de vegetação nativa.

Quando contrastado as unidades de paisagem, as áreas de *floodplain* apresentam as taxas mais acentuadas do que as áreas mais elevadas (*uplands*), devido, sobretudo, a recuperação de vegetação nativa do tipo mata ciliar e as áreas de várzea e vereda distribuídas à margem dos cursos d'água.

Já no que se refere a geolocalização das unidades de paisagem, onde as áreas apresentadas em azul escuro correspondem às maiores médias anuais de evapotranspiração e em grande parte correspondem as áreas de cobertura de vegetação nativa e também da classe de uso “grandes culturas”.

Verificou-se também os índices anuais de percolação, como pode ser observado na Tabela 52 e nas figuras 121 a 124, que apresentam os valores e o comportamento das LSU de cada bacia quanto à componente percolação e suas médias anuais.

Tabela 52- Balanço Hídrico, componente percolação (mm), média anual - unidades de paisagem em cada cenário construído para as bacias hidrográficas (período 2020 a 2030).

<b>Percolação (mm)</b>			
<b>Bacia Hidrográfica</b>	<b>Cenário</b>	<b><i>Upland</i></b>	<b><i>Floodplain</i></b>
Capão Comprido	Convencional	224,77	182,81
	Conservação	232,31	195,45
Rodeador	Convencional	246,00	168,32
	Conservação	251,22	159,41

Da mesma maneira que a evapotranspiração, os cenários conservacionistas apresentaram valores superiores aos convencionais, os índices médios anuais de percolação salientam o contraponto do balanço hídrico das bacias, revelando a incidência e permanência do recurso hídrico no solo, o que atinge, diretamente, a quantidade de água subterrânea, especialmente nos níveis freáticos.

No que tange às unidades de paisagem, as maiores médias encontram-se nas áreas elevadas (*uplands*), contudo quando se observa os dados individuais de cada unidade de paisagem (figuras 120 e 122), os valores mais elevados apresentam-se nas unidades *floodplain* e em *uplands* com uso e ocupação classificado como “pastagem” tendo como manejo a adoção

de terraços em sua extensão.

Quanto a geolocalização, as unidades de paisagem que apresentam as maiores médias anuais de percolação (azul escuro) coincidem com às áreas de relevo mais suave.

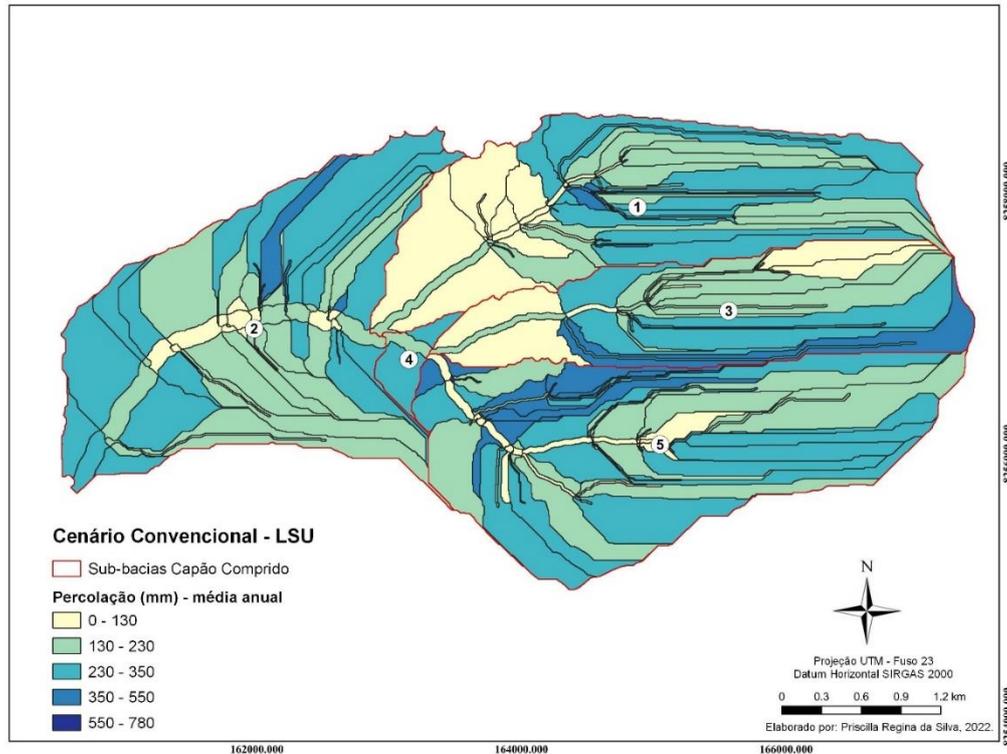


Figura 121 - Média anual referente a percolação em cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Capão Comprido - Cenário Convencional.

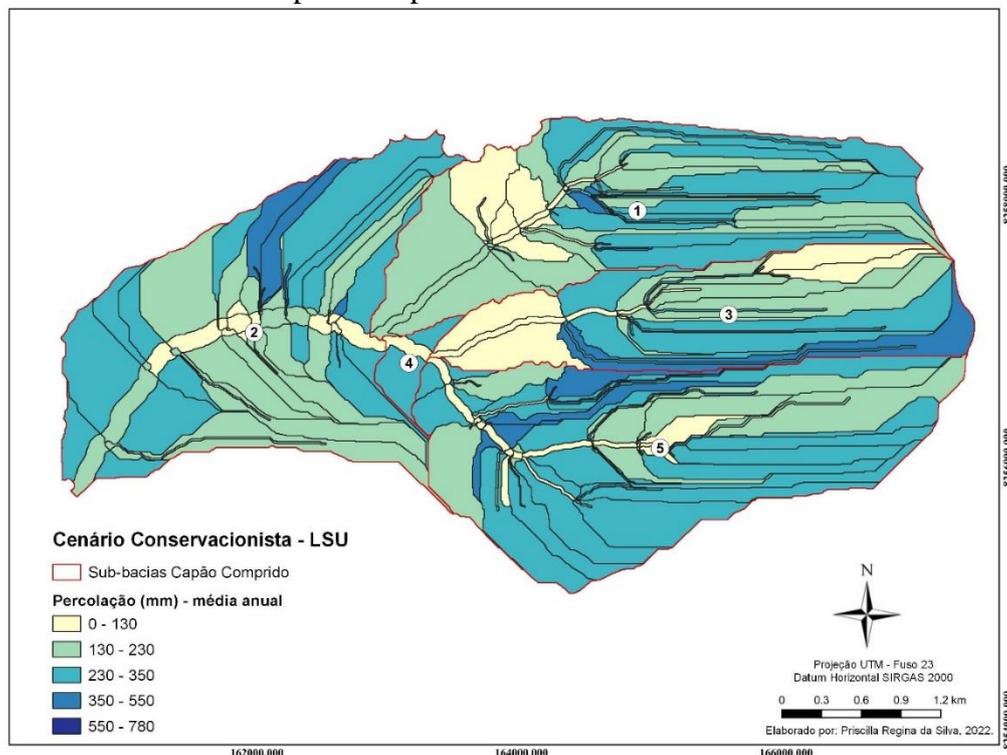


Figura 122 - Média anual referente a percolação em cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Capão Comprido - Cenário Conservacionista.

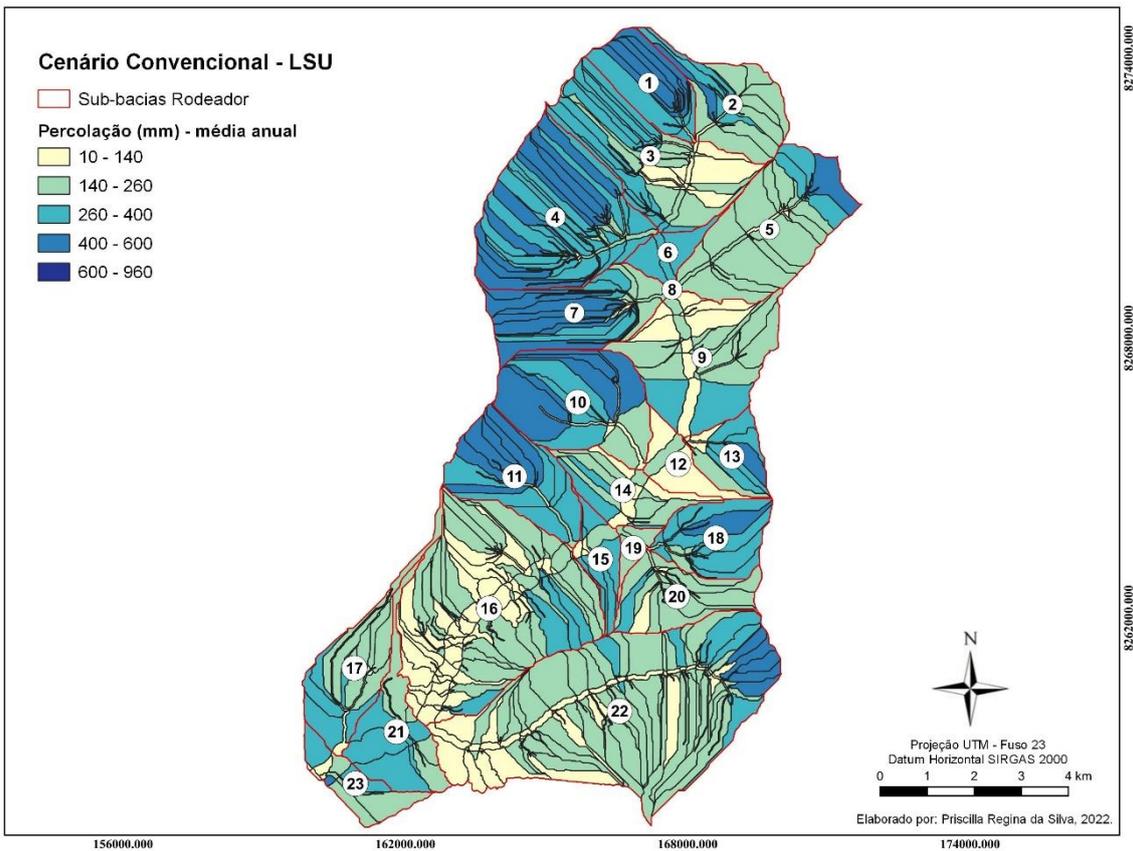


Figura 123 - Média anual referente a percolação em cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Rodeador - Cenário Convencional.

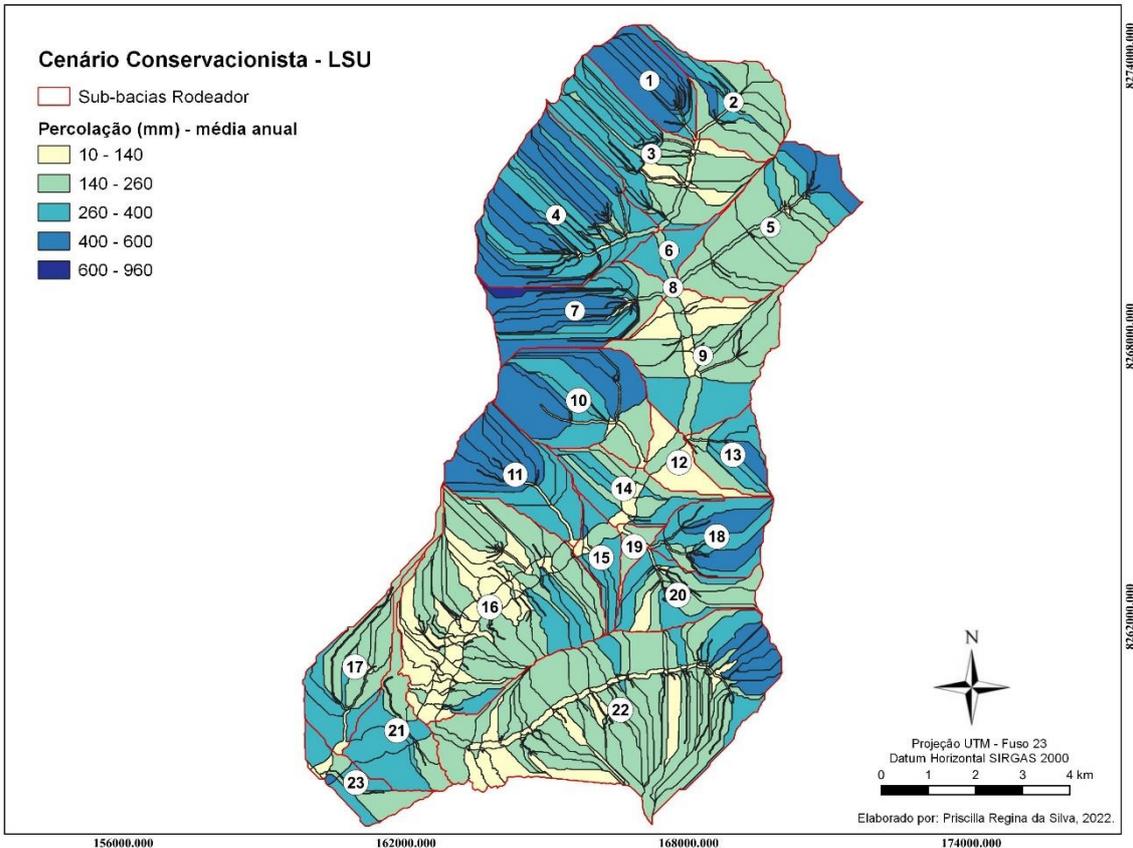


Figura 124 - Média anual referente a percolação em cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Rodeador - Cenário Conservacionista.

Deste modo, é possível inferir que, de modo geral, a adoção de práticas conservacionistas não irá impactar diretamente e significativamente na amplificação das vazões dos cursos d'água disponíveis para captações superficiais, visto que as maiores vazões se deram nos cenários convencionais. Contudo, permite a melhoria das condições da bacia hidrográfica, sobretudo quanto à disponibilidade hídrica das águas subterrâneas, com o aumento de água no solo e de taxas de infiltração, o que provavelmente irá ampliar, mesmo que de forma leve, as vazões superficiais em meses considerados mais secos e o armazenamento de aquíferos, os quais podem ser utilizados como fonte de água alternativa nos períodos de escassez do recurso superficial.

No tocante à observação dos resultados em unidades de paisagem, destaca-se que para esse estudo foi utilizada apenas uma das metodologias de delimitação disponíveis no SWAT+ (Rathjens *et al.*, 2016), a qual enfatiza as áreas marginais aos cursos d'água como uma paisagem diferenciada. Cabe ressaltar que, alguns cursos d'água do DF podem não apresentar essa variação de planície de inundação, devido a sua proximidade com as áreas de nascente e por apresentarem um leito bem delimitado, encaixado entre as margens. Assim, é considerável que outros estudos apliquem e analisem as demais técnicas de delimitação, visando identificar a que melhor se adapta à realidade regional e a representação de seu comportamento hidrológico.

### 5.5.2.3 Sedimentos

Considera-se ainda que a elevada taxa de escoamento superficial e os picos de vazão podem se correlacionar com o desprendimento e carreamento de solos desprotegidos, corroborando com uma maior produção de sedimentos na bacia hidrográfica e provável deposição em cursos d'água, avançando os níveis de assoreamento desses.

A simulação proveniente do SWAT+ reproduziu o comportamento dos sedimentos na bacia em ambos cenários, as figuras 125 e 126 trazem a representação ilustrativa dos resultados do SWAT+, os quais se referem a componentes relevantes para a produção de sedimentos. Já as tabelas 53 e 54 apresentam os valores resultantes.

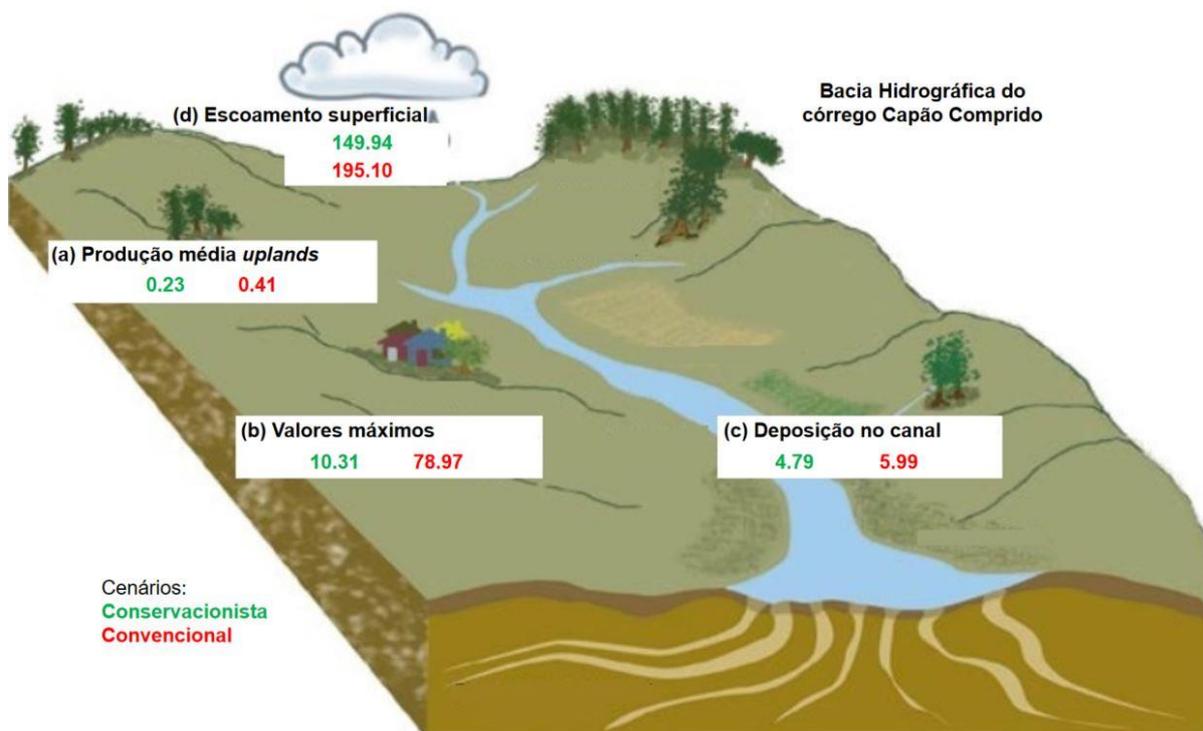


Figura 125 - Representação ilustrativa dos componentes de produção de sedimentos observados e simulados no modelo hidrológico SWAT+ (tradução livre) – bacia do Capão Comprido.

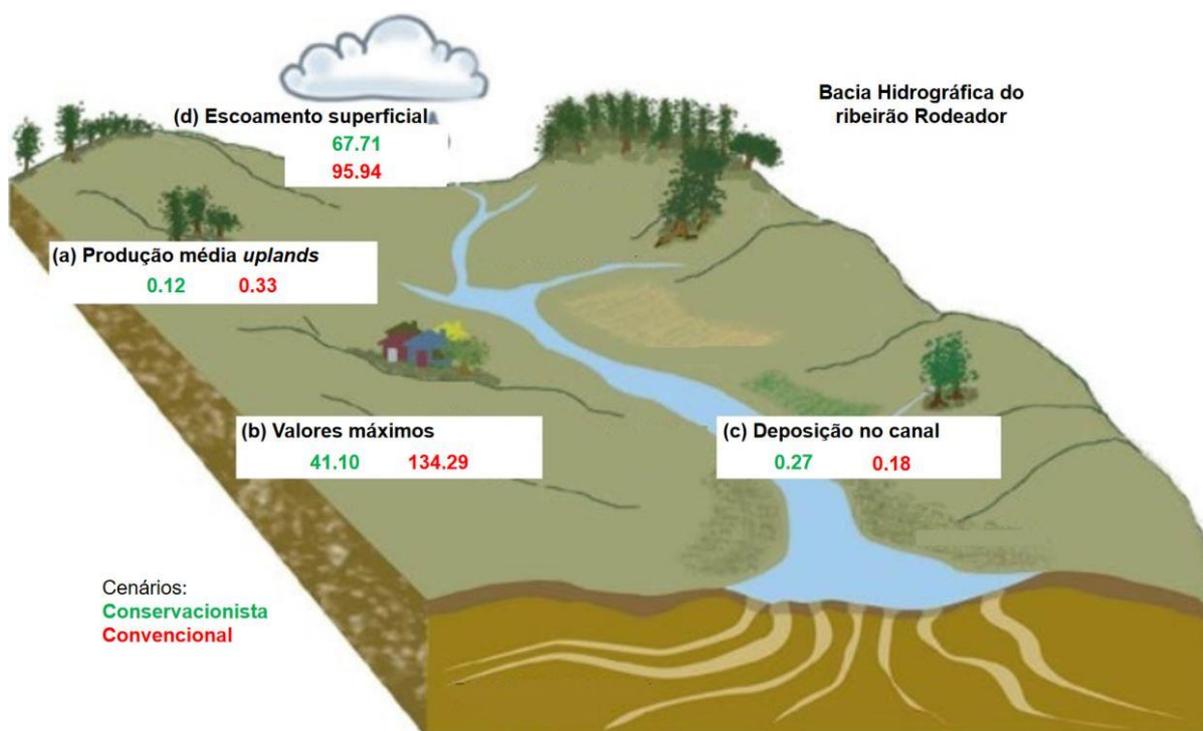


Figura 126 - Representação ilustrativa dos componentes de produção de sedimentos observados e simulados no modelo hidrológico SWAT+ (tradução livre) – bacia do Rodeador.

Tabela 53 - Valores de produção de sedimentos gerados pela simulação via SWAT+ na bacia do Capão Comprido (DF).

<b>Bacia Hidrográfica - Capão Comprido</b>			
	<b>Componentes</b>	<b>Cenário Conservacionista</b>	<b>Cenário Convencional</b>
(a)	Produção média de sedimento em áreas mais elevadas da paisagem (ton/ha)	0,23	0,41
(b)	Valor máximo de produção de sedimentos no período simulado (ton/ha)	10,31	78,97
(c)	Deposição de sedimentos no canal (ton/ha)	4,79	5,99
(d)	Escoamento superficial anual (mm/ano)	149,94	195,10

\*ton/ha: tonelada por hectare

Tabela 54 - Valores de produção de sedimentos gerados pela simulação via SWAT+ na bacia do Rodeador (DF).

<b>Bacia Hidrográfica - Rodeador</b>			
	<b>Componentes</b>	<b>Cenário Conservacionista</b>	<b>Cenário Convencional</b>
(a)	Produção média de sedimento em áreas mais elevadas da paisagem (ton/ha)	0,12	0,33
(b)	Valor máximo de produção de sedimentos no período simulado (ton/ha)	41,10	134,29
(c)	Deposição de sedimentos no canal (ton/ha)	0,27	0,18
(d)	Escoamento superficial anual (mm/ano)	67,71	95,94

\*ton/ha: tonelada por hectare

No que tange à incidência de sedimentos, a diminuição da taxa de escoamento superficial e o aumento da taxa de infiltração/percolação interferem diretamente no decréscimo de geração de sedimentos na bacia. Assim, com a adoção de práticas de manejo de água e solo e com a garantia de maiores áreas de cobertura vegetal natural, pode-se observar uma diminuição acentuada na produção de sedimentos nas bacias hidrográficas. A bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido apresentou valores máximos mais brandos do que a bacia do Rodeador, e quando comparado os cenários e seus valores máximos, percebe-se que se atenuaria a produção de sedimentos nesses pontos máximos em menos 68 ton/ha na bacia do Capão Comprido e em 93 ton/ha na bacia do ribeirão Rodeador.

Áreas de altitude mais elevada podem diminuir de 35 a 55% a produção de sedimentos com emprego do manejo ideal. Verifica-se que as taxas de deposição de sedimentos no canal são maiores no Capão Comprido do que no Rodeador, o que indica que aquele possui maior probabilidade, no geral, de assoreamento de seu leito, porém podendo ser amenizado em aproximadamente 20% quando adotado um cenário mais conservacionista.

Analisou-se também a produção de sedimentos considerando as unidades de paisagem, conforme exposto pelas figuras 127 a 130 e pela tabela 55.

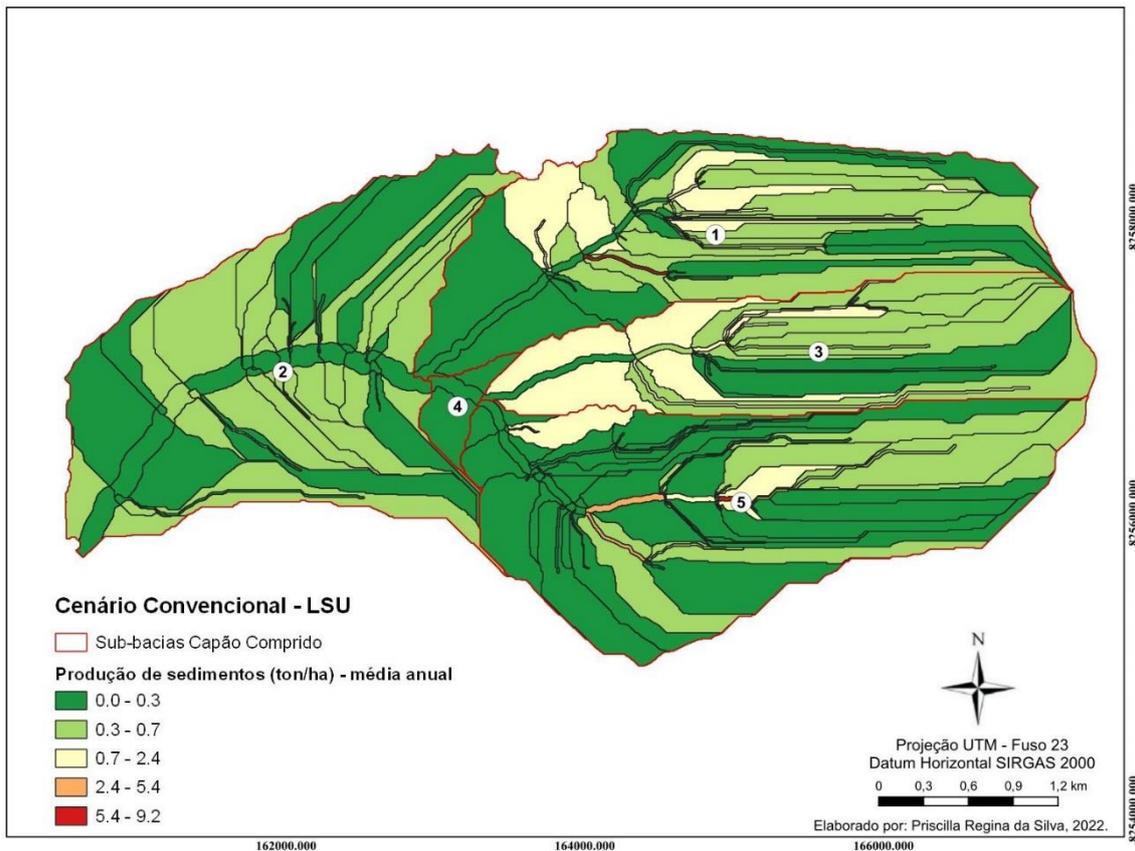


Figura 127 - Média anual referente a valores de produção de sedimentos de cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Capão Comprido - Cenário Convencional.

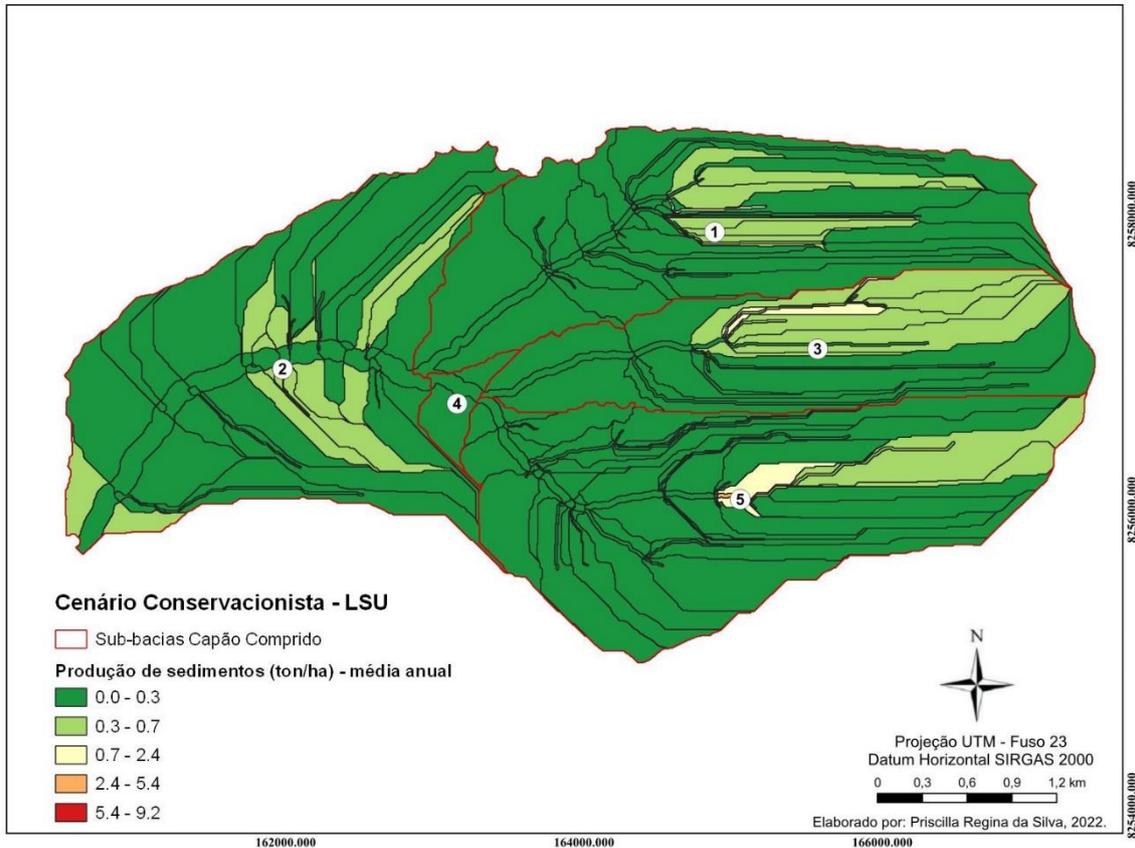


Figura 128 - Média anual referente a valores de produção de sedimentos de cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Capão Comprido - Cenário Conservacionista.

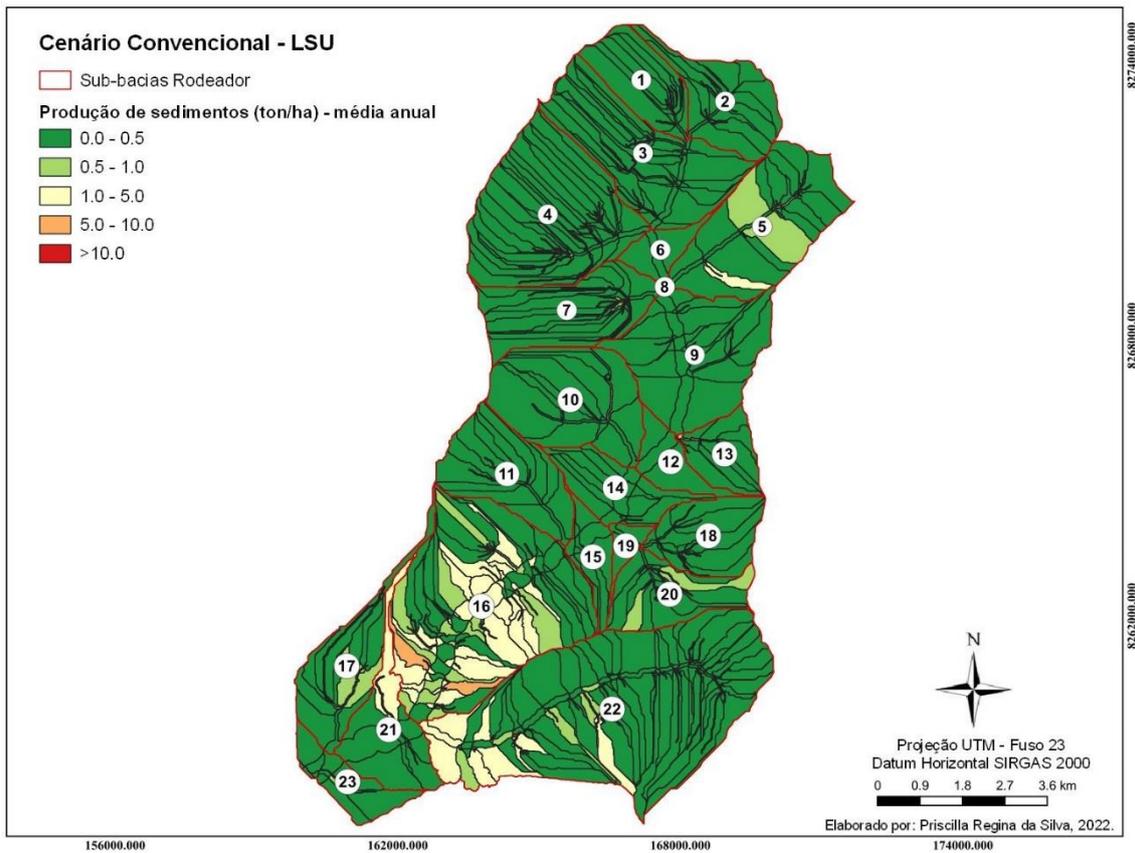


Figura 129 - Média anual referente a valores de produção de sedimentos de cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Rodeador - Cenário Convencional.

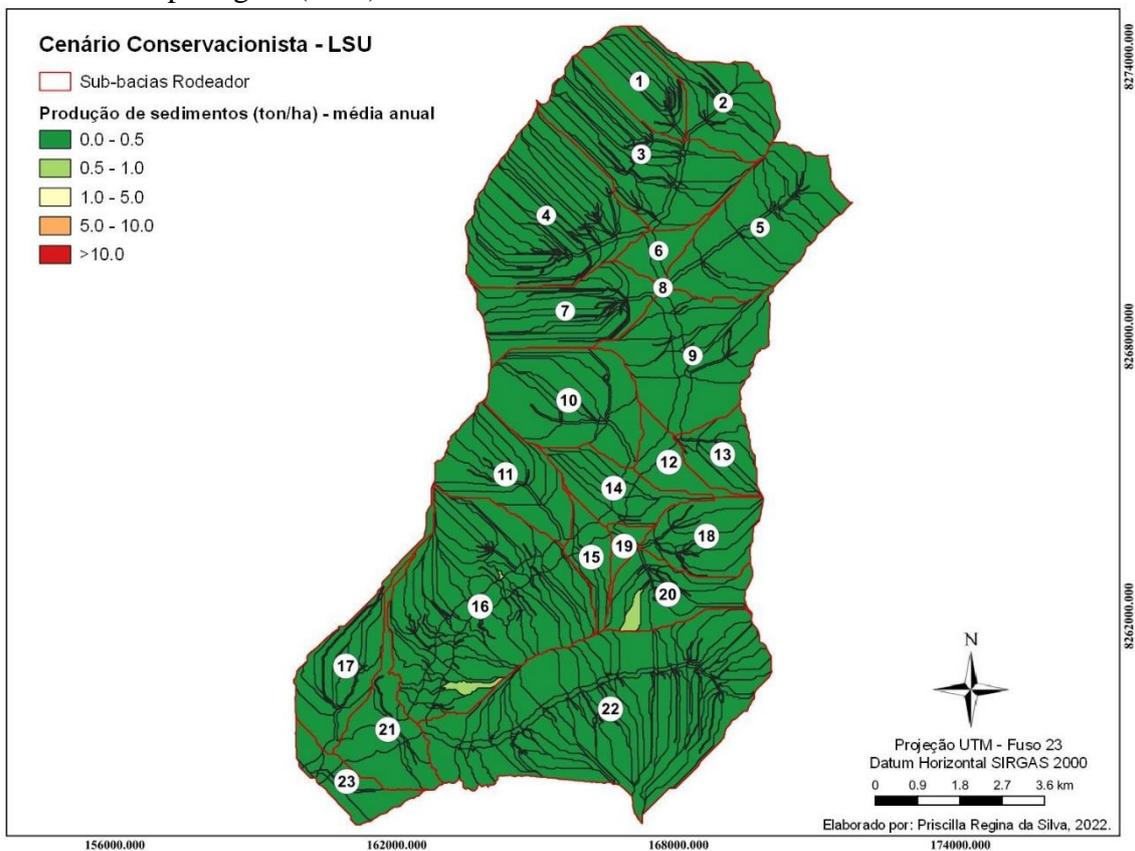


Figura 130 - Média anual referente a valores de produção de sedimentos de cada unidade de paisagem (LSU) - Bacia do Rodeador - Cenário Conservacionista.

Tabela 55- Média anual de produção de sedimentos em toneladas por hectare, considerando as unidades de paisagem em cada cenário construído para as bacias hidrográficas (período 2020 a 2030).

<b>Produção de sedimentos (ton/ha)</b>			
<b>Bacia Hidrográfica</b>	<b>Cenário</b>	<i>Upland</i>	<i>Floodplain</i>
Capão Comprido	Convencional	0,38	0,51
	Conservação	0,19	0,15
Rodeador	Convencional	0,33	0,73
	Conservação	0,06	0,03

Desprende-se que o cenário convencional apresenta no geral uma taxa de produção de sedimentos bem mais intensa que o cenário conservacionista com altas médias anuais nas duas classes de unidades de paisagem.

Ambas as bacias diminuíram os valores de produção média de forma mais acentuada nas áreas de *floodplain*, que, no cenário convencional apresenta valores maiores do que a unidade *upland*, porém no conservacionista revela valores mais brandos que essa. Assim, denota-se que a preservação e o incremento de vegetação nativa nas áreas de preservação permanente estão diretamente correlacionados com a atenuação da produção de sedimentos.

Semelhantemente, ocorre a atenuação da produção de sedimentos nas *uplands*, sendo essa correlacionada à adoção das melhores práticas agrícolas de conservação de solo, visto que nas áreas mais elevadas é onde predomina a produção agropecuária nas bacias hidrográficas.

Quando apreciadas as figuras, nota-se a uniformidade da produção de sedimento nos cenários conservacionistas. Contudo, os cenários convencionais expõem as localidades onde a produção de sedimentos anuais é mais enfática, sendo: as *uplands* e *floodplains* localizadas na sub-bacia 16 do Rodeador, área de maior declive da bacia; parte das *uplands* das sub-bacias 1 e 3 do Capão Comprido, também relacionadas ao relevo mais ondulado; e, por fim, as *floodplains* da sub-bacia 5 do Capão Comprido, que além de correlato relevo declivoso está a jusante da maior área de solo exposto da bacia.

De maneira a correlacionar o uso do solo com a produção de sedimentos, construiu-se também mapas classificando tal produção às unidades de respostas hidrológicas (HRU) (figuras 131 a 134).

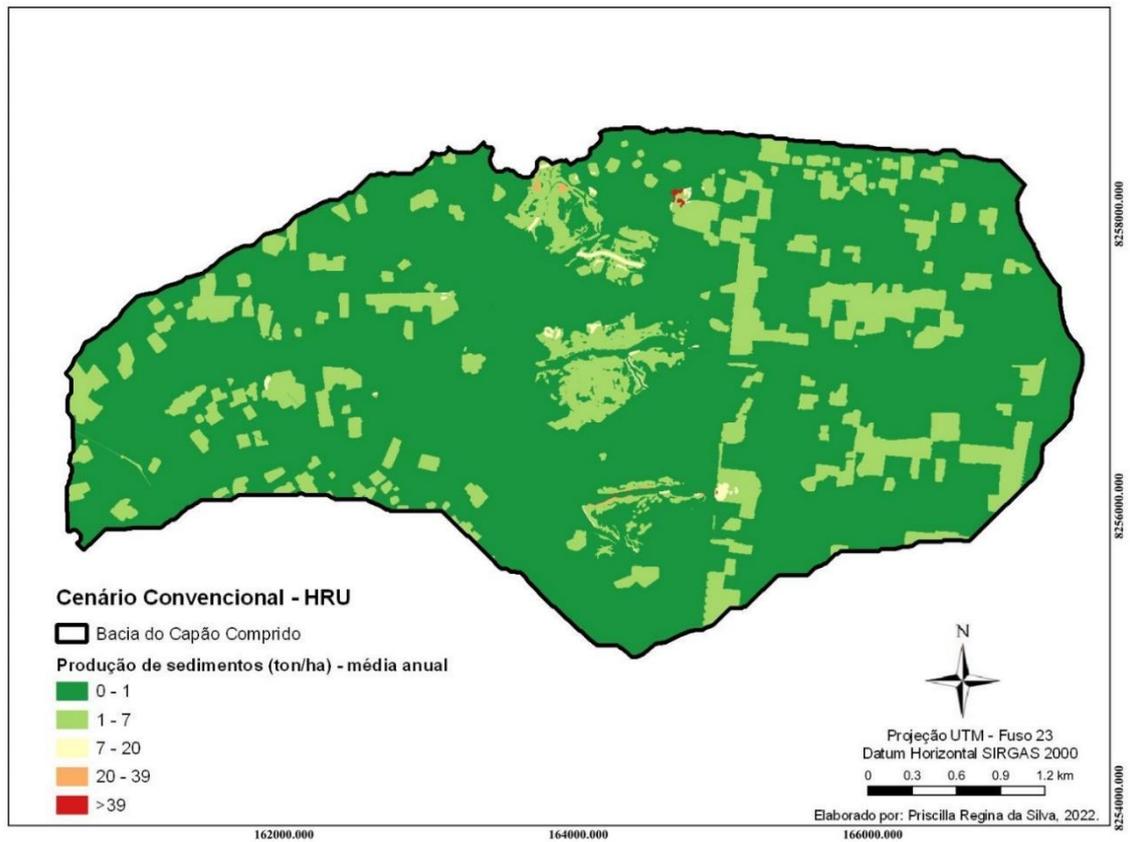


Figura 131 - Média anual referente a valores de produção de sedimentos de cada HRU - Bacia do Capão Comprido - Cenário Convencional.

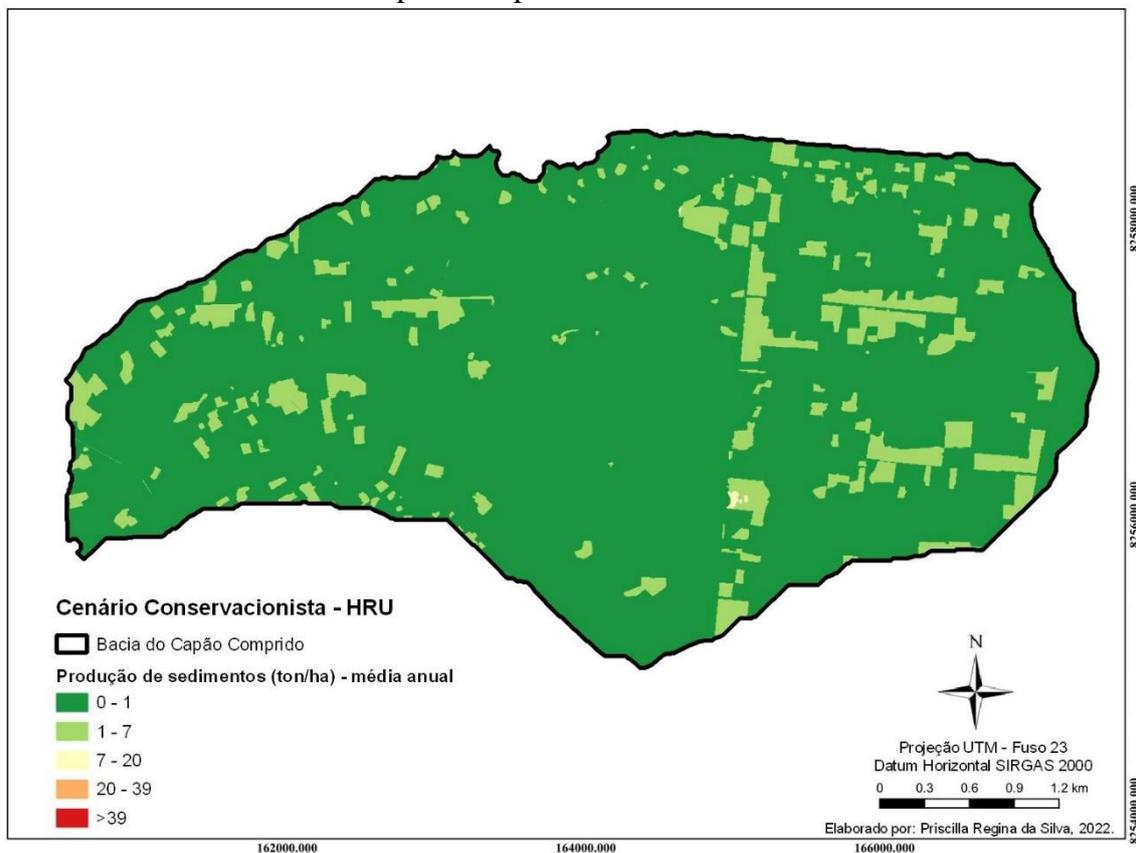


Figura 132 - Média anual referente a valores de produção de sedimentos de cada HRU - Bacia do Capão Comprido - Cenário Conservacionista.

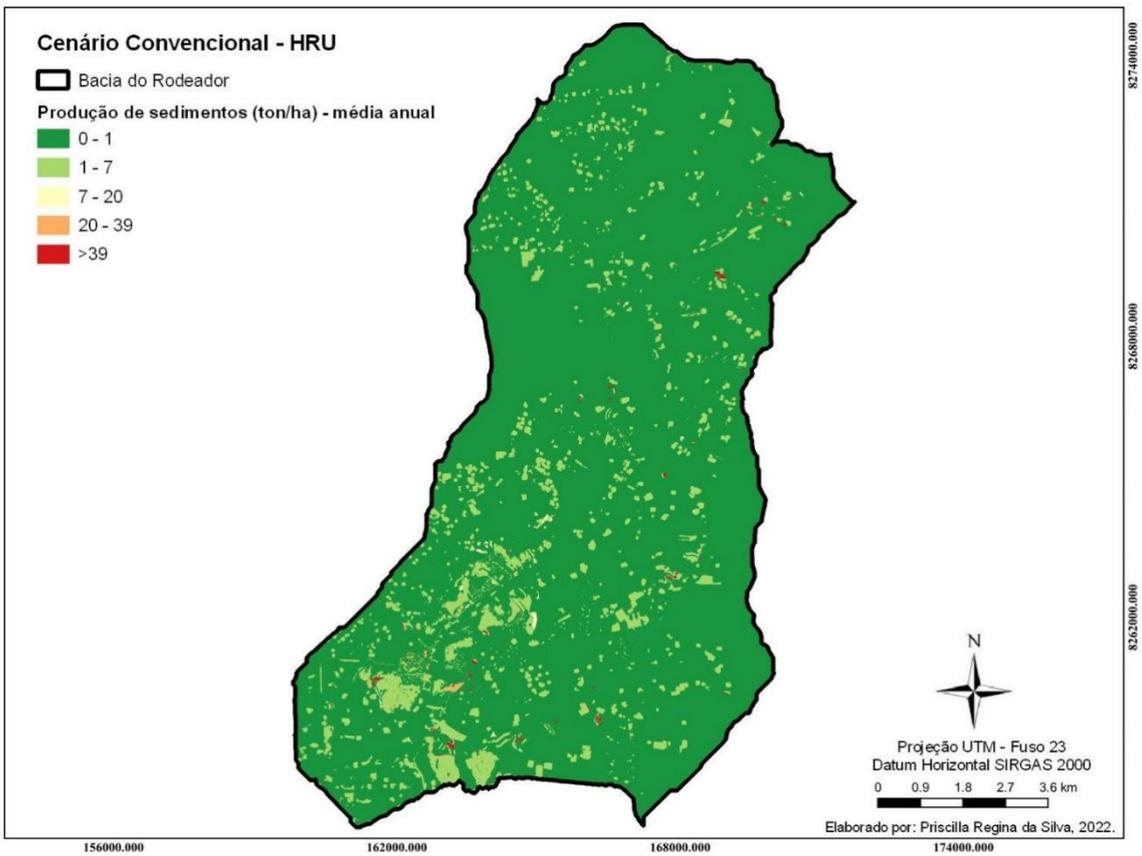


Figura 133 - Média anual referente a valores de produção de sedimentos de cada HRU - Bacia do Rodeador - Cenário Convencional.

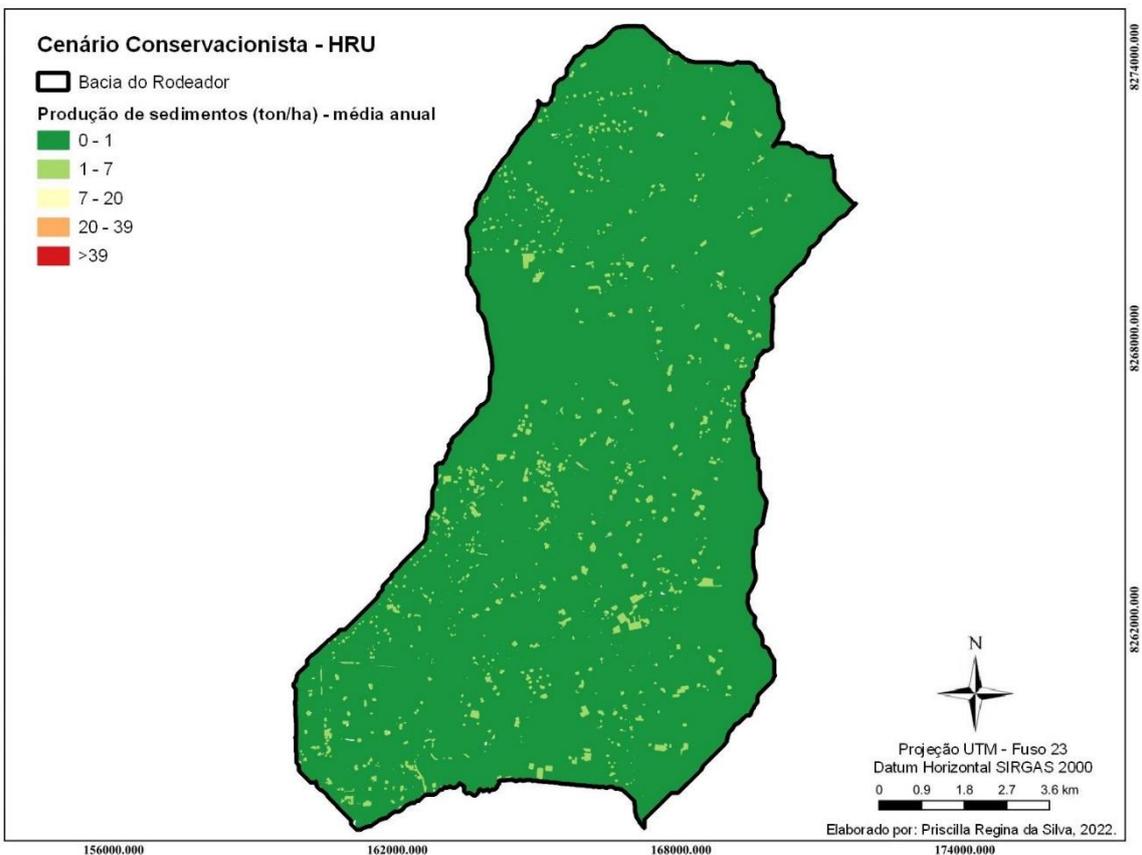


Figura 134 - Média anual referente a valores de produção de sedimentos de cada HRU - Bacia do Rodeador - Cenário Conservacionista.

Observando a resposta em formato de HRUs, verifica-se que as áreas com declive acentuado e com solo exposto ou compactado (benfeitorias/quintais) são as que apresentam maiores valores de produção de sedimentos, mas que podem ser amenizados com o uso de práticas de conservação do solo e com a recuperação de áreas de preservação permanente às margens dos cursos d'água.

Strauch *et al.* (2013), aplicando o SWAT em bacia distrital pertencente a mesma região hidrográfica das bacias objeto desse estudo, similarmente verificaram que a adoção de práticas conservacionistas impacta no decréscimo das vazões superficiais e também na atenuação da quantidade de sedimento presente nos cursos d'água, sendo que tal atenuação é mais eficiente com a utilização de práticas mecânicas, como a implantação de terraços, do que algumas práticas vegetativas ou edáficas, como a rotação de culturas.

Assim, compreende-se que a adoção de práticas conservacionistas, de modo geral, impacta positivamente na qualidade dos recursos hídricos das bacias hidrográficas e, conseqüentemente, gera a atenuação do assoreamento dos cursos d'água, o que interfere tanto no tempo de vida e na disponibilidade hídrica do reservatório do Descoberto, quanto na melhoria do recurso natural e na diminuição dos custos de tratamento voltados para o abastecimento público da população do Distrito Federal.

No que se refere à atividade agropecuária, a adoção incentivada de práticas conservacionistas nas bacias é altamente recomendável, pois, além de proporcionar melhora na umidade do solo, evita a perda de solo fértil proveniente de erosões laminares e previne a formação de sulcos e ravinas.

Em se tratando da bacia do reservatório do Descoberto, a adoção de tais práticas vem ao encontro à necessidade de fortalecimento da atividade agropecuária na região e da garantia de permanência de sua destinação rural, visto que a urbanização e compactação do solo tendem a aumentar os eventos de cheia, diminuir o tempo de permanência da água na bacia, ampliar o teor de sedimentos nos cursos d'água e o assoreamento dos mesmos.

A adoção de técnicas de conservação de água e solo nas áreas rurais deve ser considerada instrumento essencial para a continuidade da vocação rural da área contribuinte ao reservatório Descoberto, dentre elas destaca-se a utilização de sistemas de irrigação mais eficientes, a adequação ambiental de atividades, a adoção de terraços e plantio em nível e a restauração de áreas protegidas, de forma a garantirem a coexistência de uma forte e estável produção agropecuária juntamente com a distribuição e abastecimento público de água.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A construção de cenários temporais de uso do solo na área de estudo (bacias hidrográficas do córrego Capão Comprido e do ribeirão Rodeador) apoiados em imagens aéreas e de satélite, oportunizou a observação da evolução do uso e ocupação do solo, demonstrando a expansão da área antropizada nos últimos 60 anos e a diminuição da cobertura de vegetação nativa, em especial as formações savânicas. A tendência de antropização era predominantemente agrícola até o cenário 3 (2009), contudo no cenário 4 (2019) observou-se a estagnação do avanço de áreas agrícolas e da retirada de vegetação natural. Da mesma forma, fica evidente a ampliação de espaços ocupados por benfeitorias e a fragmentação das propriedades rurais, as quais correlacionam-se diretamente à elevação de índices de crescimento populacional da região e consequentemente à incidência de parcelamentos irregulares e amplificação da compactação do solo.

O comportamento das mudanças no uso do solo mostrou-se semelhante nas duas bacias hidrográficas estudadas, consequentemente é razoável correlacionar e subentender que o equivalente acontece nas demais bacias hidrográficas afluentes ao Reservatório do Descoberto.

Acerca da simulação hidrológica e a aplicação do SWAT+, a composição de base de dados adaptada para a agricultura da região vem de forma a corroborar com o aperfeiçoamento do modelo e na geração de simulações em grau superior de confiabilidade.

A análise de sensibilidade apresentou especialmente três parâmetros com maior significância para a simulação de vazões de cursos d'água nos 3 cenários calibrados, sendo eles o k, awc e cn2, em que os dois primeiros tem relação com aspectos do solo e o último correlaciona o uso com a classe de solo.

A calibração realizada para os cenários 2, 3 e 4 da bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido apresentou NSE mínimo de 0,15 e máximo de 0,50, contudo só são considerados satisfatórios, segundo Moriasi *et al.* (2015), valores maiores ou iguais a 0,50 para a simulação de fluxos diários de bacias hidrográficas. Os valores do critério de avaliação de desempenho PBIAS se mostraram em alguns dos cenários com valores acima de 15, o que indica uma subestimação dos resultados, não contemplando eventos de pico de vazão, já os resultados menores que 15 apontam uma superestimação dos mesmos.

Os resultados da calibração foram replicados na modelagem da bacia do ribeirão Rodeador para todos os quatro cenários, porém em todos eles o processo de verificação exibiu valores de critérios de avaliação considerados insatisfatórios. Cabe ressaltar que, tal resultado

insatisfatório não invalida a observação de comportamentos hídricos a partir de modificações de ocupação em bacias hidrográficas. Porém, recomenda-se a utilização de um número maior de parâmetros para teste de sensibilidade e, da mesma forma, realizar novas calibrações com uso de outros softwares específicos para essa função, visto que o *SWATPlus Toolbox* não se mostrou habilitado para o uso de determinados parâmetros habitualmente empregados pela bibliografia aplicada à região.

O balanço hídrico das bacias em todos os cenários se mostraram coerentes. Percebe-se que as mudanças de uso e cobertura do solo, como a diminuição de áreas de vegetação nativa, a introdução do uso agrícola e o aumento das taxas de urbanização, impactaram nos componentes do ciclo hidrológico ao longo da linha histórica dos cenários, acarretando no aumento do escoamento superficial, na diminuição da infiltração e da evapotranspiração, correlacionadas com a diminuição da cobertura vegetal, e aumento das taxas de impermeabilidade e compactação do solo.

Acerca dos resultados da simulação do emprego ou não de práticas conservacionistas nas atividades agropecuárias é perceptível que a adoção de tais ações é capaz de impactar no comportamento e disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica. Dessa forma, a adoção de tais práticas pode diminuir vazões de pico, aumentar as taxas de infiltração e de percolação e, ainda, a recarga de aquífero profundo, o que tem potencial de auxiliar à regularização dos eventos de cheias, a diminuição na produção de sedimentos e o aumento de armazenamento de águas subterrâneas de forma que esse possa ser utilizado como fonte alternativa de recurso hídrico nos períodos mais secos.

Evidencia-se que a inclusão na simulação de dados de eficiência de irrigação e das captações de água subterrâneas e superficiais deverá ser capaz de aperfeiçoar a análise prospectiva do impacto do uso e ocupação futura da região. Da mesma forma, a verificação e a aplicação de metodologias variadas de delimitação de unidades de paisagem (LSU), visto que esse estudo abordou apenas a metodologia que enfatiza as áreas marginais aos cursos d'água como uma paisagem diferenciada, poderão melhor representar o comportamento hidrológico da região e a realidade local.

De modo geral, é notório que a ocupação desordenada e o uso inadequado do solo e da água impactam diretamente nos componentes do ciclo hidrológico das bacias, visto que essa promove a retirada de cobertura vegetal e o aumento da impermeabilização e compactação do solo, o que acarreta na diminuição das taxas de infiltração de água no solo, ampliação da vazão e velocidade do escoamento superficial, a incidência de erosões e carreamento de solo e

prováveis assoreamentos, além do decréscimo do nível freático, importante fonte de alimentação dos córregos e de abastecimento da população.

Considera-se que a preservação de áreas naturais e o fortalecimento da atividade agropecuária conservacionista na região influenciam na segurança hídrica do Distrito Federal, tornando-se importante a busca pelo desenvolvimento sustentável do território.

Recomenda-se aos órgãos e instituições públicas de agricultura e meio ambiente presentes no território, ações que articulem, disseminem e incentivem a efetiva aplicação de técnicas de conservação de água e solo nas áreas rurais, de forma a ser considerada instrumento essencial para a continuidade da vocação rural da área contribuinte ao reservatório Descoberto e garantia de preservação e permeabilidade de áreas de recarga.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADASA - AGÊNCIA REGULADORA DE ÁGUAS, ENERGIA E SANEAMENTO BÁSICO DO DISTRITO FEDERAL (2012). *Plano de Gerenciamento Integrado dos Recursos Hídricos do Distrito Federal – PGIRH /DF*. Brasília - DF.
- ADASA - AGÊNCIA REGULADORA DE ÁGUAS, ENERGIA E SANEAMENTO BÁSICO DO DISTRITO FEDERAL (2020). *Resolução Nº 18, de 19 de outubro de 2020 - Estabelece valores de referência para a determinação da demanda de água por atividade, para fins de outorga prévia ou de direito de uso de recursos hídricos em corpos hídricos de domínio do Distrito Federal e dá outras providências*. Diário Oficial do Distrito Federal. Brasília, DF. 12 p.
- ADASA - AGÊNCIA REGULADORA DE ÁGUAS, ENERGIA E SANEAMENTO BÁSICO DO DISTRITO FEDERAL (2021). *Editais de Chamamento Público nº 01/2021 - Pagamento por serviços ambientais a produtores rurais - Projeto Produtor de Água no Pípiripau*. Brasília, DF. 17 p.
- ADASA; CAESB; SEAGRI; EMATER-DF (2018). *Gestão da Crise Hídrica 2016-2018: Experiências do Distrito Federal* / Editado por Jorge Enoch Furquim Werneck Lima... [et al.] - Brasília, DF. 328 p.
- ALBUQUERQUE, P. E. P. de. & DURAES, F. O. M. (2008). *Uso e manejo de irrigação*. Embrapa Informação Tecnológica; Brasília, DF; Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG. 528 p.
- ALLEN R. G.; PERIRA L. S.; RAES D.; SMITH M. (2006). *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper, nº 56. FAO, Roma, Itália.
- ALMEIDA, L. & SERRA, J.C.V. (2017). *Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas*. Revista FAE, Curitiba, v. 20, n. 1, p. 129 - 137.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (2021). *Atlas da irrigação – Uso da água na agricultura irrigada*. 2 ed., Brasília –DF, 130 p.
- ARAÚJO, D. L. (2018) *Avaliação dos impactos da exploração de águas subterrâneas na Bacia do Ribeirão Rodeador por meio de simulação integrada entre os modelos SWAT e MODFLOW*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Universidade de Brasília, Brasília, 165 p.

- ARNOLD, J. G.; KIRINY, J.R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R.; HANEY, S. L.; NEITSCH, S.L. (2016). *Soil & Water Assessment Tool - Input/Output Documentation*. Texas Water Resources Institute. TR-439. 654 p.
- ARNOLD, J. G.; BIEGER, K.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; DUNBAR, J. A.; ALLEN, P. M. (2018). *Use of Decision Tables to Simulate Management in SWAT+*. WATER. 10(6):713
- ARNOLD, J.G; WHITE, M.J.; ALLEN, P.M.; GASSMAN, P.W.; BIEGER, K. (2021). *Conceptual Framework of Connectivity for a National Agroecosystem Model Based on Transport Processes and Management Practices*. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) Vol 57, No 1, Feb., p.154- 169.
- ASAE - American Society of Agricultural Engineers (1998). *Manure production and characteristics*. ASAE Standards 1998, 45th edition, Section D384.1. St, Joseph, USA. p. 646-648.
- ASAE - American Society of Agricultural Engineers (1998b). *Terminology and Definitions for Agricultural Tillage Implements*. ASAE Standards 1998, 45th edition, Section S414.1. St, Joseph, USA. p. 261-272.
- AZEVEDO, J. A. & SILVA, E. M. (1999). *Tensiômetro: dispositivo prático para controle da irrigação*. Circular Técnica Embrapa nº 001. Planaltina, DF. 37 p.
- BALBINO, N. S. (2020). *Conflito de uso entre abastecimento público e irrigação associado à crise hídrica na Bacia do Alto Descoberto, Distrito Federal*. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 88 p.
- BARATTA JUNIOR, A. P. (2007). *Utilização do composto de resíduos da poda da arborização urbana em substratos para produção de mudas*. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 62 p.
- BARROS, P. B. (2019). *Aplicação do CE-QUAL-W2 para a Modelagem da Estrutura Térmica do Reservatório do Descoberto DF/GO*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 139 p.
- BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. (2012). *Conservação de Solo*. Editora Ícone. São Paulo, SP. 8ed. 355 p.
- BIAS, B. F. S. (1992). *Alternativas de desenvolvimento dos cerrados: manejo e conservação dos recursos naturais renováveis*. FUNATURA/IBAMA. Brasília, DF. 97 p.

- BICALHO, C. C. (2006). *Estudo do transporte de sedimentos em suspensão na Bacia do Rio Descoberto*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) -Universidade de Brasília, Brasília, 142 p.
- BIEGER, K.; ARNOLD, J. G.; RATHJENS, H.; WHITE, M. J.; BOSCH.; ALLEN, P. M.; VOLK, M.; SRINIVASAN, R. (2017). *Introduction to SWAT+, A Completely Restructured Version of the Soil and Water Assessment Tool*. Technical Paper of Journal of the American Water Resources Association (JAWRA).
- BIELENKI JÚNIOR, C. & BARBASSA, A.P. (2012). *Geoprocessamento e recursos hídricos: aplicações práticas*. EdUFSCar, São Carlos, SP, 257 p.
- BONETTI, J. A.; FINK, J. R. (2020). *Manejo e Conservação da Água e do Solo*. Editora Universidade Federal de Lavras. Lavras -MG. 151 p.
- BRAGA, M.B. & CALGARO, M. (2010). *Uso da Tensiometria no Manejo da Irrigação*. Documento Técnico 235, Embrapa Semiárido. Petrolina, PE. ISSN 1808-9992, 30 p.
- BRASIL (2012). *Lei no 12.651 de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências*. Diário Oficial da União, Brasília, DF.
- BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L.; SRINIVASAN, R.; BONUMA, N. B.; MENDIONDO, E. M. (2015a). *A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: challenges and prospects*. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. Vol.8, N.3, p. 1-27.
- BRESSIANI, D. A.; SRINIVASAN, R.; JONES, C. A.; MENDIONDO, E. M. (2015b). *Effects of different spatial and temporal weather data resolutions on the streamflow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil*. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. Vol.8, No 3, p. 1-16.
- BRIGHENTI, T.M. (2015). *Modelagem hidrológica e avaliação de diferentes Métodos de Calibração para o Modelo SWAT*. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, SC. 119 p.
- CABRAL, S. L.; SAKURAGI, J.; SILVEIRA, C. S. (2017). *Incertezas e erros na estimativa de vazões usando modelagem hidrológica e precipitação por RADAR*. Rev. Ambient. Água, Taubaté, v. 12, n. 1, p. 57-70.

- CAMPOS, J. E.G. (2004). *Hidrogeologia do Distrito Federal: bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos*. Brazilian Journal of Geology, p. 41-48.
- CARDOSO, E. R. (2002). *Fatores Influenciando o Uso da Água para Irrigação na Bacia do Lago Descoberto no DF*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 117 p.
- CASTRO, K. B. (2013). *Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do Cerrado intensamente monitorada*. Dissertação (Mestrado em Geociências). Universidade de Brasília, Brasília. xix, 122 p.
- CHAVES, A. A. A.; LACERDA, M. P. C.; KATO, E.; GOEDERT, W. J.; RAMOS, M. L. G. (2010). *Uso das Terras da Parte Norte da Bacia do Rio Descoberto, Distrito Federal, Brasil*. Revista Solos e Nutrição de Plantas. Bragantia, Campinas, v. 69, n. 3, p.711-718.
- CHELOTTI, G. B. (2018) *Análise espaço-temporal da concentração de sedimentos em suspensão no reservatório do Descoberto (DF), por meio de sensoriamento remoto*. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) - Universidade de Brasília, Brasília, 98 p.
- CHEN, Y., MAREK, G. W., MAREK, T. H., BRAUER, D. K., & SRINIVASAN, R. (2018). *Improving SWAT auto-irrigation functions for simulating agricultural irrigation management using long-term lysimeter field data*. Environmental Modelling and Software, 99, p. 25–38.
- CODEPLAN - COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL (1984). *Mapa Geomorfológico do Distrito Federal*. GDF, Brasília, Página única.
- CODEPLAN - COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL (2012). *Distrito Federal em Síntese - Informações Socioeconômicas e Geográficas*. GDF, Brasília, 78 p.
- CONAMA - CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (2005). *Resolução N° 357 de 17 de março de 2005 - Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências*. Brasília, DF, 36 p.
- CORTEZ, A. S. (2007). *Métodos de Cenários Prospectivos como Ferramenta de Apoio ao Planejamento Relativo a Substituição do Atual Uso do Solo por Florestamento. Estudo de Caso: A Bacia do Rio Ibicuí - RS*. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 237 p.
- CRHDF - CONSELHO DE RECURSOS HÍDRICOS DO DISTRITO FEDERAL (2014). *Resolução N° 02 de 17 de dezembro de 2014 - Aprova o enquadramento dos corpos de*

- água superficiais do Distrito Federal em classes, segundo os usos preponderantes, e dá encaminhamentos.* Brasília, DF. 7 p.
- DE MARIA, I. C.; BERTOL, I.; DRUGOWICH, M. I. (2019). *Práticas Conservacionistas do Solo e da Água – Manejo e Conservação do Solo e da Água.* Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, MG. p. 527-588.
- DECHMI, F., BURGUETE, J., & SKHIRI, A. (2012). *SWAT application in intensive irrigation systems: Model modification, calibration and validation.* Journal of Hydrology, 470–471, p. 227–238.
- DEVI, G. K.; GANARSI, B. P.; DWARAKISH, G. S. (2015). *A Review on Hydrological Models.* International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering (ICWRCOE 2015). Aquatic Procedia 4, p. 1001 – 1007.
- EMATER-DF - EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL DO DISTRITO FEDERAL (2008). *Emater-DF 30 anos - Ensinando e Aprendendo.* Brasília, DF. 152 p.
- EMATER-DF - EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL DO DISTRITO FEDERAL (2020a). *Informações Agropecuárias do Distrito Federal 2009 a 2020.* Relatórios anuais - Emater - DF. Brasília, DF.
- EMATER-DF - EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL DO DISTRITO FEDERAL (2020b). *Custos de Produção Agrícola 2020 – Hortaliças e Frutas /Frutíferas / Grandes Culturas/ Orgânicos/ Bovinocultura.* SisCustos - Emater-DF. Brasília, DF. 137 p.
- FERNANDES, S. C. (2005) *Avaliação de Imagens de Satélite de Alta e Muito Alta Resolução Espacial para a Discriminação de Classes de Uso e Ocupação do Solo.* Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Universidade de Brasília, Brasília, 124 p.
- FERNANDES, J. G.; GALVÍNCIO, J. D.; FREIRE, M. B. G. S. (2012). *O Modelo SWAT e suas Possibilidades de Aplicações em APL Agrícolas.* Revista Brasileira de Geografia Física, Recife, p. 115-126.
- FERREIRA, P. A. (2005). *Quantificação e Análise do Uso da Água em Práticas de Agricultura Irrigada na Bacia do Descoberto – DF.* Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 173 p.
- FERREIRA, A.N. (2021). *Avaliação da evapotranspiração simulada com o programa SWAT no Bioma Cerrado.* Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília. 132 p.

- 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. Universidade de Brasília, Brasília. 147 p.
- FERRIGO, S.; MINOTI, R.; ROIG, H. L.; KOIDE, S. (2012). *Análise do modelo SWAT na simulação de produção de sedimentos quando calibrado unicamente para vazão em uma pequena bacia hidrográfica Rural* in Anais do X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Florianópolis, 18 p.
- 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 (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) —Universidade de Brasília, Brasília, 107 p.
- FLORENZANO, T. G. (2002). *Imagens de satélite para estudos ambientais*. São Paulo, Oficina de Textos. 97 p.
- FRAGOSO, M. M. A. (2008). *Estudo hidrológico e de transporte de sedimentos em uma bacia do bioma Cerrado: bacia do córrego Capão Comprido*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 102 p.
- GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; ARNOLD, J. G. (2007). *The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions*. American Society of Agricultural and Biological Engineers, Vol. 50(4): p. 1211-1250.
- GDF - GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL (2012). *Plano Diretor de Ordenamento Territorial*. Brasília - DF.
- GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (2006). *Erosão e Conservação de Solos: Conceitos, Temas e Aplicações*. Ed. Bertrand Brasil. 4 Ed. 340 p.
- HOLLANDA, M. P.; CECÍLIO, R.A.; CAMPANHARO, W. A.; ZANETTI, S. S.; ANDRADE, N.; GARCIA, G. O. (2015). *Avaliação do TOPMODEL na estimativa do escoamento superficial em microbacia hidrográfica em diferentes usos*. Rev. bras. eng. agríc. ambient., Campina Grande, v. 19, n. 5, p. 489-496.
- ICMBIO - INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. (2014) *Plano de Manejo da APA Bacia do Descoberto*. Brasília, 313 p.
- INCRA - INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA (2008). *NORMA DE EXECUÇÃO/INCRA/DD/Nº 71, DE 12 DE MAIO DE 2008. Estabelece critérios e procedimentos referentes à Assessoria Técnica, Social e Ambiental à Reforma Agrária - ATES*. Diário Oficial da União, Brasília, DF.

- LIMA, A.M.M.; PONTE, M.X. (2009). *O Estudo da Paisagem e o Planejamento Estratégico como Bases da Gestão da Oferta Hídrica no Estado do Pará: Discussão Teórica e Metodológica*. Revista Geociências, v.28, n.3, p.319-332
- LIMA, F. M.; ROIG, H. L.; NEUMANN, M. R. B.; LIMA, L. A. S.; SOUZA, A. L. F. (2019). *Serviços Ecosistêmicos e a Agricultura Irrigada na Bacia do Ribeirão Rodeador, Distrito Federal*. Revista Brasileira de Cartografia, vol. 72, n. 2, p. 202-215.
- LIMA, J. E. F. W. (2010). *Modelagem numérica do fluxo da água no solo e do escoamento de base em uma bacia experimental em área agrícola no Cerrado*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. 312 p.
- LIMA, J. E. F. W.; DA SILVA, E. M.; STRAUCH, M. & LORZ, C. (2013). *Desenvolvimento de Base de Dados de Solos para a Aplicação do Modelo SWAT em Bacia do Bioma Cerrado*. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves -RS. 8 p.
- LIMA, F.M. (2019). *Serviços Ecosistêmicos e a Agricultura Irrigada na Bacia do Ribeirão Rodeador, Distrito Federal*. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) - Universidade de Brasília, Brasília, 63 p.
- LOPES, G. R.; TÁVORA, B.E.; SANTOS, R.M.; KOIDE, S. (2009). *Estudo sobre Correlação entre Turbidez e Sólidos em Suspensão para Estimativa da Vazão Sólida em uma Pequena Bacia*. Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande, MS. 13 p.
- LOPES, G. R. (2010). *Estudos Hidrológicos e Hidrossedimentológicos na Bacia do Córrego do Capão Comprido, DF*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Universidade de Brasília, Brasília. 123 p.
- MACHADO, A. R.; MELLO JUNIOR, A. V.; WENDLAND, E. C. (2017). *Avaliação do modelo J2000/JAMS para modelagem hidrológica em bacias hidrográficas brasileiras*. Revista de Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, p. 327-340.
- MACHADO, P. L. O. A. M. & WADT, P. G. S. (2016). *Boas Práticas Agrícolas – Terraceamento*. Embrapa. Rio Branco, Acre. 10 p.
- MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (2018). *Instrução Normativa Nº 39, de 8 de agosto de 2018 - dispõe sobre regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, registro de produto, autorizações, embalagem, rotulagem, documentos fiscais, propaganda e tolerâncias dos fertilizantes minerais destinados à agricultura*. Diário Oficial da União. Edição 154, Seção 1, p. 19.

- MARINHO FILHO, G. M.; ANDRADE, R. S.; ZUKOWSKI JUNIOR, J. C.; MAGALHÃES FILHO, L. N. L. (2012). *Modelos Hidrológicos: Conceitos e Aplicabilidades*. Revista de Ciências Ambientais. Canoas, v.6, n.2, p. 35 - 47.
- MAROUELLI, W. A. & CALBO, A. G. (2009). *Manejo de Irrigação em Hortaliças com Sistema Irrigas®*. Circular Técnica Embrapa nº 069. Brasília, DF. ISSN 1415-3033, 16 p.
- MAROUELLI, W. A.; FREITAS, V. M. T.; COSTA JÚNIOR, A. D.; CALBO, A. G. (2015). *Guia Prático para Uso do Irrigas® na Produção de Hortaliças*. Embrapa. Brasília, DF. 36 p.
- MERWADE, V.; BAFFAUT, C.; BIEGER, K.; BOITHIAS, L.; RATHJENS, H. (2017). *Featured Series Conclusion: SWAT Applications for Emerging Hydrologic and Water Quality Challenges*. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA), p. 1-3.
- MORIASI, D. N.; GOWDA, P. H.; ARNOLD, J. G.; MULLA, D. J.; ALE, S.; STEINER, J. L. (2013). *Modeling the impact of nitrogen fertilizer application and tile drain configuration on nitrate leaching using SWAT*. Agricultural Water Management. V 130. p. 36-43.
- MORIASI, D. N.; GITAU, M. W.; PAI, N., & DAGGUPATI, P. (2015). *Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria*. Trans. ASABE, 58(6), 1763- 1785. <http://dx.doi.org/10.13031/trans.58.10715>.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. (2009). *Soil and water assessment tool - Theoretical documentation version 2009*. Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 654 p.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. (2011). *Ferramentas de Avaliação de Solo & Água - Documentação Teórica, Versão 2009*. Instituto de Recursos Hídricos do Texas - Relatório Técnico nº 406. Texas A&M University System, 634 p.
- NUNES, J. F. (2014). *O modelo LUCIS e o planejamento territorial da bacia do Alto Rio Descoberto*. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, 123 p.
- NUNES, J. F. & ROIG, H. L. (2016). *Modelagem dos Conflitos de Uso e Ocupação do Solo como Ferramenta para o Planejamento Territorial: O Caso da Bacia do Alto Curso do Rio Descoberto DF/GO*. Revista Brasileira de Cartografia, v. 68, n. 7, p. 1285-1301.
- NUTRIPLANT - NUTR3 (2021). *Portfólio de produtos*. Disponível em: <<https://nutriplant.com.br/produto/fte-br-12/>>

- OLIVEIRA, E. A. G. (2015). *Formulações tipo “bokashi” como fertilizantes orgânicos no cultivo de hortaliças*. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 96 p.
- ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (2019). *Situação da População Mundial 2019* - Fundo de População das Nações Unidas. 50p.
- PEIXOTO, R. T. G.; AHRENS, D. C.; SAMAHA, M. J. (1997). *Plantio Direto: o caminho para uma agricultura sustentável*. IAPAR. PRP/PG. Ponta Grossa, PR. 275 p.
- PELUSO, M. L. & OLIVEIRA, W. C. (2006) *Distrito Federal paisagem, população e poder*. São Paulo: Harbra. p. 121.
- PEREIRA, A. R. (2018). *Estudo da contribuição de águas subterrâneas e retirada de água por poços sobre o escoamento dos córregos adjacentes na região do Núcleo Rural Lago Oeste – DF*. il. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília. 141 p.
- PORTELA, J. F. (2020). *Avaliação de espécies químicas potencialmente tóxicas na área de proteção ambiental da bacia do Rio Descoberto, Brasília/DF – Brasil*. Tese (Doutorado em Química) - Universidade de Brasília, Brasília, 117 p.
- PRUSKI, F. F.; MOREIRA, G. T. G.; SILVA, J. M. A.; FERREIRA, C. P.; MOREIRA, M. C. O.; GRIEBELER, N. P.; ANDRADE, M. V. A.; TEIXEIRA, A. F. (2009). *Terraço 4.1 – Práticas mecânicas para a conservação de solo e água em áreas agrícolas*. Editora Aeagri, Viçosa, MG. 88 p.
- RATHJENS, H.; BIEGER, K.; CHAUBEY, I.; ARNOLD, J.G.; ALLEN, P.M., SRINIVASAN, R.; BOSCH, D.D.; VOLK, M. (2016). *Delineating floodplain and upland areas for hydrologic models: a comparison of methods*. Hydrological Processes 30, p. 4367–4383.
- REATTO, A.; MARTINS, E. S.; FARIAS, M. F. R.; SILVA, Â.V.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. (2004). *Mapa pedológico digital: SIG atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo*. Documentos. Embrapa Cerrados, v. 120, p. 1-31.
- REGO, P.G. (2002). *Plantio direto - Economia e Gerência no Manejo de Solos*. Ministério da Agricultura. Brasília-DF. 108 p.
- RESENDE, M. & ALBUQUERQUE, P. E. P. (2002). *Métodos e Estratégias de Manejo de Irrigação*. Circular Técnica Embrapa nº 019. Sete Lagoas, MG. ISSN 1679-1150, 10 p.
- RESENDE FILHO, M. A.; ANDOW, D. A.; CARNEIRO, R. G.; LORENA, D. R., SUIJI, E. R.; ALVES, R. T. (2017). *Economic and productivity incentives to produce organically*

- in Brazil: Evidence from strawberry production in the Federal District. Renewable Agriculture and Food Systems: 34(2); p. 155–168*
- RIBEIRO, A. C., GUIMARÃES, P. T. G., ALVAREZ, V. H. (1999). *Recomendações para o uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais - 5ª aproximação*. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais - CFSEMG. Viçosa, MG. 359 p.
- SAATH, K. C. O. & FACHINELLO, A. L. (2018). *Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil*. Revista Economia e Sociologia Rural, 18p.
- SANA (2021). *Portfólio de produtos*. Sana Comercial Importadora e Exportadora. Disponível em:<[http://www.sanacomercial.com/salitre\\_chile\\_sanacomercial](http://www.sanacomercial.com/salitre_chile_sanacomercial)>
- SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. (2018). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS*. 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 356 p.
- SARTORI, A. (2010). *Desenvolvimento de critérios para classificação hidrológica de solos e determinação de valores de referência para o parâmetro CN*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP, 235 p.
- SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. (2005). *Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 10(4), 05-18.
- SAXTON, K. E. & RAWLS, W. J. (2006). *Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions*. Soil Science Society of Agronomy Journal 70(5): p. 1569-1578.
- SFREDO, G. D. & OLIVEIRA, M. C. N. (2010). *Soja: molibdênio e cobalto*. Documento nº 322, Embrapa Soja. Londrina, PR. ISSN 2176-2937, 36 p.
- SILVA, A. F.; PINTO, J. M.; FRANÇA, C. R. R. S.; FERNANDES, S. C.; GOMES, T. C. A.; SILVA, M. S. L.; MATOS, A. N. B. (2007). *Preparo e Uso de Biofertilizantes Líquidos*. Comunicado Técnico Embrapa nº 130. Petrolina, PE. ISSN 1808-9984, 4 p.
- SILVA, B. F.; SILVA, P. R.; MINOTI, R.; KOIDE, S. (2021). *Análise das aplicações recentes do SWAT+ e novas perspectivas de pesquisa - uma revisão de literatura*. Anais XXVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte, MG. ISSN 2318-0358, 9 p.

- SILVA, G. V. (2009). *Simulação bidimensional da qualidade da água do Lago do Descoberto (DF/GO)*. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) - Universidade de Brasília, Brasília, 117 p.
- SILVA, I. R. O. (2016). *Aplicação do método de cargas máximas totais diárias de nutrientes na bacia do Córrego Rodeador - DF*. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília. 96 p.
- SILVA, P.R. (2015). *Criação de metodologia para caracterização ambiental de imóveis rurais da APA do rio Descoberto no DF com a aplicação das feições necessárias para a inscrição no CAR*. Monografia. (Especialização em Geoprocessamento) - Universidade de Brasília, Brasília, 27p.
- SINGH, V. P. & WOOLHISER, D. A. (2002). *Mathematical modeling of watershed hydrology*. Journal of hydrologic engineering, 7(4), p. 270-292.
- SKORUPA, L. A. (2003). *Áreas de Preservação Permanente e Desenvolvimento Sustentável*. Embrapa Meio Ambiente. Jaguariúna, SP.
- SOBOL, I.M. (2001), *Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates*. Mathematics and Computers in Simulation, n° 55, p. 271–280
- SOUSA, V.F.; MAROUELLI, W.A.; COELHO, E.F.; PINTO, J.M.; COELHO FILHO, M.A. (2011). *Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças*. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, DF. 771 p.
- SOUZA, K. R. O.; SANTOS, G. R.; SOUZA, L. A.; DELAZEN, J. R.; SILVA, E.; FERREIRA, E. (2015). *Farinha de ossos calcinada: ação corretiva e fosfatante no solo*. XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Natal - RN. 4 p.
- STRAUCH, M.; LIMA, J. E. F. W.; VOLK, M.; LORZ, C.; MAKESCHIN, F. (2013). *The impact of Best Management Practices on simulated streamflow and sediment load in a Central Brazilian catchment*. Journal of Environmental Management, 2013; 127(Suppl): p. 24–36.
- TECH, J. (2019). *SWAT+ Editor 1.2.0 Documentation*. Texas A&M AgriLife Research. 126p
- TEIXEIRA, I. I. L. (2018). *Evolução do uso da terra, erosão dos solos e fragmentação da vegetação na APA do Rio Descoberto no Distrito Federal e Goiás*. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 137 p.
- TESHAGER, A. D.; GASSMAN, P. W.; SCHOOF, J. T. (2017). *Simulation of targeted pollutant-mitigation-strategies to reduce nitrate and sediment hotspots in agricultural watershed*. Science of The Total Environment, V 607–608. p. 1188-1200.

- TORRES, E. P. (1997). *Análise da expansão urbana na bacia do lago descoberto através de geoprocessamento*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 133 p.
- TUCCI, C. E. M. (1998). *Modelos Hidrológicos*. 1ª ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 669 p.
- UNESCO - UNIÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA (2021). *The United Nations World Water Development Report 2021 - Valuing Water*. World Water Assessment Programme. Itália. 187 p.
- VALADARES, A. A. (2017). *Análise da Dinâmica do Uso e Cobertura do Solo sobre a Vulnerabilidade Ambiental em área do Distrito Federal*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Universidade de Brasília, Brasília. 216 p.
- VALENTIM, E. F. D. (2008). *Modelagem dinâmica de perdas de solo: o caso do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Descoberto-DF/GO*. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília, 199 p.
- VITO, M. (2007). *Avaliação do risco de contaminação de mananciais hídricos para o abastecimento: o caso da bacia da barragem do descoberto*. Dissertação (mestrado) - Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 181 p.
- Von SPERLING, M. (2007). *Estudos e Modelagem da Qualidade da Água de Rios*. Editora UFMG, Minas Gerais, Brasil. 588 p.
- YOORIN (2021). *Portfólio de produtos*. Yoorin Fertilizantes. Disponível em: <<https://www.yoorin.com.br/pt/produtos/yoorin>>
- ZHANG, X., & ZHANG, M. (2011). *Modeling effectiveness of agricultural BMPs to reduce sediment load and organophosphate pesticides in surface runoff*. Science of the Total Environment, 409(10), p. 1949–1958.
- ZONTA, J.H.; SOFIATTI, V.; COSTA, A.G.F.; SILVA, O.R.F.; BEZERRA, J.R.C.; SILVA, C.A.D.; BELTRÃO, N.E.M.; ALVES, I.; C. JUNIOR, A.F.; CARTAXO, W.V.; RAMOS, E.N; OLIVEIRA, M.C; CUNHA, D.S.; MOTA, M.O.S.; SOARES, A.N.; BARBOSA, H.F. (2012). *Práticas de Conservação de Solo e Água*. Circular Técnica, Embrapa. Campina Grande, PB. 24 p.
- WAILDER, D.; WHITE, M; STEGLICH, E.; WANG, S.; WILLIAMS, J.; JONES, C. A.; SRINIVASAM, R. (2009). *Conservation Practice Modeling*. SWAT. Estados Unidos da América, 78 p.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Washington, DC: USDA. (Agriculture handbook, 537).

- WHITE, M.; BEIGER, K; GAMBONE, M.; HANEY, E.; ARNOLD, J.; GAO, J. (2017). *Development of a Hydrologic Connectivity Dataset for SWAT Assessments in the US*. *Water*, (9,892), 10 p.
- WU, J.; YEN, H.; ARNOLD, J.G.; YANG, E.; CAI, X.; WHITE, M.J.; SANTHI, C.; CHIYUAN MIAO, C.; SRINIVASAN, R. (2020). *Development of reservoir operation functions in SWAT+ for national environmental assessments*. *Journal of Hydrology* 583 (2020) 124556, 20 p.

## APÊNDICES

*\*Todos os apêndices encontram-se disponíveis no repositório GitHub acessível em:  
[https://github.com/priambiente/apendices\\_ptarh\\_unb](https://github.com/priambiente/apendices_ptarh_unb)*

**APÊNDICE A** - Tabela de especificação de fertilizantes recomendados e suas quantidades utilizadas considerando um hectare de cultura cultivada (EMATER-DF, 2020b).

**APÊNDICE B** - Tabela de composição química dos fertilizantes mais recomendados no Distrito Federal (BARATTA JUNIOR, 2007; CAESB, 2021; MAPA, 2018; NUTRIPLAN, 2021; OLIVEIRA, 2015; RIBEIRO *et al.*, 1999; SANA, 2011; SFREDO & OLIVEIRA, 2010; SILVA *et al.*, 2007; SLU, 2021; SOUZA *et al.*, 2015).

**APÊNDICE C** - Catálogo de implementos agrícolas da base de dados Tillage do SWAT baseado no *Appendix A* (ARNOLD *et al.*, 2016).

**APÊNDICE D** - Base de dados compilada referente às características de crescimento de plantas e base de dados urbana fundamentadas em Ferrigo (2014), Arnold *et al.* (2016) e Fernandes *et al.* (2012).