

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

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO  
RIO ALAGADO (DF/GO) COM A APLICAÇÃO DO MODELO  
QSWAT**

**FERNANDA DE JESUS DA SILVA**

**ORIENTADOR: RICARDO TEZINI MINOTI**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL**

**BRASÍLIA / DF, JULHO DE 2019**

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

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO  
RIO ALAGADO (DF/GO) COM A APLICAÇÃO DO MODELO  
QSWAT**

**FERNANDA DE JESUS DA SILVA**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO  
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.**

**APROVADA POR:**

---

**RICARDO TEZINI MINOTTI, Dr. - UnB  
(ORIENTADOR)**

---

**LEONARDO ZANDONADI MOURA, MSc. (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**CARLO RENAN CÁCERES DE BRITES, MSc. (CAESB)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**BRASÍLIA/DF, JULHO DE 2019.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, FERNANDA DE JESUS DA

Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO) com a aplicação do modelo QSWAT. Brasília, 2018.

ix, 71p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2019)

Monografia de Projeto Final -Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Modelagem Hidrológica

2. QSWAT

3. Bacia do Rio Alagado

4. Modelo SWAT

I. ENC/FT/UnB

II. Título II (Série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, F. J. (2019). Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO) com a aplicação do modelo QSWAT. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 71p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Fernanda de Jesus da Silva

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO) com a aplicação do modelo QSWAT.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2019.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Fernanda de Jesus da Silva  
nanda.silvaa@hotmail.com

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus pela minha vida e por me permitir chegar até aqui.

Aos meus pais pelo apoio, amor incondicional e confiança. Ao meu irmão pela amizade e amor.

Aos meus tios pelo amor e por me acolherem quando cheguei a Brasília.

Ao Ramon pela paciência, incentivo, amizade, amor e companheirismo.

À Lizandra pela amizade, carinho, auxílio, conversas longas e momentos compartilhados.

À Thaís que me acolheu, me deu apoio, amor e com quem compartilhei momentos incríveis e ótimas conversas.

Aos amigos que Brasília me deu, e que fizeram meus anos aqui muito melhores.

Ao meu orientador, professor Ricardo Minoti, pelo incentivo e conhecimento compartilhado. E ao Gilliard Nunes, pela ajuda durante a elaboração deste projeto.

À todos que contribuíram de alguma forma para que eu chegasse até aqui.

## RESUMO

A necessidade de compreensão dos processos hidrológicos que ocorrem em bacias hidrográficas é uma tarefa premente, principalmente devido às mudanças que ocorrem ao longo do tempo causadas pelas atividades humanas. Essas mudanças, associadas a escassez de dados monitorados, dificultam o aprimoramento da gestão de recursos hídricos onde as decisões devem ser pautadas, cada vez mais, com base em informações de maior relevância relacionadas aos usos desses recursos. Como forma de auxílio nesse processo, torna-se necessário caracterizar os sistemas hídricos e unir as informações disponíveis, de maneira estruturada, subsidiando o processo de tomada de decisão. Para unir as informações sobre bacias hidrográficas e gerar respostas em termos das situações reais e de cenários futuros, amplia-se, ao redor do Planeta, ao longo dos últimos anos, a utilização dos modelos hidrológicos. Esses modelos visam representar de forma simplificada a realidade. Com enfoque de gerar informações a cerca da bacia hidrográfica do Rio Alagado (DF/GO), que é afluente ao reservatório de Corumbá IV em um segmento onde está sendo construído o futuro sistema de captação de água Corumbá IV, o presente estudo realizou a caracterização ambiental da bacia hidrográfica do rio Alagado e a simulação hidrológica da bacia, utilizando o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) com a interface QSWAT. As etapas metodológicas consistiram na construção da base de dados, caracterização física da bacia, simulação hidrológica, análise de sensibilidade, calibração da vazão a partir de dados disponíveis e, por fim, simulação hidrológica a partir de diferentes cenários de uso e ocupação do solo. Os resultados obtidos na análise de sensibilidade permitiram identificar os parâmetros mais sensíveis para a área de estudo, sendo estes relacionados com águas subterrâneas, escoamento superficial, fluxo de base e características do solo. A melhor calibração obtida neste estudo, realizada de junho de 2009 a novembro de 2011, resultou em um coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) de 0,38, que segundo Moriasi et al., (2007) é insatisfatório. A baixa disponibilidade de dados, pode ter dificultado a calibração. Com relação aos cenários, pode-se observar as diferenças no comportamento das vazões para o cenário preservado e antropizado, em que estes apresentam comportamentos inversos nos períodos de pico e recessão de vazão, demonstrando a necessidade de controle nos usos do solo. De modo geral pode-se concluir que o uso do modelo SWAT, acoplado ao software livre QGIS, é viável, e que a ferramenta de modelagem permite a geração de informações para bacias com poucos dados, como é o caso da bacia estudada.

Palavras-chave: Modelagem Hidrológica; QSWAT; Bacia do Rio Alagado; Modelo SWAT.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	x
LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES .....	xi
1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - OBJETIVOS.....	4
2.1 OBJETIVO GERAL .....	4
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 BACIA HIDROGRÁFICA E IMPACTOS ANTRÓPICOS .....	5
3.1.1 Ciclo Hidrológico .....	5
3.1.2 Bacia Hidrográfica.....	6
3.1.3 Impactos Antrópicos.....	7
3.2 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL.....	11
3.3 CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA.....	14
3.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	14
3.4.1 Classificação dos modelos.....	16
3.4.2 Modelo SWAT .....	17
3.4.3 SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty Program).....	20
4 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	23
4.1.1 Caracterização qualitativa das águas na bacia do rio Alagado.....	26
4.1.2 Hidrografia.....	27
4.1.3 Relevo.....	27
4.1.4 Tipos de Solos .....	29
4.1.5 Uso e Ocupação do Solo.....	30
4.1.6 Clima .....	31
4.2 CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA.....	33
4.3 ESTRUTURAÇÃO DA BASE DE DADOS .....	36

4.4	SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA .....	39
4.4.1	Simulação Inicial .....	39
4.4.2	Análise de Sensibilidade.....	40
4.4.3	Calibração .....	43
4.5	ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS .....	44
5 -	RESULTADOS .....	45
5.1	CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA.....	45
5.2	MODELAGEM .....	46
5.2.1	Delimitação da Bacia, das Sub-bacias e HRUs .....	46
5.2.2	Simulação Inicial .....	48
5.2.3	Análise de Sensibilidade.....	49
5.2.4	Calibração.....	51
5.2.5	Simulação de Cenários .....	58
6 -	CONCLUSÕES .....	61
7 -	RECOMENDAÇÕES.....	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	64

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1- Ciclo hidrológico (adaptado de Fisrwg, 1998) .....	6
Figura 3.2- Divisão Hidrográfica Nacional (CNRH, 2003) .....	12
Figura 3.3- Classes de enquadramento dos corpos de água doce segundo os usos (ANA, 2017).....	13
Figura 3.4 - Fluxograma dos modelos hidrológicos (Tucci, 2005) .....	16
Figura 4.1- Fluxograma das etapas do projeto. ....	23
Figura 4.2 - Localização da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO).....	24
Figura 4.3 - Mapa da área de estudo.....	25
Figura 4.4 - Proposta de enquadramento PGIRH (2012). ....	26
Figura 4.5 – Hidrografia da Bacia Hidrográfica do Rio Alagado (DF/GO).....	28
Figura 4.6 - Mapa de declividade da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO).....	28
Figura 4.7 - Mapa de tipos de solo da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO).....	29
Figura 4.8 – Mapa de Uso e Ocupação do Solo da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO). ....	30
Figura 4.9 - Precipitação média mensal histórica de 1979 a 2014 na área da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO). ....	31
Figura 4.10 - Temperaturas máximas e mínimas mensais referentes à série histórica de 1979 a 2014 na área da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO). ....	32
Figura 4.11 - Umidade relativa do ar média mensal histórica de 1979 a 2014 na área da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO).....	33
Figura 4.12 - Mapa de localização das estações climática e fluviométrica.....	38
Figura 5.1- Mapa da bacia hidrográfica e sub-bacias do rio Alagado (DF/GO). ....	47
Figura 5.2 – Hidrograma dos dados simulados sem calibração (2009-2013) e dados observados (2009-2011) para sub-bacia 11 da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO) (Adasa-Hidroweb). ....	49
Figura 5.3 – Hidrograma dos dados simulados sem calibração e dados observados para sub-bacia 11 da Bacia Hidrográfica do Rio Alagado (DF/GO) (Adasa-Hidroweb). ....	49
Figura 5.4 – Análise de sensibilidade global da calibração inicial.....	50
Figura 5.5 - Hidrograma dos dados simulados da calibração e dados observados para sub-bacia 11 da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO) (Adasa-Hidroweb). ....	50
Figura 5.6 - Hidrograma da calibração 1 para a sub-bacia 11 da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO) (Adasa-Hidroweb).....	52



Figura 5.7- Hidrograma da calibração 2 para a sub-bacia 11 da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO)(Adasa-Hidroweb).....	53
Figura 5.8 - Hidrograma da calibração 3 para a sub-bacia 11 da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO) (Adasa-Hidroweb).....	54
Figura 5.9 -Hidrograma da calibração 4 para a sub-bacia 11 da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO) (Adasa-Hidroweb).....	55
Figura 5.10 - Hidrograma de dados observados, não calibrados e calibrados para a sub-bacia 11 da bacia do rio Alagado (DF/GO) (Adasa-Hidroweb). ....	56
Figura 5.11 - Hidrograma de dados não calibrados e calibrados para o exutório da bacia do rio Alagado (DF/GO). ....	57
Figura 5.12- Cenário preservado de uso e ocupação do solo para a bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO).....	59
Figura 5.13 - Cenário antropizado de uso e ocupação do solo para a bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO).....	60
Figura 5.14 - Hidrograma para os diferentes cenários de uso e ocupação do solo.....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Percentual de uso e cobertura do solo na BH do rio Alagado (DF/GO).....	31
Tabela 4.2 – Tipologias de uso e ocupação do solo .....	37
Tabela 4.3 – Parâmetros mais sensíveis para estudos no centro-oeste.....	40
Tabela 4.4 - Parâmetros utilizados na Análise de Sensibilidade e respectivos intervalos mínimo e máximo possíveis de variação. (adaptado de Ferrigo, 2014). .....	41
Tabela 4.5 - Características dos parâmetros utilizados na Análise de Sensibilidade da sub-bacia 11 da bacia do rio Alagado. (adaptado de Ferrigo, 2014).....	42
Tabela 4.6 – Classificação de desempenho para passo mensal (adaptado de Moriasi <i>et al.</i> (2007). .....	43
Tabela 4.7 - Parâmetros utilizados na calibração. ....	43
Tabela 5.1 - Características morfométricas da bacia do rio Alagado (DF/GO). ....	45
Tabela 5.2 - Uso e ocupação do solo da área a montante do exutório da sub-bacia 11 bacia do rio Alagado (DF/GO). ....	47
Tabela 5.3 - Tipos do solo da área a montante do exutório da sub-bacia 11 da bacia do rio Alagado (DF/GO). ....	48
Tabela 5.4 - Classes de declividade da área a montante do exutório da sub-bacia 11 da bacia do rio Alagado (DF/GO). ....	48
Tabela 5.5 – Intervalos de Mínimo e Máximo utilizados na calibração 2.....	53
Tabela 5.6 - Intervalos de Mínimo e Máximo utilizados na calibração 3. ....	54
Tabela 5.7 - Intervalos de Mínimo e Máximo utilizados na calibração 4. ....	55
Tabela 5.8 - Parâmetros, intervalos e valores resultantes da calibração 4 da sub-bacia 11 da bacia do rio Alagado (DF/GO). ....	57

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIACÕES

A - Área da bacia

ADASA - Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal

AGRL -Agricultura Genérica

ALPHA\_BF -Constante de recessão do fluxo de base

ANA - Agência Nacional de Águas

ANION\_EXCL - Fração de porosidade (espaços vazios)

ASCE - *American Society of Civil Engineers*

BARR -Solo exposto

BH - Bacia hidrográfica

CAESB - Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal

CAMP -Campo Limpo

CBH - Comitê de Bacia Hidrográfica

CERR -Cerrado

CFSR Reanálise do Sistema de Previsão Climática

Cm -Coeficiente de manutenção

CN2 - Curva número na condição II

CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CODEPLAN - Companhia de Planejamento do Distrito Federal

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CX - Cambissolo Háplico

DBO – Demanda bioquímica de oxigênio

DEEPST -Altura inicial da água no aquífero profundo

DF - Distrito Federal

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ESCO - Fator de compensação de evaporação do solo

ETA - Estação de Tratamento de Água

F - Fator de forma

GEE - Gases de efeito estufa

GO - Goiás

GW\_DELAY -Tempo de retardo da água subterrânea

GW\_REVAP - Coeficiente "revap" de água subterrânea

GWHT -Altura inicial da água subterrânea  
GWQMN -Limiar da profundidade da água no aquífero superficial  
HRU -Unidade de Resposta Hidrológica  
IC - Índice de Circularidade  
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia  
Kc - Coeficiente de compacidade  
L - Comprimento do canal principal  
Lt - Comprimento total dos canais  
LV - Latossolo Vermelho  
LVA-Latossolo Vermelho-Amarelo  
UR - Umidade relativa  
MATA - Mata Galeria  
MDE - Modelo Digital de Elevação  
MMA - Ministério do Meio Ambiente  
MUSLE - Modified Universal Soil Loss Equation  
NCEP - Centros Nacionais de Previsão Ambiental  
NSE- Nash- Sutcliffe  
OD – Oxigênio dissolvido  
P -Perímetro da bacia  
PAST -Pastagem  
PNRH- Política Nacional de Recursos Hídricos  
PNRS- Política Nacional de Resíduos Sólidos  
PRH - Plano de recursos hídricos  
QGIS - Quantum Geographic Information System  
QSWAT – Interface do modelo SWAT no software QGIS  
RAs – Regiões Administrativas  
REVAPMN -Profundidade em aquífero profundo para que aconteça o "revap"  
RIDE/DF - Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno  
SANEAGO - Saneamento de Goiás S.A  
SHALLST - Altura inicial da água no aquífero raso  
SINGREH -Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos  
SNIRH - Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos  
SOL\_AWC - Capacidade de água disponível no solo  
SOL\_BD - Densidade aparente do solo

SOL\_K - Condutividade hidráulica saturada do solo  
SWAT - Soil and Water Assessment Tool  
SWAT- CUP - SWAT - Calibration and Uncertainty Program  
UHE - Usina Hidrelétrica  
UMAD -Residencial Média/Alta Densidade  
UMBD -Residencial Média/Baixa Densidade  
USGS - United States Geological Survey  
WATR -Água

# 1 - INTRODUÇÃO

O crescimento populacional vem acarretando diversos impactos ambientais devido ao aumento da demanda por recursos naturais. Para atender ao crescimento na demanda por água, energia, alimentos e habitação, ocorre a intensificação da exploração mineral, da agricultura, das atividades industriais, do desmatamento e da construção de usinas hidrelétricas ou termoelétricas. O aumento da população acarreta, também, na expansão das ocupações urbanas, parte delas em condições irregulares e precárias. Essas atividades, em conjunto, alteram as vazões naturais dos cursos d'água e aumentam as cargas geradas por poluição nas formas pontual e difusa. Em síntese, as interferências humanas alteram a dinâmica dos processos que ocorrem em bacias hidrográficas causando desequilíbrio dos ecossistemas e resultando na degradação dos recursos naturais.

Para minimizar os impactos dessas ações são necessárias medidas de gestão que garantam a sustentabilidade ambiental das bacias hidrográficas. Para uma efetiva gestão é necessária a compreensão dos processos que ocorrem nas bacias hidrográficas e, também, dos efeitos de suas alterações. Um enfoque usualmente adotado para auxiliar no estudo e no entendimento desses processos é a modelagem hidrológica.

Visando aprimorar o conhecimento acerca das bacias hidrográficas e suprir a falta de informações sobre esses sistemas, tem-se utilizado os modelos hidrológicos acoplados aos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs). O acoplamento facilita a construção da base de dados a ser integrada aos modelos. Os SIGs contribuem no processo de obtenção de dados de entrada para os modelos hidrológicos e aceleram os processos de simulação e de geração de respostas sobre as alterações nas bacias.

Alguns modelos hidrológicos permitem a utilização de séries climáticas históricas e dados de uso e ocupação do solo para simular cenários com diferentes intervenções humanas na bacia hidrográfica, tornando possível elaborar o diagnóstico hidrológico e de qualidade de água, prognósticos e, com as informações geradas, contribuir com a elaboração de planos de gerenciamento. Os planos podem auxiliar na prevenção e na adoção de medidas mitigadoras para os impactos esperados nos recursos hídricos.

Um dos modelos hidrológicos mais utilizados na atualidade em todo o Planeta é o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), extremamente interessante para a simulação hidrológica e simulação de cargas de poluição nas bacias hidrográficas. O SWAT é um

modelo que foi desenvolvido para simulação de bacias hidrográficas não instrumentadas, permitindo a geração de dados iniciais sobre sistemas hídricos com carência de dados.

A bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO), uma bacia de domínio da União, é uma das unidades hidrográficas localizadas na Região Metropolitana de Brasília que carece de estudos relacionados ao entendimento dos processos hidrológicos e, também, das condições atuais e dos impactos gerados frente às alterações no uso e na ocupação do solo em seu território.

A divisão político-administrativa da bacia do rio Alagado é caracterizada por abranger duas unidades da Federação. A área a montante localiza-se no Distrito Federal e a área a jusante no estado de Goiás. Integra a bacia hidrográfica do rio Corumbá, assim como a bacia hidrográfica do rio Paranaíba. A bacia é afluente do Reservatório de Corumbá IV, no segmento onde está localizado o ponto da futura captação de água para abastecimento humano para o Estado de Goiás e para a região sudoeste do Distrito Federal. Essa característica reforça a necessidade de compreensão das alterações na ocupação e no manejo do solo da bacia hidrográfica e sobre como essas modificações relacionam-se aos impactos qualitativos e quantitativos nos recursos hídricos.

Apesar da importância da bacia hidrográfica do rio Alagado, essa unidade hidrográfica apresenta escassez de dados monitorados. Isso é evidenciado pela diferença na disponibilidade de dados ambientais entre o Distrito Federal e as áreas do entorno, tornando o entendimento de processos hidrológicos nessa unidade hídrica mais complexo.

Essa realidade reforça a importância tanto do processo de caracterização ambiental da bacia hidrográfica do rio Alagado como da simulação hidrológica da bacia, visando o aprimoramento do conhecimento relacionado a esse sistema hídrico.

O presente trabalho visou, dessa forma, aprimorar as informações disponíveis sobre a bacia hidrográfica do rio Alagado. Com base em um enfoque de primeira aproximação, foi realizada a busca por dados secundários e informações disponíveis, a fim de caracterizar a área ocupada pela bacia, estimar o balanço hídrico, entender a atual condição da bacia hidrográfica, frente às alterações antrópicas, de maneira a fornecer aos gestores locais ou regionais informações quantitativas iniciais acerca das águas que chegam ao lago Corumbá IV. Além do entendimento da situação atual, foram elaborados cenários sobre possíveis condições futuras.

Quanto à organização, o presente trabalho está estruturado com base nos seguintes capítulos: (2) objetivos geral e específicos; (3) fundamentação teórica e revisão

bibliográfica; (4) materiais e métodos; (5) resultados; (6) conclusão e, por último, as referências bibliográficas.



## **2 - OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

O trabalho teve como objetivo realizar um diagnóstico sobre a bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO) por meio de geoprocessamento e simulação hidrológica, com a aplicação do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), interface QSWAT.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar a caracterização ambiental da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO), quanto aos aspectos físicos e antrópicos.
- Aplicar o modelo SWAT para a realização da simulação hidrológica da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO).
- Avaliar as alterações nos processos hidrológicos da bacia hidrográfica do rio Alagado a partir de diferentes cenários de uso e ocupação do solo.

## **3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 BACIA HIDROGRÁFICA E IMPACTOS ANTRÓPICOS**

#### **3.1.1 Ciclo Hidrológico**

A circulação contínua da água através da hidrosfera, atmosfera, biosfera e geosfera, constituem o ciclo hidrológico, durante esse processo a água passa por diversas transformações que modificam seu estado físico (Bourotte, 2014). Os fatores que impulsionam este ciclo são energia térmica solar, a força dos ventos e a força da gravidade que é responsável pela precipitação, infiltração e deslocamento de massas de água (Tundisi, 2003).

O ciclo hidrológico pode ser descrito inicialmente como um fenômeno global de circulação fechada da água existente no planeta em suas diversas formas entre a superfície terrestre nos continentes e oceanos e a atmosfera. No entanto a nível local, quando se consideram áreas menores o ciclo hidrológico é caracterizado como um ciclo aberto (Tucci, 2002).

O intercâmbio entre as circulações da superfície terrestre e da atmosfera ocorre no sentido superfície-atmosfera, em que o fluxo se dá principalmente por evaporação e evapotranspiração, e no sentido atmosfera-superfície em que a transferência ocorre em qualquer estado físico, sendo mais expressivas as precipitações pluviométricas, o granizo e a neve (Miranda *et al.*, 2010). Durante esse intercâmbio os processos recebem nomes distintos em cada fase do ciclo, sendo elas: evaporação, precipitação, interceptação, infiltração, percolação, escoamento superficial e transpiração, em que cada uma tem fundamental importância na dinâmica hidrológica.

O ciclo hidrológico é apresentado de forma simplificada na Figura 3.1.

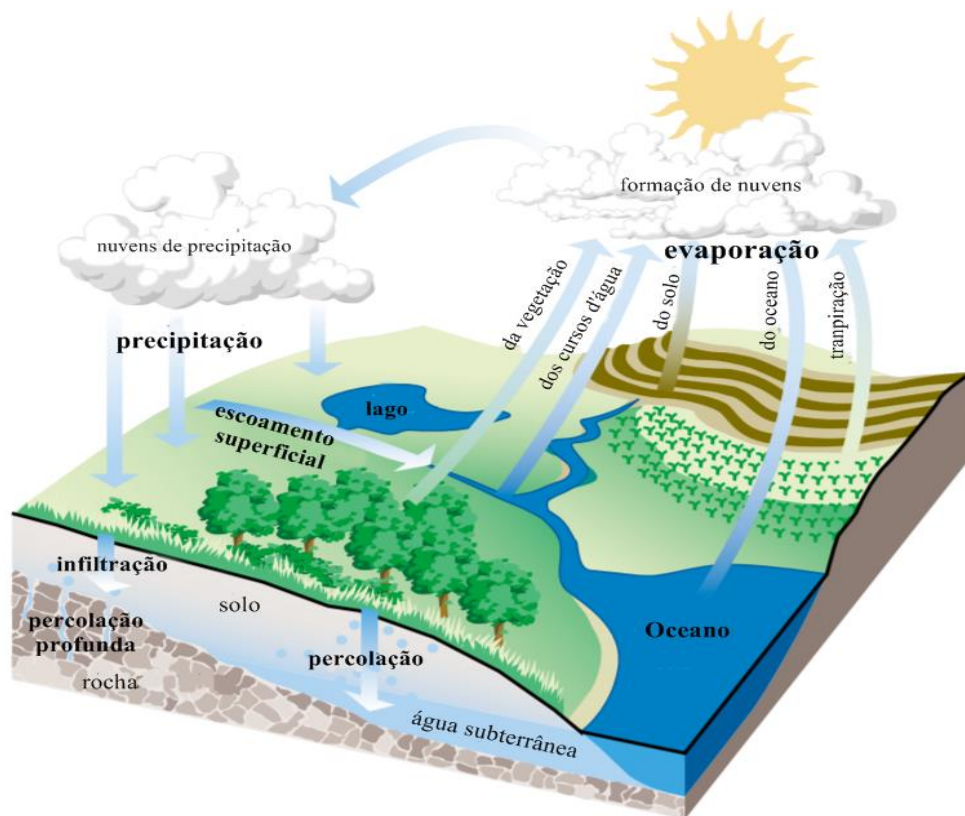


Figura 3.1- Ciclo hidrológico (adaptado de Fisrwg, 1998)

### 3.1.2 Bacia Hidrográfica

A bacia hidrográfica (BH) é uma área de captação natural da água da precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída. A bacia hidrográfica compõe-se de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um leito único no exutório (Tucci, 2002).

Uma bacia hidrográfica é um sistema que integra as conformações do relevo e drenagem, pode ser considerada um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, em que os volumes evaporados, transpirados e infiltrados profundamente são considerados perdas intermediárias (Tucci, 2002; Von Sperling, 2007).

As áreas urbanas, industriais, agrícolas e de preservação estão inseridas em alguma bacia hidrográfica, assim no exutório, estarão representados todos os processos que fazem parte do seu sistema, as respostas ali são consequências das formas de ocupação do território e da utilização das águas (Porto & Porto, 2008).

Segundo Tucci (2002) o papel hidrológico da bacia hidrográfica é o de transformar uma entrada de volume concentrada no tempo (precipitação) em uma saída de água (escoamento) de forma mais distribuída no tempo. Porém devido as mudanças que ocorrem

nas bacias ao longo do tempo, devido aos impactos causados pelas atividades humanas, há alteração no ciclo hidrológico e na dinâmica dos processos, entre eles o de escoamento.

### **3.1.3 Impactos Antrópicos**

Os principais componentes das bacias hidrográficas -água, solo, vegetação e fauna- coexistem em permanente e dinâmica interação, respondendo às interferências naturais e àquelas de natureza antrópica, afetando os ecossistemas como um todo (Fernandes, 2014). O impacto das atividades antrópicas inicia-se com o uso e ocupação do solo e sua forte influência sobre a qualidade ambiental, na qual suas interações e interferências nos corpos d'água são causados pela pressão e ocupação do espaço (Ortega, 2011).

Os sistemas aquáticos têm importância fundamental para manutenção da vida, portanto para suprir suas necessidades, os centros urbanos, com suas demandas e produção de resíduos, instalaram-se próximos a estes, acelerando o processo de deterioração de suas características físicas, químicas e biológicas, resultando numa crise em que grande parte da água doce no planeta apresenta algum tipo de contaminação (Silva *et al.*, 2006).

Os recursos hídricos constituem indicadores das condições dos ecossistemas nas bacias e sub-bacias hidrográficas (Fernandes, 2014). Isso porque as diferentes atividades como, impermeabilização do solo, desmatamento, agricultura, disposição inadequada de resíduos e efluentes, entre outros, geram uma sucessão de impactos que por fim chegam aos corpos d'água.

O crescimento populacional desordenado inicia uma série de problemas, econômicos, sociais e ambientais. Esse crescimento atrelado a falta de infraestrutura, ocasionam o aumento de cargas pontuais e difusas. Nas fontes pontuais, os poluentes atingem os sistemas hídricos de forma concentrada no espaço, enquanto que nas fontes difusas, estes adentram os sistemas hídricos distribuídos ao longo de sua extensão (Von Sperling, 2007). As cargas podem ser de origem orgânica ou inorgânicas. As cargas orgânicas tem origem nos restos e dejetos animais e na matéria orgânica vegetal, já as inorgânicas se originam nas atividades humanas, no uso de pesticidas, nos efluentes industriais e na lavagem pelo escoamento de superfícies contaminadas, como áreas urbanas (Tucci *et al.*, 2001).

As fontes de carga pontuais são advindas principalmente de esgotos domésticos e efluentes industriais. Por serem mais facilmente identificadas por sua localização definida, seu controle é mais eficiente e rápido. Contudo, para as fontes difusas, há dificuldades no monitoramento, pois dependem do mapeamento do uso e ocupação do solo na bacia, dada a relação intrínseca do solo drenado e a qualidade da água (Souza, 2012). Em áreas urbanas,

a poluição difusa tem composição complexa - de metais e óleos a sólidos; na área rural é devida, em grande parte, à drenagem pluviométrica de solos agrícolas, sendo associada aos sedimentos (carreados quando há erosão dos solos), aos nutrientes e aos defensivos agrícolas (Mansor *et al.* , 2006).

#### 3.1.3.1 Impermeabilização dos solos

Os problemas relacionados ao uso e ocupação do solo em áreas urbanas são consequência do aumento da população e da falta de planejamento. O aumento da população ocasiona o aumento do número de habitações e por conseguinte aumento das áreas impermeáveis.

A impermeabilização exerce um forte impacto no solo, eliminando grande parte de sua utilidade, essa impermeabilização também pode exercer grandes pressões nos recursos hídricos e conduzir a alterações no estado ambiental das bacias hidrográficas, que podem afetar os ecossistemas e os serviços que estes prestam relacionados com a água (Comissão Europeia, 2012).

Com a impermeabilização a quantidade de água pluvial absorvida pelo solo diminui, em casos extremos, essa absorção é impedida totalmente, em consequência ocorrem impactos diretos no ciclo hidrológico, há aumento do escoamento superficial pois a capacidade de armazenamento do solo é reduzida, causando erosão, aumentando o risco de inundações e os danos por elas causados, além dos efeitos indiretos no microclima, que afetam a temperatura, a umidade e a estabilidade do solo (Comissão Europeia, 2012).

Medidas precisam ser tomadas para diminuir os impactos da urbanização, é necessário planejamento e infraestruturas sustentáveis para contornar e superar os problemas causados pela impermeabilização. O uso de pavimentos e superfícies permeáveis, infraestrutura verde e arborização urbana são algumas das alternativas para atenuar os efeitos da impermeabilização dos solos.

#### 3.1.3.2 Resíduos Sólidos

O desenvolvimento econômico, o crescimento populacional, a urbanização e a revolução tecnológica vêm sendo acompanhados por alterações no estilo de vida e nos modos de produção e consumo da população (Gouveia, 2012). Em consequência a geração de resíduos sólidos vem aumentando continuamente, causando diversos impactos.

Uma das práticas que causam impactos ambientais é a disposição inadequada de resíduos sólidos. Quando depositados em fundos de vales, às margens de ruas ou cursos

d'água, podem provocar contaminação dos corpos hídricos, assoreamento, enchentes e proliferação de vetores transmissores de doenças (Mucelin & Bellini, 2008).

Uma das formas inadequadas de disposição de resíduos sólidos e que é muito comum no Brasil são os lixões, que representam uma grave ameaça para o solo e corpos d'água superficiais e subterrâneos. Os lixões não possuem estruturas que evitem a percolação do lixiviado através do solo e contaminem o mesmo e os corpos hídricos. Além disso no processo de decomposição da matéria orgânica além do lixiviado há produção de biogás que acarreta na poluição do ar.

Para conter esses impactos é preciso primeiramente conscientização, para mudanças no padrão de consumo e diminuição na geração de resíduos. Quando gerado o resíduo deve ter destinação e disposição final ambientalmente adequada. Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, Lei nº 12.305 de 2010) a destinação de resíduos inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético e a disposição a distribuição ordenada de rejeitos em aterro, observando normas operacionais específicas (BRASIL, 2010).

### 3.1.3.3 Efluentes domésticos e industriais

O despejo de efluentes domésticos e industriais sem tratamento nos corpos hídricos ocasionam impactos ambientais, pois causam desequilíbrio ao ecossistema. Os efluentes domésticos, apresentam uma elevada carga de matéria orgânica, nutrientes, sedimentos e coliformes fecais. Os efluentes industriais podem apresentar matéria orgânica, nutrientes, sólidos em suspensão e poluentes tóxicos (Santos, 2002).

A introdução de matéria orgânica em um corpo d'água resulta, indiretamente, no consumo de oxigênio dissolvido, isso devido ao processo de estabilização da matéria orgânica realizada por bactérias decompositoras que utilizam o oxigênio disponível para respiração, causando impacto na vida aquática (Von Sperling, 2007). Com a decomposição da matéria orgânica há liberação de nutrientes que podem causar principalmente em lagos a eutrofização, que é o processo em que ocorre a proliferação de algas que consomem o oxigênio, gerando impacto ao ecossistema aquático.

Para diminuir o impacto da disposição desses efluentes é necessário que antes do lançamento estes passem por um tratamento, para que assim os corpos hídricos consigam assimilar as cargas e restabelecer o equilíbrio, minimizando os impactos sobre os corpos d'água.

#### 3.1.3.4 Desmatamento

As florestas e os ecossistemas naturais abrigam a biodiversidade e desempenham papel fundamental para regular a oferta de recursos hídricos e para a conservação dos solos (MMA, 2016). O desmatamento gera diversos impactos negativos para a sociedade e o meio ambiente, sua causa geralmente está relacionada a extensão da agricultura e pecuária, mineração, queimadas e urbanização.

Em consequência do desmatamento tem-se a perda de biodiversidade, interferência no ciclo hidrológico, desertificação, erosão, assoreamento dos cursos d'água e a emissão de gases de efeito estufa (GEE), que causam mudanças no clima. A ciclagem de água é uma função ambiental muito importante, no Brasil devido aos elevados índices de desmatamento o transporte de umidade é afetado causando diminuição na ocorrência de precipitações no sul e sudeste do país (Santos et. al, 2017).

Para solucionar esse problema é necessário fiscalização e punições efetivas, políticas públicas eficazes e conscientização ambiental da população.

#### 3.1.3.5 Agricultura

Em diversos casos a agricultura se instala as margens dos cursos d'água, por serem áreas que apresentam solos com relevo e propriedades físico-químicas favoráveis à agricultura (Martini & Trentini, 2011). Porém essa proximidade traz geralmente diversos impactos principalmente em relação ao uso de fertilizantes e agrotóxicos que são carreados pela chuva até o corpo hídrico.

Atualmente, o principal uso da água no Brasil, em termos de quantidade utilizada, 46,2% é destinada a irrigação (ANA, 2017). Devido a ineficiência da muitos processos de irrigação grande parte dessa água acaba evaporando. Além das consequências do uso da água na irrigação, existem diversos impactos indiretos aos recursos hídricos decorrentes das atividades agrícolas, principalmente nas situações em que os danos são difusos, há também os impactos hidrológicos devido ao desmatamento, erosão do solo e ocupação de terras marginais aos cursos d'água (Martini & Trentini, 2011).

Para evitar esses impactos e para que o solo mantenha suas propriedades essenciais para produção de culturas, evitando o desequilíbrio e o aparecimento de pragas, é necessário conservar as áreas naturais e manter a biodiversidade que vão dar suporte ao solo (Rempel *et al.*, 2015). Além disso devem ser incentivadas práticas como a adoção de sistemas de agricultura multifuncional em que o enfoque central é a qualidade do processo de produção, aproximando a proteção ambiental e a produção agrícola (Martini & Trentini, 2011).

### **3.2 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL**

No Brasil a Lei Federal nº 9.333/97 determina a bacia hidrográfica como unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – (SINGREH)(BRASIL, 1997). As instituições do SINGREH possuem diferentes naturezas jurídicas e têm funções distintas, podendo ser deliberativas (Conselhos de Recursos Hídricos e Comitês de Bacias) ou operacionais (Órgãos Gestores e Agências de Água) (ANA, 2017).

A PNRH prevê que a gestão da água não deve dissociar aspectos de quantidade e qualidade e deve considerar a diversidade socioeconômica e geográfica das diferentes regiões do País, o planejamento dos setores usuários e os planejamentos regionais, estaduais e nacional, além da integração com a gestão ambiental, do uso do solo, sistemas estuarinos e zonas costeiras (ANA, 2017).

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) instituiu a partir da Resolução n.32 de 15 de outubro de 2003 a divisão hidrográfica nacional. Considera-se como região hidrográfica o espaço territorial brasileiro compreendido por uma bacia, grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas com características naturais, sociais e econômicas homogêneas ou similares, com vistas a orientar o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos (CNRH, 2003). Atualmente o Brasil é dividido em doze Regiões Hidrográficas, representadas na Figura 3.2.

Apesar do critério de similaridade para a divisão hidrográfica, com relação a disponibilidade de água a distribuição é desigual nas bacias hidrográficas brasileiras e, conseqüentemente, nos estados. Cerca de 80% da água superficial do país encontra-se na Região Hidrográfica Amazônica que, por outro lado, possui baixa densidade demográfica e pouca demanda por uso de água (ANA, 2017).

O Comitê de Bacia Hidrográfica (CBH) constitui fórum de debates para a tomada de decisões sobre questões relacionadas à gestão dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica específica. Os CBHs estão estruturados para promover a gestão participativa e descentralizada dos recursos hídricos, atuando no fomento à implementação dos instrumentos de gestão, da negociação de conflitos pelo uso da água e da promoção dos diferentes usos da água na bacia (ANA, 2017).



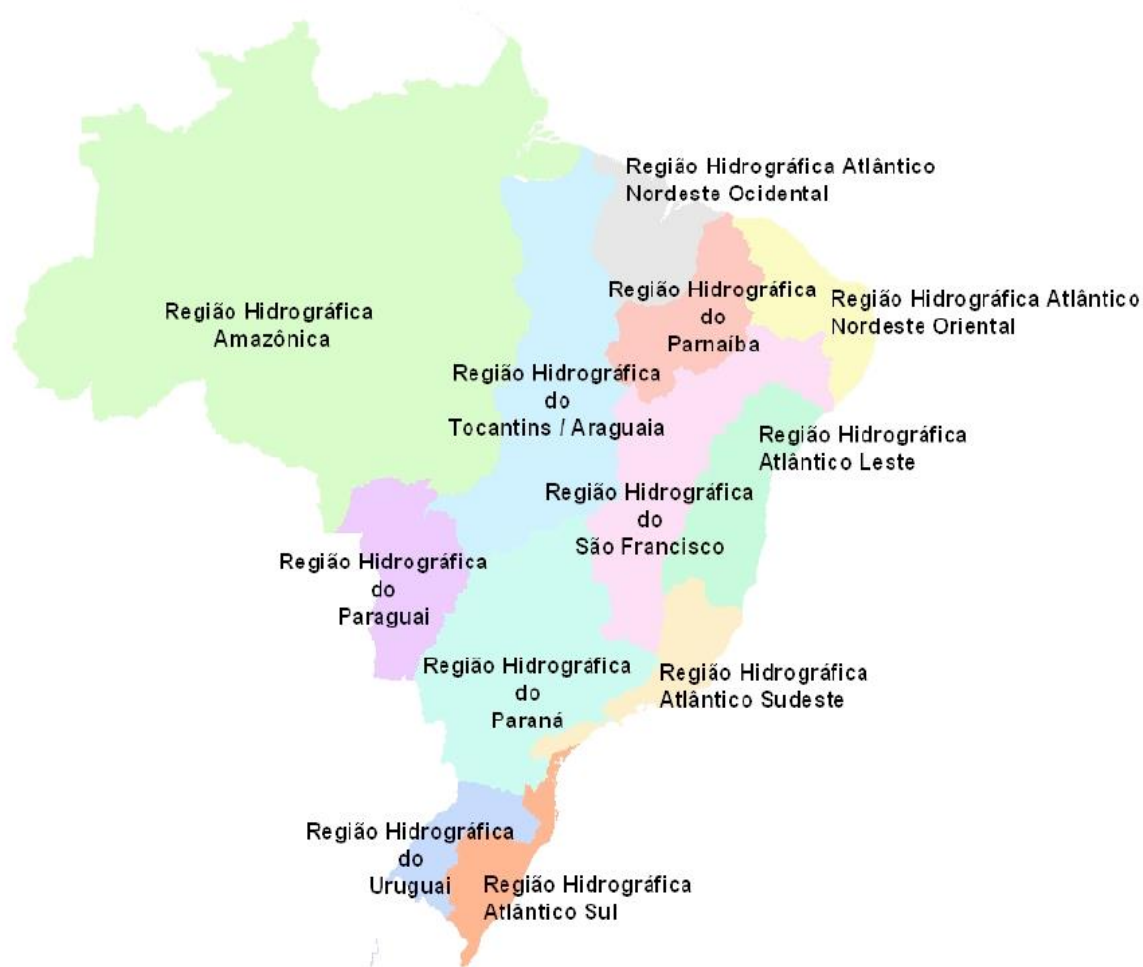


Figura 3.2- Divisão Hidrográfica Nacional (CNRH, 2003)

A PNRH institui instrumentos de gestão que se inter-relacionam são eles: os Planos de Recursos Hídricos; o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água; a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos; a cobrança pelo uso de recursos hídricos; a compensação a municípios; o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos (BRASIL, 1997).

O Plano de recursos hídricos (PRH) são elaborados por bacia hidrográfica, por Estado e para o País (BRASIL, 1997). São instrumentos de gestão que incluem um diagnóstico detalhado da quantidade, qualidade e gestão dos recursos hídricos, além da previsão da situação dos recursos hídricos a partir de simulações de usos considerando diferentes cenários socioeconômicos, climáticos ou de qualquer outra natureza (ANA, 2017)

O enquadramento dos corpos hídricos em classes objetiva assegurar às águas qualidade compatível com os usos mais exigentes a que forem destinadas e diminuir os custos de combate à poluição das águas, mediante ações preventivas permanentes (BRASIL,

1997). Esse enquadramento é realizado avaliando níveis de concentração de vários indicadores de qualidade da água como referência. Para isso são feitos monitoramentos da qualidade da água que permitem a caracterização e a análise de tendências em bacias hidrográficas (ANA, 2017).

A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357 de 2005 dispõe sobre a classificação dos corpos de água segundo o uso preponderante (Figura 3.3).












USOS DAS ÁGUAS DOÇES	CLASSES DE ENQUADRAMENTO DOS CORPOS D'ÁGUA				
	Especial	1	2	3	4
 PRESERVAÇÃO DO EQUILÍBRIO NATURAL DAS COMUNIDADES AQUÁTICAS	Mandatório em UC de Proteção Integral				
 PROTEÇÃO DAS COMUNIDADES AQUÁTICAS		Mandatório em Terras Indígenas			
 RECREAÇÃO DE CONTATO PRIMÁRIO					
 AQUICULTURA					
 ABASTECIMENTO PARA CONSUMO HUMANO	Após desinfecção	Após tratamento simplificado	Após tratamento convencional	Após tratamento convencional ou avançado	
 RECREAÇÃO DE CONTATO SECUNDÁRIO					
 PESCA					
 IRRIGAÇÃO		Hortalças cruas ou frutas com película	Hortalças, frutíferas, parques, jardins e campos	Culturas arbóreas, cerealíferas ou forrageiras	
 DESSEDENTAÇÃO DE ANIMAIS					
 NAVEGAÇÃO					
 HARMONIA PAISAGÍSTICA					

Figura 3.3- Classes de enquadramento dos corpos de água doce segundo os usos (ANA, 2017).

Os usos menos exigentes correspondem a navegação e harmonia paisagística, os mais restritos são para preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas e abastecimento para consumo humano, este último abrange várias classes, porém somente após tratamento específico.

A outorga de direitos de uso, visa assegurar e controlar os direitos de uso desses recursos e a cobrança pelo uso da água, como meio de reconhecer o valor econômico desta e incentivar a racionalização de seu uso (Tucci *et al.*, 2001).

A informação é um instrumento essencial para a tomada de decisão e gestão das águas. O Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) é o grande banco de dados e informações sobre as águas do país, e envolve um conjunto de processos para coletar, organizar e transmitir dados e informações. O SNIRH consolida nacionalmente informações sobre a situação das águas, como o nível dos reservatórios, a vazão dos rios e a qualidade das águas (ANA, 2017).

### **3.3 CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA**

A caracterização morfométrica de uma bacia hidrográfica é um dos primeiros e mais comuns procedimentos executados em análises hidrológicas ou ambientais, e tem como objetivo elucidar as várias questões relacionadas com o entendimento da dinâmica ambiental local e regional (Teodoro et al. 2017).

Os sistemas ambientais são, em análises morfométricas, compostos por objetos de estudos e seus elementos componentes. Por ser uma análise quantitativa, a interpretação é feita a partir da leitura dos atributos desses elementos. A bacia hidrográfica corresponde a o objeto de estudo, sendo seus elementos, a própria bacia, a rede de drenagem e o arranjo das vertentes (relevo). Tais atributos, correlacionados entre si, geram os parâmetros morfométricos (Cherem, 2008) .

### **3.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA**

Os estudos hidrológicos em bacias hidrográficas têm sido amplamente realizados a partir da necessidade de compreensão dos processos que controlam o movimento da água e sedimentos, e seus impactos sobre a disponibilidade e qualidade das águas (Blainski *et al.*, 2017). Para auxiliar nesses estudos adere-se cada vez mais a utilização dos modelos hidrológicos.

Os modelos hidrológicos se consolidaram como ferramentas de representação alto potencial para a simulação de cenários de mudanças climáticas, de alterações do uso do solo e de intervenções antrópicas em diferentes escalas espaciais e temporais (Blainski *et al.*, 2017).

Eles procuram representar a parte terrestre do ciclo hidrológico, transformando a precipitação que cai sobre a bacia em vazão numa determinada seção de um rio. Os modelos vieram para integrar todos os processos do ciclo de forma a obter variáveis intermediárias e

de saída da bacia como a vazão (Tucci, 2010a). Porém mesmo com o grande número de variáveis incorporadas, os modelos hidrológicos são considerados representações simplificadas dos fenômenos naturais, e por mais sofisticados que sejam, ainda apresentam uma limitação relacionada à concepção e ao empirismo, além das limitações relacionadas a quantidade e qualidade dos dados hidrológicos (Blainski *et al.*, 2017; Tucci, 2005)

É possível através da modelagem hidrológica verificar a consistência das informações disponíveis, obtidas a partir das observações hidrológicas nas bacias, o ajuste de dados a partir da calibração, a geração de séries sintéticas e a aplicação do modelo como ferramenta para obtenção de dados em bacias não monitoradas (Santos, 2009).

De modo geral os principais usos dos modelos hidrológicos segundo Tucci (2010b) são: entender o comportamento dos processos hidrológicos; análise de consistência e extensão de séries hidrológicas em locais com poucas informações; dimensionamento e planejamento de desenvolvimento numa bacia hidrográfica; previsão de vazão; e predição com base em modificações naturais e antrópicas da bacia hidrográfica.

Por eles serem utilizados para prever eventos futuros, são ferramentas bastante úteis para lidar com problemas ambientais, se tornando um importante recurso para auxiliar os processos de tomada de decisão, com a utilização destes podem-se determinar as prioridades nas intervenções técnicas para correção, mitigação e, sobretudo, prevenção de impactos ambientais negativos que ocorram nas bacias hidrográficas (Almeida & Serra, 2017; Fernandes, 2014).

De acordo com Tucci (2005) os modelos hidrológicos precipitação-vazão surgiram com a necessidade da obtenção de séries hidrológicas mais longas e representativas de vazões para diferentes projetos de recursos hídricos. As séries de precipitação, normalmente são mais longas que as de vazão. Além disso com as alterações sofridas pelas bacias as séries de vazões deixaram de ser homogêneas ou estacionárias. A partir da precipitação é possível determinar ou estimar vazões desconhecidas para os novos cenários existentes ou previstos para as bacias.

Nesse modelo as variáveis de entrada utilizadas são a precipitação, que é a principal variável de entrada, a evapotranspiração potencial, porém dados desse tipo são escassos e a vazão, que é utilizada pra ajuste dos parâmetros do modelo (Tucci, 2005).

Na Figura 3.4 é apresentado um fluxograma no qual os processos são integrados para representar as partes do ciclo hidrológico entre a precipitação e a vazão.

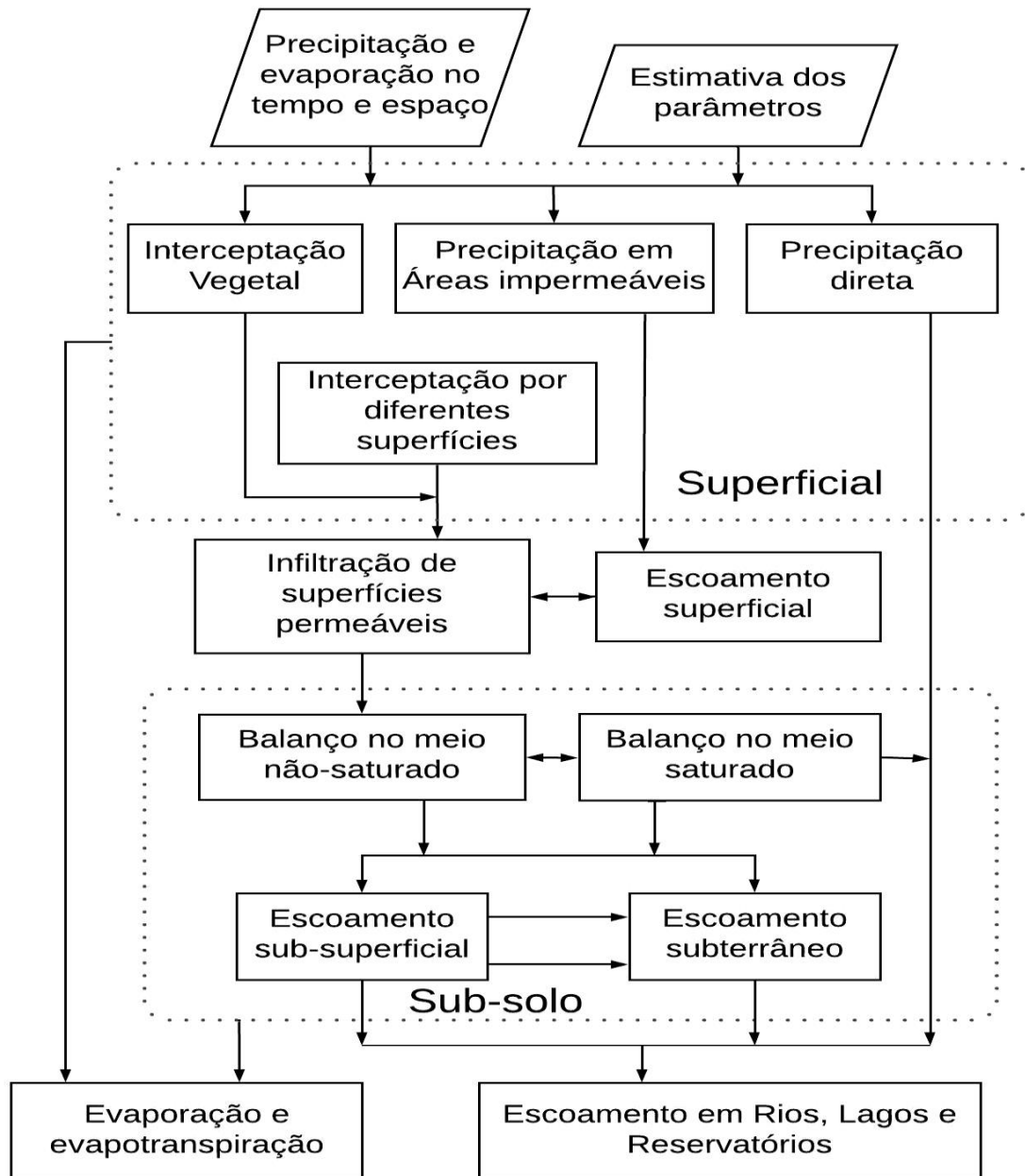


Figura 3.4 - Fluxograma dos modelos hidrológicos (Tucci, 2005)

### 3.4.1 Classificação dos modelos

Um modelo é um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros que ajudam a entender e prever alterações nos ecossistemas (Silva, 2007). Em geral, eles são classificados sob diferentes aspectos, tais como o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), o tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos), e a existência de dependência temporal (estáticos ou dinâmicos) (Rennó & Soares, 2000).

Um modelo é dito estocástico quando pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório. Caso os conceitos de probabilidade sejam negligenciados durante elaboração de um modelo, este será denominado determinístico (Rennó & Soares, 2000).

São empíricos aqueles em que se ajustam os valores calculados aos dados observados, através de funções que não tem nenhuma relação com os processos físicos envolvidos. Já no modelo conceitual as funções utilizadas na sua elaboração levam em consideração os processos físicos (Tucci, 2005).

Um sistema é dito contínuo quando os fenômenos são contínuos no tempo, enquanto que o sistema é discreto quando as mudanças de estado se dão em intervalos discretos. A maioria dos sistemas hidrológicos é do tipo contínuo e representado por modelo discreto (Tucci, 2005).

Em modelos pontuais, considera-se que todas as variáveis de entrada e saída são representativas de toda área estudada. Por outro lado, os modelos distribuídos consideram a variabilidade espacial encontrada nas diversas variáveis do modelo (Rennó & Soares, 2000).

Também podem ser estáticos, neste caso com um conjunto de dados de entrada produz-se um resultado oriundo da resolução das equações do modelo em um único passo. Em contrapartida os modelos dinâmicos utilizam o resultado de uma iteração como entrada para uma próxima iteração (Rennó & Soares, 2000).

Segundo Tucci (2005) os modelos podem ainda ser classificados quanto aos usos e objetivos. No qual modelos que simulam condições estacionárias na bacia têm como objetivo obter um bom ajuste no hidrograma de saída, não havendo interesse em resultados parciais dentro da bacia, são aplicados para dimensionamento de reservatórios, determinação de vazão máxima ou hidrograma de projeto. Já os modelos que simulam alterações na bacia e o comportamento dos processos hidrológicos buscam o conhecimento distribuído dos fenômenos na bacia. Neste caso são aplicados para simular o impacto das alterações causadas pela urbanização, desmatamento, obras hidráulicas e uso rural no escoamento, na produção de sedimentos e poluição difusa.

### **3.4.2 Modelo SWAT**

O SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é um modelo de bacia hidrográfica, semidistribuído e contínuo no tempo (Arnold *et al.*, 2012). Foi desenvolvido para prever os impactos das práticas de gestão do solo nos recursos hídricos, na produção de sedimentos e na utilização de produtos agrícolas em grandes bacias com diversos tipos de solo, usos da terra e condições de manejo por longos períodos de tempo (Neitsch *et al.*, 2009).

Uma das facilidades para a utilização do modelo é a interface acoplável aos principais softwares de geoprocessamento, o que possibilita a integração de bancos de dados, a elaboração e edição de cenários climatológicos e de uso das terras, e a análise e representação espacial das variáveis simuladas (Blainski *et al.*, 2017).

Segundo Neitsch *et al.* (2009) o modelo possui as seguintes características:

- É de base física. Requer informações sobre o clima, propriedades do solo, topografia, vegetação e práticas de gestão de solo que ocorram na bacia hidrográfica. A partir desses dados de entrada modela os processos físicos associados à movimentação hídrica, movimentação sedimentar, crescimento da colheita, ciclo de nutrientes, etc.
- É computacionalmente eficiente. A simulação de bacias hidrográficas muito grandes ou de várias estratégias de gestão pode ser realizada sem um alto investimento de tempo ou dinheiro.
- Permite que os usuários estudem impactos de longo prazo. Muitos dos problemas que atualmente são abordados pelos usuários envolvem o crescimento gradual dos poluentes e o impacto nas jusantes dos corpos d'água. Para estudar estes tipos de problemas, são necessários resultados de análises que se estendem por várias décadas

Além disso o SWAT divide a bacia hidrográfica em múltiplas sub-bacias, que são então subdivididas em unidades de resposta hidrológica (HRUs – Hydrologic Response Units) de acordo com as características homogêneas de topografia, uso, ocupação e tipo de solo (Arnold *et al.*, 2012).

Não há interação entre HRUs em uma sub-bacia, portanto se a interação entre uma área de uso do solo com outra é importante, os domínios uso do solo devem ser definidos como sub-bacias em vez de definidos como HRUs, pois apenas em nível de sub-bacia que as relações espaciais podem ser especificadas. O benefício das HRUs é o aumento da precisão que contribuem pra a predicação de cargas a partir da sub-bacia (Gassman *et al.* 2007).

#### 3.4.2.1 Equações do modelo SWAT

Segundo Neitsch *et al.* (2009) a simulação hidrológica de uma bacia hidrográfica pode ser separada em duas divisões principais. A primeira divisão é a fase terrestre do ciclo hidrológico, que controla a quantidade de água, sedimentos, nutrientes e pesticidas para o canal principal em cada sub-bacia. A segunda é a fase aquática que pode ser definida como o movimento de água, sedimentos, etc., através da rede de canais da bacia hidrográfica até o exutório.

A fase terrestre do ciclo hidrológico é baseada na equação do balanço hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} + E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (3.1)$$

Em que,

**SW<sub>t</sub>** = quantidade final de água no solo (mm H<sub>2</sub>O);

**SW<sub>0</sub>** = quantidade inicial de água no solo no dia i (mm H<sub>2</sub>O);

**t** = tempo (dias);

**R<sub>day</sub>** = quantidade de precipitação no dia i (mm H<sub>2</sub>O);

**Q<sub>surf</sub>** = quantidade de escoamento superficial no dia i (mm H<sub>2</sub>O);

**E<sub>a</sub>** = quantidade de evapotranspiração no dia i (mm H<sub>2</sub>O);

**w<sub>seep</sub>** = quantidade de água que percola da camada simulada para a camada inferior no dia i (mm H<sub>2</sub>O);

**Q<sub>gw</sub>** = quantidade de água que retorna ao curso d'água no dia i devido ao escoamento sub-superficial (mm H<sub>2</sub>O).

Quanto a erosão causada pela chuva e escoamento, o SWAT utiliza a Equação Universal Modificada de Perda de Solos (MUSLE - *Modified Universal Soil Loss Equation*), definida pela equação 3.2, para calcular a produção de sedimentos.

$$sed = 11,8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0,56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG \quad (3.2)$$

**sed** = produção de sedimento em um dia (tonelada métrica);

**Q<sub>surf</sub>** = lâmina de escoamento superficial (mm/ha);

**q<sub>peak</sub>** = vazão de pico (m<sup>3</sup>/s);

**area<sub>hru</sub>** = área da HRU (ha);

**K<sub>USLE</sub>** = fator de erodibilidade do solo EUPS;

**C<sub>USLE</sub>** = fator cobertura e manejo da EUPS;

**P<sub>USLE</sub>** = fator práticas conservacionistas da EUPS;

**LS<sub>USLE</sub>** = fator topográfico da EUPS;

**CFRG** = fator de fragmentos grosseiros.

Essas equações que compõe o SWAT representam de forma simplificada o movimento da água, sedimentos e nutrientes em um sistema natural, razão pela qual o modelo deve ser calibrado e verificado a partir de dados observados (Blainski *et al.*, 2017). Os demais equacionamentos do modelo podem ser encontrados em Neitsch *et al.* (2009)



### 3.4.3 SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty Program)

A calibração pode ser facilitada a partir da determinação do grau de influência dos parâmetros do modelo sobre a variável simulada. Para isso, a análise de sensibilidade possibilita identificar os parâmetros que mais influenciam no modelo e sua importância nos resultados gerados (Blainski *et al.*, 2017).

Essa análise ajuda a determinar os processos mais influentes na área de interesse. Geralmente são executados dois tipos de análise de sensibilidade, a local, em que os parâmetros são alterados um por vez e global, que permite a variação de todos os parâmetros (Arnold *et al.*, 2012).

A calibração do modelo visa obter um bom ajuste entre os dados observados (medidos) e estimados (calculados pelo modelo), por meio da variação dos parâmetros do modelo (von Sperling, 2007). A calibração pode ser automática em que técnicas computacionais avançadas possibilitam a alteração de parâmetros previamente selecionados dentro de uma faixa de valores estabelecida (Blainski *et al.*, 2017).

A verificação envolve a execução do modelo usando os parâmetros que foram determinados durante o processo de calibração e a comparação dos dados simulados com os observados que não foram utilizados na calibração (Arnold *et al.*, 2012).

Para realização dessas etapas de forma automática, tem-se como alternativa a utilização da ferramenta SWAT-CUP (SWAT - *Calibration and Uncertainty Program*). O SWAT-CUP é de domínio público e integra os procedimentos SUFI2 (Sequential Uncertainty Fitting), PSO (Particle Swarm Optimization), GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation), ParaSol (Parameter Solution), e MCMC (Markov Chain Monte Carlo) para análise de sensibilidade, calibração, verificação e análise de incerteza do modelo SWAT.

O método utilizado para este estudo foi o SUFI2. Segundo Rouholahnejad *et al.* (2012) o SUFI2 utiliza o método do hipercubo latino para definição dos parâmetros e o processo inicia com uma faixa de valores determinada pelo usuário, em que cada valor de parâmetro selecionado é substituído dentro do projeto, esse processo é realizado quantas vezes o usuário achar necessário. Para a análise de incerteza no SUFI2, leva-se em consideração as possíveis fontes de incerteza, nas variáveis de entrada, nos conceitos e simplificações do modelo, nos parâmetros e dados medidos (Abbaspour, 2015).

Para a análise dos resultados obtidos com a simulação são utilizados coeficientes de eficiência, como o NSE (Nash- Sutcliffe), que é indicado por Moriasi *et al.* (2007) por ser

recomentado pela American Society of Civil Engineers (ASCE), ser comumente utilizado por usuários do SWAT, além de ser a melhor função objetivo no ajuste de um hidrograma.

O NSE varia de  $-\infty$  a 1, em que o NSE ótimo é igual a 1, valores maiores que zero representam níveis de desempenho aceitáveis, enquanto valores menores que zero representam desempenho inaceitável indicando que o valor médio observado é um melhor preditor do que o valor simulado, que indica desempenho inaceitável (Moriassi *et al.*, 2007).

#### 3.4.3.1 Aplicações do modelo SWAT

Segundo Gassman *et al.* (2007), o modelo SWAT ganhou aceitação internacional como uma ferramenta interdisciplinar de modelagem de bacias hidrográficas, sendo aplicado para análises relacionadas a impactos de mudanças climáticas, avaliação de carga de poluentes, entre outros.

Caprario *et al.* (2018) utilizaram o SWAT para avaliar os processos hidrossedimentológicos da Bacia Hidrográfica do Rio Quatorze (PR). Os resultados obtidos com a simulação demonstraram a influência do uso e ocupação do solo e da topografia sobre o processo erosivo e na geração de sedimentos, em que em áreas cobertas por florestas as quantidades de sedimentos geradas foram pequenas, assim em áreas mais planas. Isso porque essas características influenciam no escoamento superficial que está diretamente relacionado a produção de sedimentos. De modo geral, o modelo mesmo sem ser calibrado se demonstrou relativamente eficaz, fornecendo informações de apoio a gestão ambiental.

Lelis *et al.* (2012) realizaram o estudo da produção de sedimento e da vazão da bacia do ribeirão São Bartolomeu (MG) utilizando o SWAT. Foram utilizados para monitoramento dez parcelas experimentais para medição de escoamento superficial e coleta de sedimentos, com esses dados foi realizada a calibração e posterior validação do modelo. Foi realizada também a análise de sensibilidade, que não foi influenciada pela discretização da bacia. Os resultados foram satisfatórios, sendo obtidos valores de coeficiente de eficiência de 0,808 para a produção de sedimentos e de 0,997 para a vazão.

Souza *et al.* (2009) aplicaram o modelo SWAT como ferramenta na concessão de outorgas de direito de uso dos recursos hídricos, na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro, que fica na divisa dos estados do Paraná e Santa Catarina. A simulação foi realizada com dados de 1994 a 1998, o modelo representou adequadamente o comportamento das vazões observadas, com algumas limitações para simular picos e recessões, foi obtido um coeficiente de Nash-Sutcliffe de valor 0,72. Porém como as vazões Q95, Q98 e média não apresentaram comportamento linear em relação a área de drenagem das bacias, não é

possível que a simples transferência de vazão por área de drenagem possa ser uma forma adequada a concessão de outorgas. De forma geral o modelo foi tido como satisfatório visto que permite ao órgão responsável pela concessão da outorga ter em seu poder o comportamento das vazões em diversos pontos da bacia, possibilitando assim uma concessão embasada em dados mais precisos.

Lino *et al.* (2009) analisaram a dinâmica hidrológica, simulando o escoamento superficial para diferentes usos do solo da bacia hidrográfica do Rio Preto (SC) utilizando o modelo SWAT. O estudo obteve valores de coeficiente de NSE de -0,307 e 0,505 para a calibração manual e automática, respectivamente. Foram evidenciadas as diferenças no escoamento superficial entre os cenários, ressaltando que o cenário de agricultura em toda a bacia hidrográfica apresentou o maior escoamento superficial, enquanto o menor foi obtido pela mata nativa. O modelo ajustou de maneira adequada a simulação de vazão para os diferentes cenários propostos, e permitiu a identificação do melhor cenário de uso do solo para escoamento superficial.

Castro (2013) avaliou a aplicabilidade do modelo SWAT para simulação da vazão na bacia do Alto Rio Jardim (DF), que é intensamente monitorada. Sem a calibração dos parâmetros mais sensíveis não foi possível obter resultados satisfatórios, foi realizada calibração diária e obtido coeficiente de NSE de 0,6, resultando em boa representatividade do modelo para vazão diária da bacia. Já para a verificação os resultados obtidos não foram satisfatórios, em que se obteve um valor de NSE de -0,84. Foi considerado que o modelo possui aplicabilidade para área, se consideradas as limitações de dados e processos, e que a modelagem é uma ferramenta de apoio a tomada de decisão e não uma solução direta para a gestão.

Salles (2012) aplicou o SWAT para simulações de vazões da bacia hidrográfica do ribeirão Pípiripau (DF/GO). O modelo foi calibrado manualmente em relação à vazão média mensal e posteriormente validado. Os resultados obtidos indicaram um bom ajuste entre a vazão média mensal simulada e os dados observados, após a calibração, em que o NSE foi de 0,67. A simulação também foi satisfatória no período selecionado para validação do modelo com NSE =0,79. Esses resultados indicaram que o modelo simulou de forma satisfatória as vazões médias mensais do ribeirão Pípiripau, após um período de calibração.

## 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo visa apresentar as formas de obtenção da base de dados, os procedimentos para elaboração da base cartográfica e caracterização da área de estudo, e as etapas da simulação hidrológica com a utilização do modelo QSWAT para diferentes cenários.

Na Figura 4.1 é apresentado o fluxograma com a sequência etapas a ser realizada no presente trabalho.

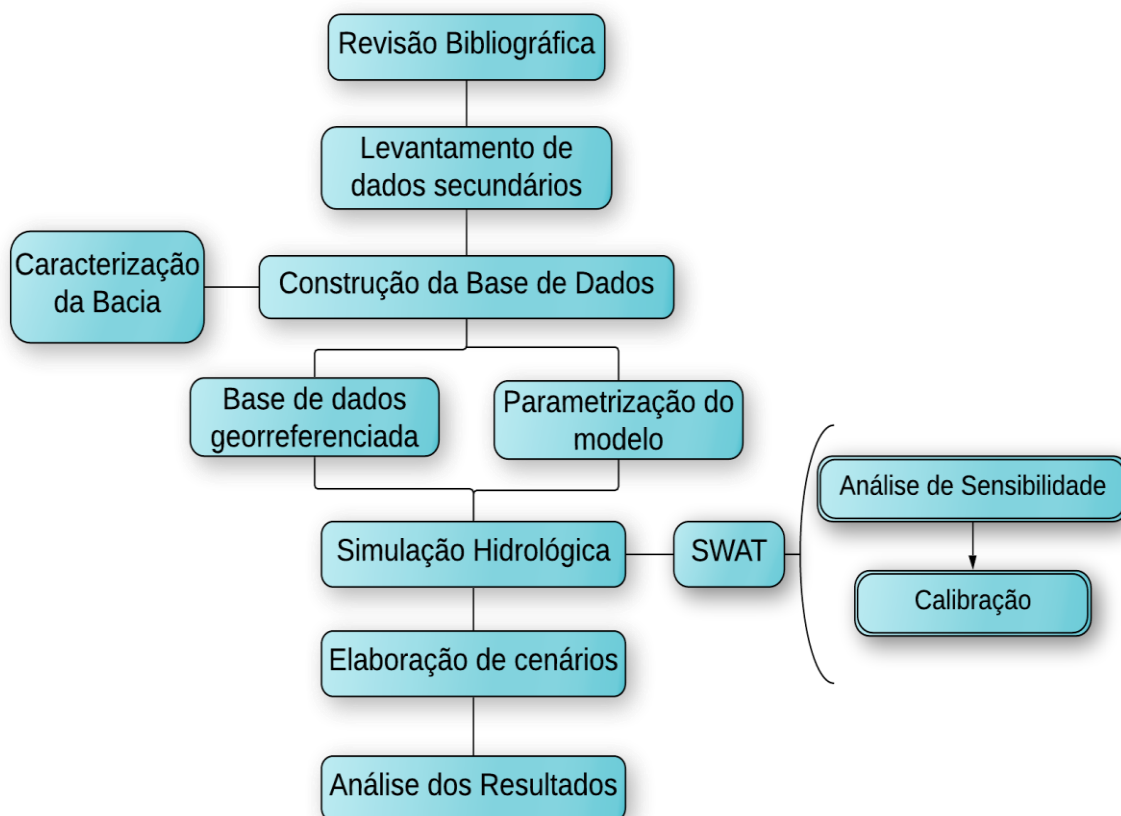


Figura 4.1- Fluxograma das etapas do projeto.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Alagado está inserida na região hidrográfica do Paraná e faz parte da bacia hidrográfica do rio Corumbá (DF/GO). A área de abrangência é de 446,2 km<sup>2</sup>, com 57,5% fazendo parte do Distrito Federal e os outros 42,5% no estado de Goiás. Sua localização é apresentada na Figura 4.2.

Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Alagado (DF/GO)

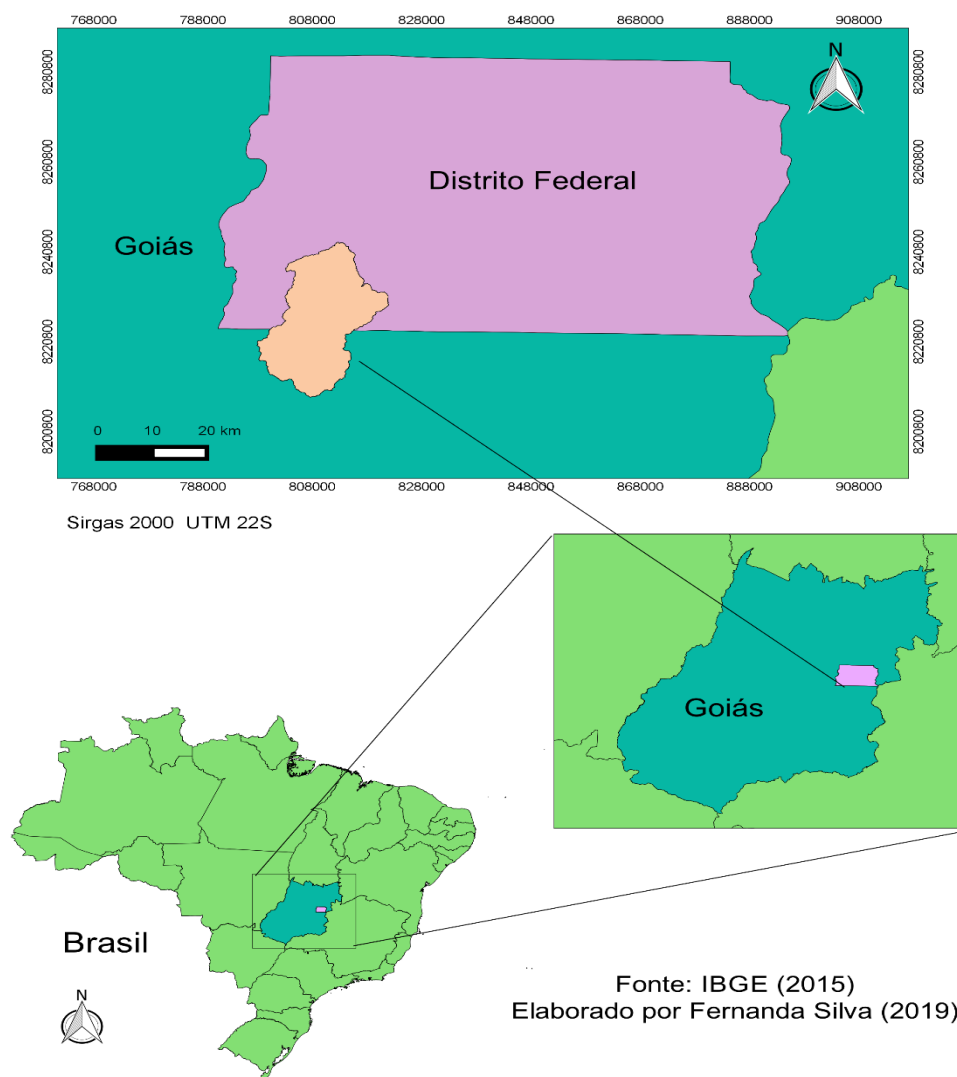


Figura 4.2 - Localização da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO).

A bacia hidrográfica do Rio Alagado tem exutório localizado a montante do reservatório de Corumbá IV, está localizada no Distrito Federal, em maior parte nas regiões administrativas (RAs) do Gama, Recanto das Emas e Santa Maria, e no estado do Goiás, principalmente nos municípios do Novo Gama, Santo Antônio do Descoberto. Além disso é afluente de um futuro ponto de captação de água (Sistema Corumbá IV), o que traz a necessidade de maior conhecimento a cerca da região e dos usos do solo e como esses interferem na vazão e na qualidade dos recursos hídricos.

A construção do Sistema Corumbá ocorre em uma parceria entre a Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB) e a Saneamento de Goiás S.A. (SANEAGO) e será um dos novos sistemas produtores de água na área da Região Integrada

de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno (RIDE-DF), que visa a articulação de ações administrativas da União, dos Estados de Goiás, Minas Gerais e do Distrito Federal (Adasa, 2017; Brasil, 1998).

O Sistema prevê uma captação no reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Corumbá IV, no braço do Rio Alagado. A capacidade de produção prevista para esse Sistema variará conforme as etapas de implantação previstas, iniciando com uma vazão de 2,8 m<sup>3</sup>/s numa primeira etapa, na segunda etapa de 5,6 m<sup>3</sup>/s, podendo ser ampliada, conforme necessidade, para 8 m<sup>3</sup>/s (sendo que metade da vazão será destinada aos Municípios atendidos pela SANEAGO e a outra metade será destinada ao atendimento do DF) (Adasa, 2017).

O Sistema Corumbá IV contará com uma nova Estação de Tratamento de Água (ETA), localizada em Valparaíso de Goiás, e sistemas de distribuição na região sudoeste do Distrito Federal e nos municípios de Cidade Ocidental, Luziânia, Novo Gama e Valparaíso de Goiás. As áreas do DF a serem atendidas serão: Gama, Santa Maria, Catetinho, Riacho Fundo II, Park Way, Recanto das Emas e reforço do Sistema Descoberto (Adasa, 2017).

A localização aproximada do exutório e ponto de captação de água do sistema de Corumbá IV podem ser visualizados na Figura 4.3.

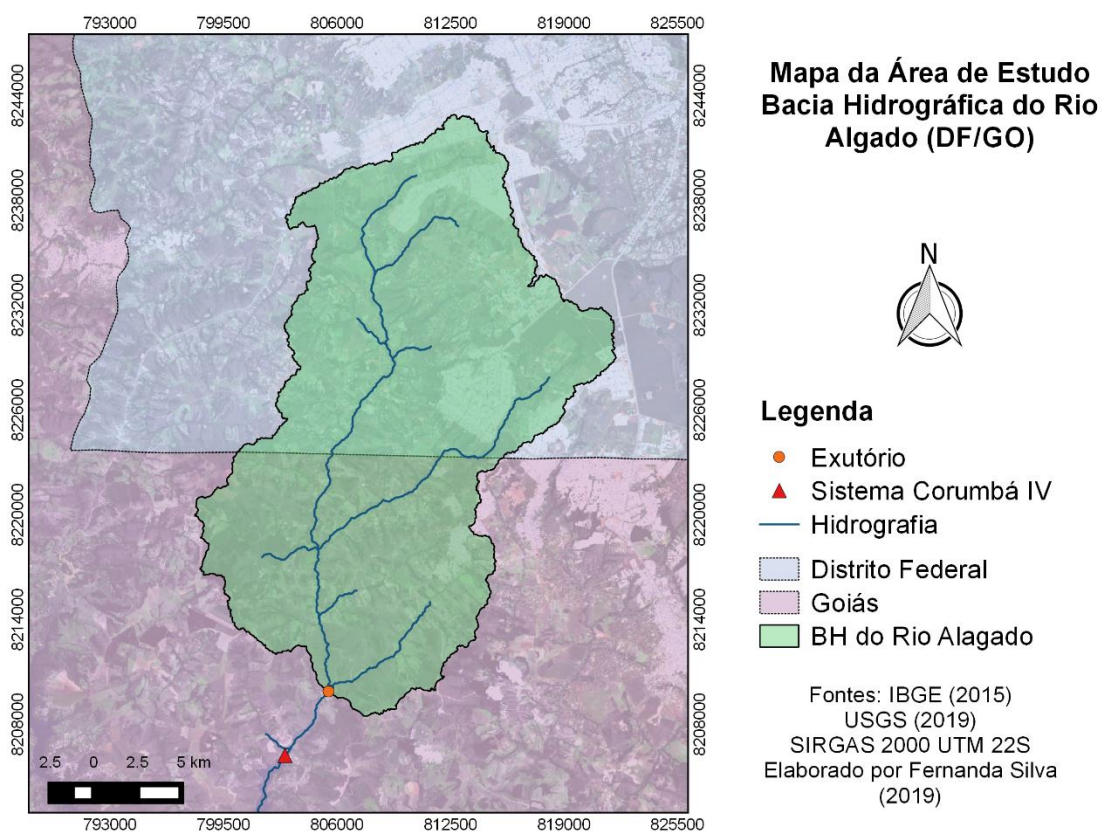


Figura 4.3 - Mapa da área de estudo.



No Distrito Federal, as regiões administrativas do Gama, Recanto das Emas e Santa Maria apresentam população estimada de 134.111, 146.906 e 125.559 habitantes respectivamente. O Recanto das Emas apresenta a maior densidade demográfica entre as regiões, com 20,5 habitantes por hectare. Já as regiões do Santa Maria e Gama apresentam densidade demográfica (hab./ha) de 5,85 e 4,87 hab./ha., respectivamente (Codeplan, 2017). No Estado de Goiás o município do Novo Gama apresenta uma população de 113.679 habitantes, enquanto Santo Antônio do Descoberto, uma população de 73.636 habitantes (IBGE, 2018).

#### 4.1.1 Caracterização qualitativa das águas na bacia do rio Alagado

Na bacia do rio Alagado localizam-se duas estações de monitoramento da qualidade das águas superficiais operadas pela ADASA, conforme observado na Figura 4.4. Essas estações apresentam apenas seis campanhas de amostras, para a estação de código 60443830, essas amostras são de junho e novembro de 2009 e, fevereiro, maio, agosto e novembro de 2010. Já para estação de código 60444035 as amostras são de junho e dezembro de 2009 e, fevereiro, maio, agosto e novembro de 2010. Os parâmetros amostrados para essas estações foram: pH, turbidez, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), oxigênio dissolvido, sólidos totais, nitrogênio total e amoniacal, nitrato, nitrito, fósforo total e coliformes fecais.

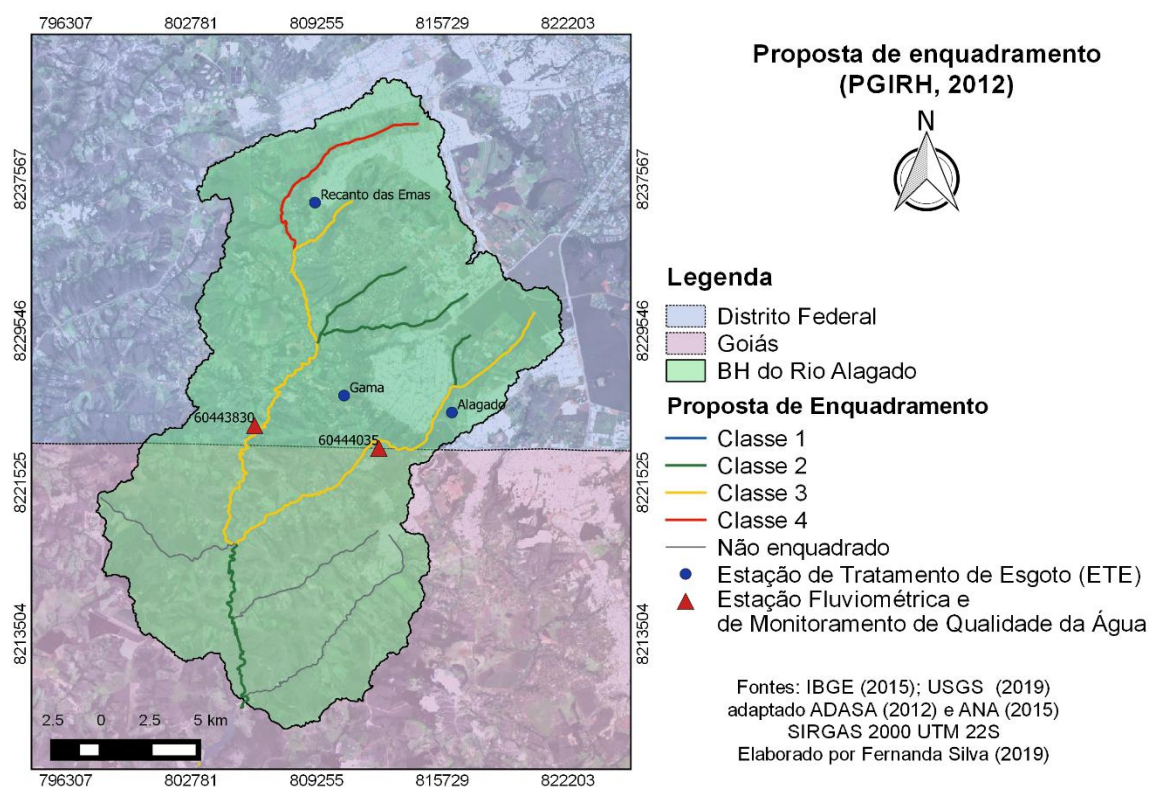


Figura 4.4 - Proposta de enquadramento PGIRH (2012).

Existem três estações de tratamento de esgoto (ETE) compreendidas na bacia hidrográfica do rio Alagado (DF), são elas: ETE Recanto das Emas, ETE Alagado e ETE Gama, com vazão de projeto de 246, 154 e 328 L/s, respectivamente. Conjuntamente essas estações atendem as regiões administrativas do Gama, Recanto das Emas e Santa Maria. Os corpos receptores desses efluentes são Córrego Vargem da Bênção, Rio Alagado e Ribeirão Ponte Alta. A localização das ETEs pode ser visualizada na Figura 4.4.

Também é possível observar na Figura 4.4, a proposta de enquadramento segundo o Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal (PGIRH-DF). Nenhum rio analisado na bacia foi enquadrado em classe 1. O córrego Vargem da Bênção, de classe 4, foi assim enquadrado segundo o plano devido a sua baixa capacidade hídrica de depuração. Os cursos d'água sem enquadramento podem ser considerados classe 2 (ADASA, 2012).

Vale ressaltar que os corpos hídricos do DF têm enquadramento aprovado segundo a Resolução nº 02, de 17 de dezembro de 2014, com divergências quanto a proposta do PGIRH-DF. Em que apenas do ponto de lançamento da ETE Recanto das Emas até a confluência com o córrego capoeira grande o enquadramento é de classe 4, sendo os demais cursos d'água considerados como classe 2.

#### **4.1.2 Hidrografia**

O mapa de hidrografia da Bacia hidrográfica do Rio Alagado (DF/GO) (Figura 4.5), foi confeccionado a partir do arquivo “shape” da Agência Nacional de Águas (2015), contendo rios principais, ribeirões e córregos, importante para a análise morfométrica. Para a delimitação da bacia no QSWAT a discretização da hidrografia foi menor, ou seja, foram considerados apenas os rios principais, resultando em uma menor extensão dos cursos d'água.

Os cursos d'água da bacia chegam a 5º ordem, de acordo com a classificação de Strahler (1957), em que os menores canais sem tributários são considerados de primeira ordem.

#### **4.1.3 Relevo**

O mapa de declividade da bacia hidrográfica do rio Alagado foi produzido utilizando a classificação de declividade proposta pela Embrapa (1979). É apresentado na Figura 4.6.

As classes de declividade que predominam na bacia em estudo são os relevos suavemente ondulado e ondulado, que ocupam aproximadamente 81% da área, o relevo plano representa cerca de 11% e o fortemente ondulado 7%, a bacia não possui áreas com declividade maior que 75%.



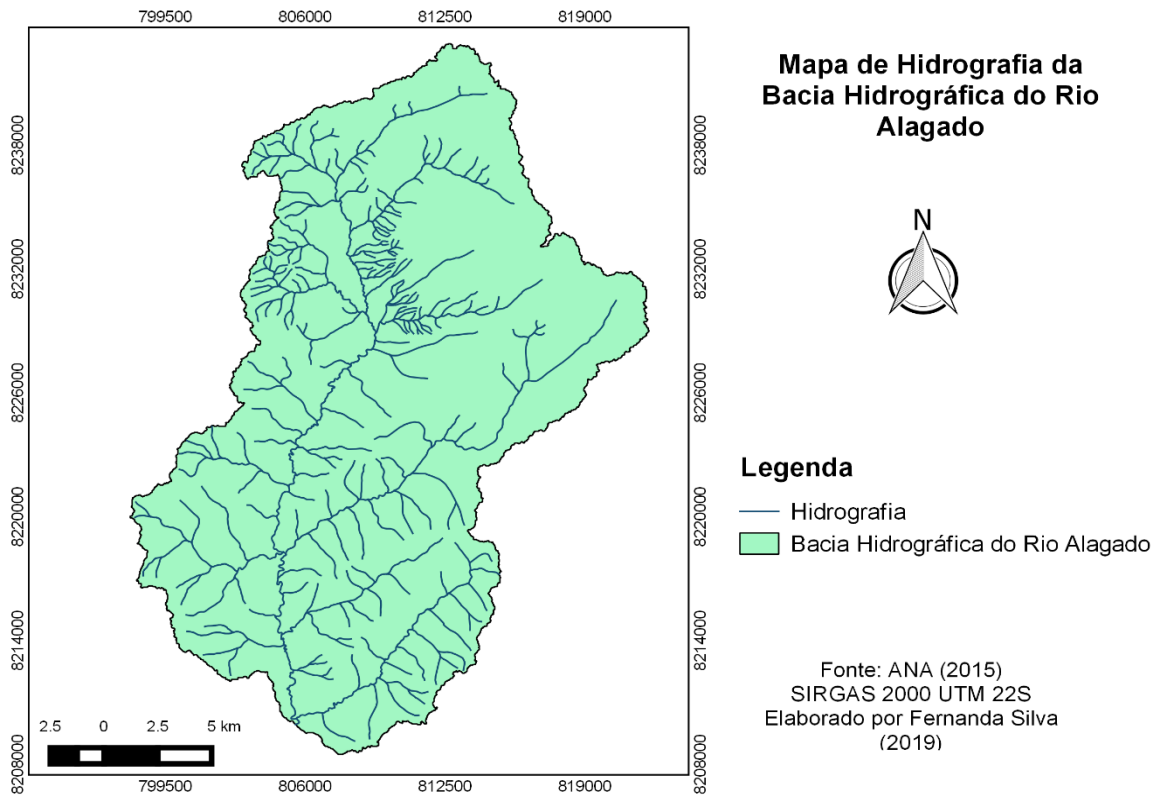


Figura 4.5 – Hidrografia da Bacia Hidrográfica do Rio Alagado (DF/GO).

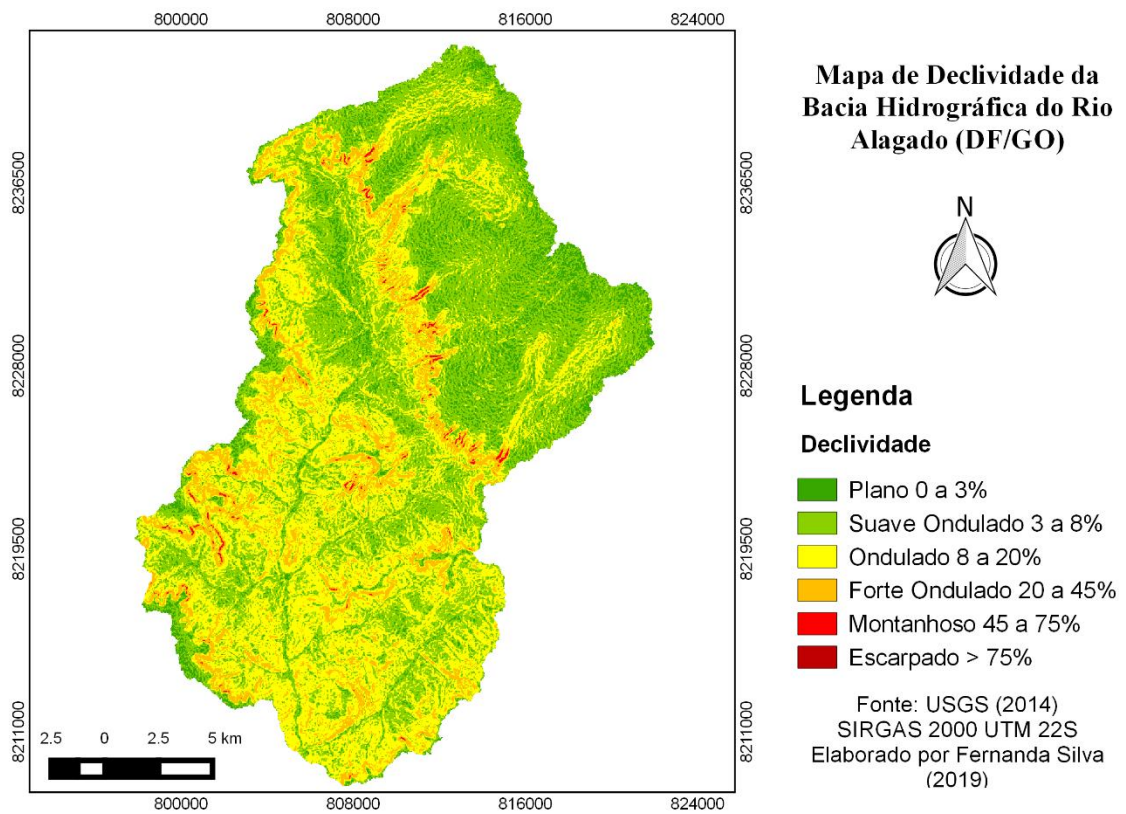


Figura 4.6 - Mapa de declividade da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO).

#### 4.1.4 Tipos de Solos

Com relação aos tipos de solo, a bacia integra três classes de solos, são elas: Cambissolo Háplico (CX) que compreende cerca de 53%, Latossolo Vermelho (LV) 28 % e o Latossolo Vermelho- Amarelo (LVA) 10%. Parte da área não foi classificada por abranger áreas urbanizadas. Na Figura 4.7 é apresentado o mapa de solos da bacia hidrográfica do rio Alagado.

Segundo o Manual Técnico de Pedologia (IBGE, 2007), os cambissolos apresentam grande variação no tocante a profundidade, ocorrendo desde rasos a profundos, a drenagem com relação a esse tipo de solo varia de acentuada a imperfeita, além disso também apresentam grande variabilidade em relação às demais características, muitas vezes são pedregosos, cascalhentos e mesmo rochosos, ocorrem disseminados por todas as regiões no Brasil, preferencialmente em regiões serranas ou montanhosas. Já os latossolos geralmente são muito intemperizados, profundos e de boa drenagem, com grande homogeneidade de características ao longo do perfil, e distribuem-se por amplas superfícies no território brasileiro.

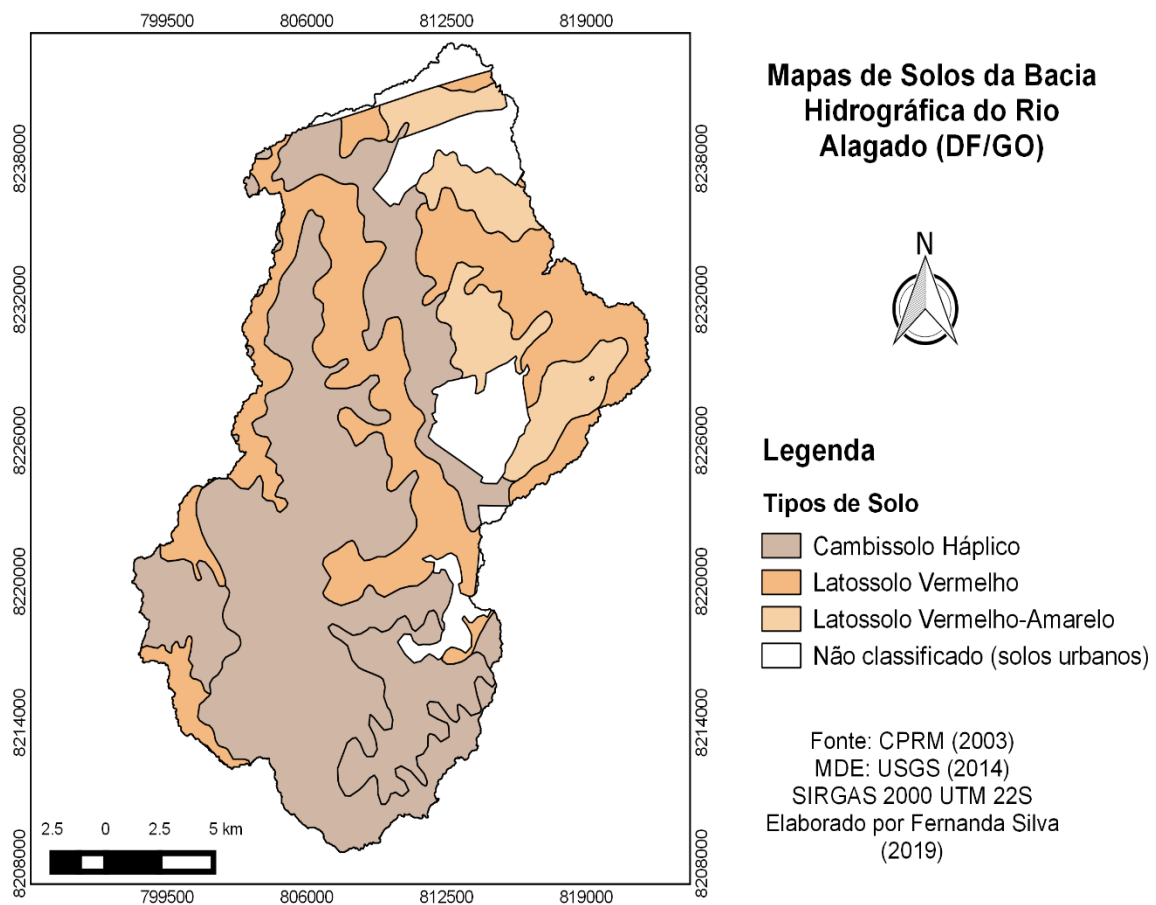


Figura 4.7 - Mapa de tipos de solo da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO).

#### 4.1.5 Uso e Ocupação do Solo

O mapa de uso e ocupação do Solo apresentado na Figura 4.8, contempla corpos d'água, pastagem, agricultura, solo exposto, cerrado, mata de galeria, campo limpo, áreas urbanizadas.

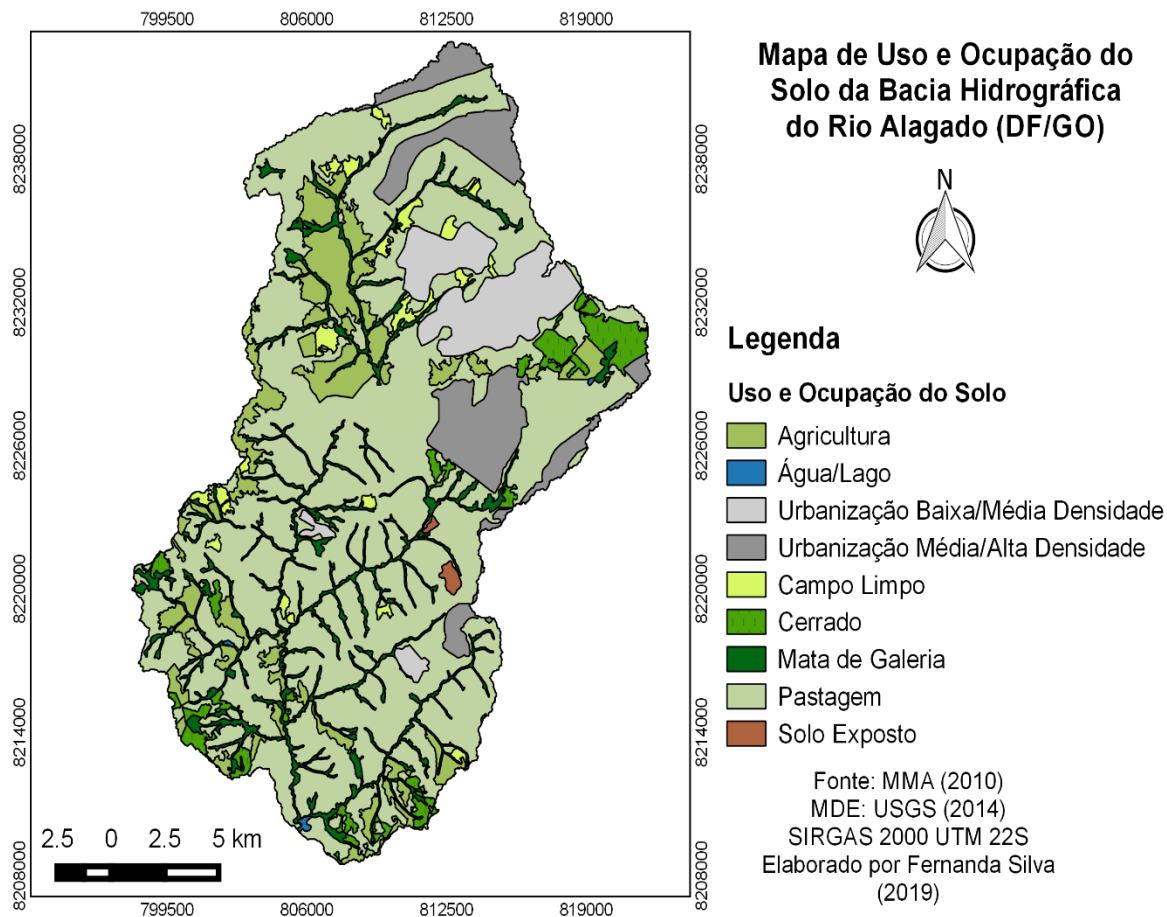


Figura 4.8 – Mapa de Uso e Ocupação do Solo da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO).

É possível observar na Tabela 4.1 o percentual de cada categoria de uso e ocupação na bacia. A maior porção da bacia 61,8% é ocupada por pastagem, seguido de agricultura, área urbana de média/alta densidade e mata de galeria, que representam respectivamente 9,9%, 8,4 e 7,6. Os outros 12% da bacia são ocupados por área urbanizada de baixa/média densidade, cerrado, campo limpo, solo exposto, água/lago.

Tabela 4.1 – Percentual de uso e cobertura do solo na BH do rio Alagado (DF/GO).

Uso do Solo	Área (km <sup>2</sup> )	%
Pastagem	275.90	61.8
Agricultura	44.14	9.9
Área Urbana Média/Alta Densidade	37.29	8.4
Mata de Galeria	33.93	7.6
Área Urbana Baixa/Média Densidade	28.88	6.5
Cerrado	15.89	3.6
Campo Limpo	8.69	1.9
Solo Exposto	1.05	0.2
Água/Lago	0.43	0.1
Total	446.20	100

#### 4.1.6 Clima

A região da bacia apresenta três áreas climáticas distintas segundo a classificação de Köppen refinada para o Brasil por Alvares *et al.* (2013): Aw: clima tropical com estação seca no inverno; Cwa: clima temperado húmido com inverno seco e verão quente; e Cwb: clima temperado húmido com inverno seco e verão temperado.

Com relação a precipitação na bacia, pode se observar na Figura 4.9 com os dados da série histórica de 36 anos que a maior incidência de chuva ocorre nos meses de outubro a abril, e tem variação extrema comparada ao período seco (maio a setembro) em que a precipitação não ultrapassa 50 mm, chegando a uma diferença de aproximadamente 330 mm.

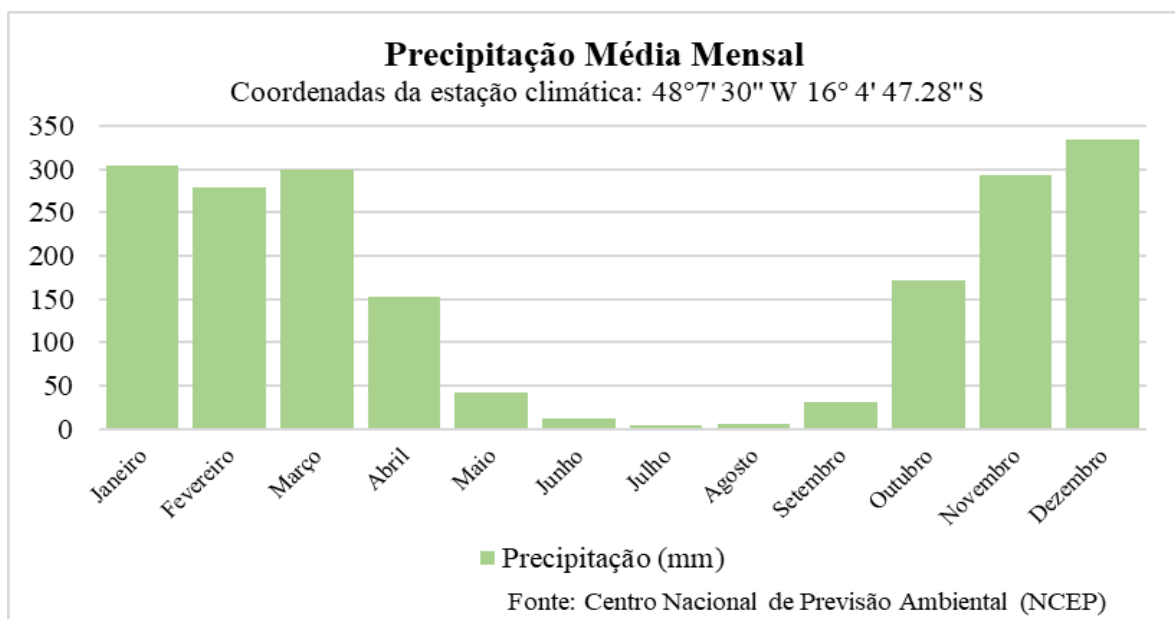


Figura 4.9 - Precipitação média mensal histórica de 1979 a 2014 na área da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO).

É possível observar na Figura 4.10 as médias mensais das temperaturas máximas e mínimas da série histórica .

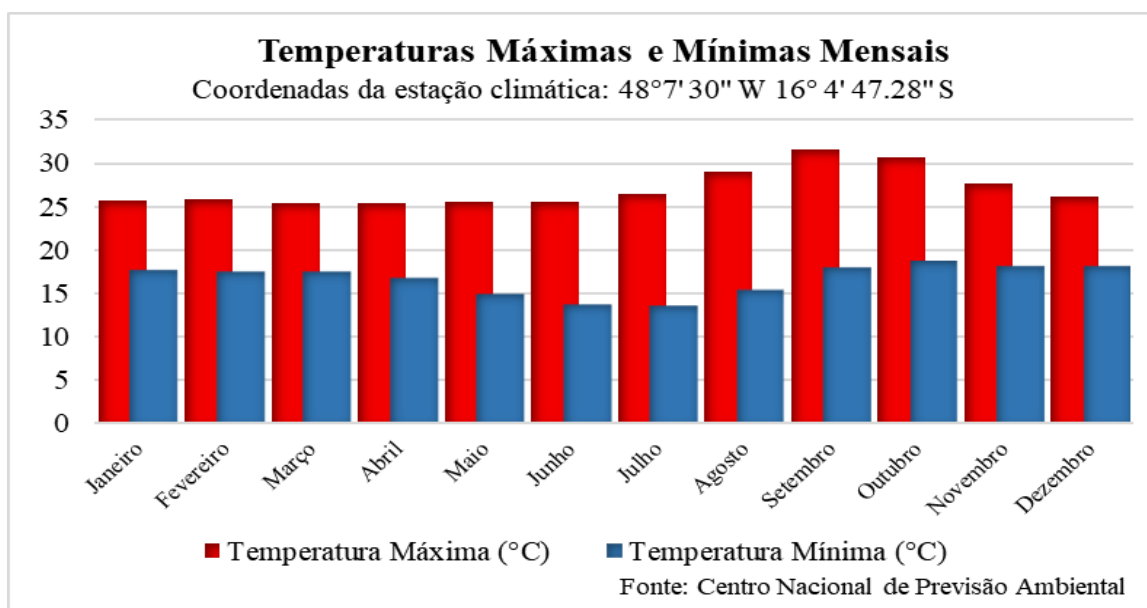


Figura 4.10 - Temperaturas máximas e mínimas mensais referentes à série histórica de 1979 a 2014 na área da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO).

Com relação a média mensal da temperatura máxima diária as temperaturas mais elevadas ocorrem nos meses de agosto a outubro ficando entre 29 e 31,6°C, nos demais meses a temperatura fica entre 25 e 27,6°C.

As menores temperaturas correspondentes a temperatura média mensal mínima são nos meses de junho e julho, com temperaturas de 13,7 e 13,6° respectivamente, as mais elevadas não ultrapassam a 18,7 °C e a média anual fica entorno de 16,8°C.

No que se refere as temperaturas máximas e mínimas absolutas observadas na série histórica, tem-se a máxima chegando a 42,2°C no mês de outubro e a mínima de 4,5°C no mês de junho.

A Figura 4.11 apresenta o gráfico referente às médias mensais de umidade relativa do ar no período de 1979 a 2014.

É possível observar no gráfico que de março a setembro a umidade relativa (UR) tem comportamento descendente e de outubro a março ascendente. Os meses com menor umidade relativa média são agosto e setembro com cerca de 45%, e os maiores de dezembro a abril, entre 84 e 88%, correspondendo aos períodos com maior precipitação. A umidade absoluta mínima chega a 16% no mês de setembro, e a máxima a 98% em abril.

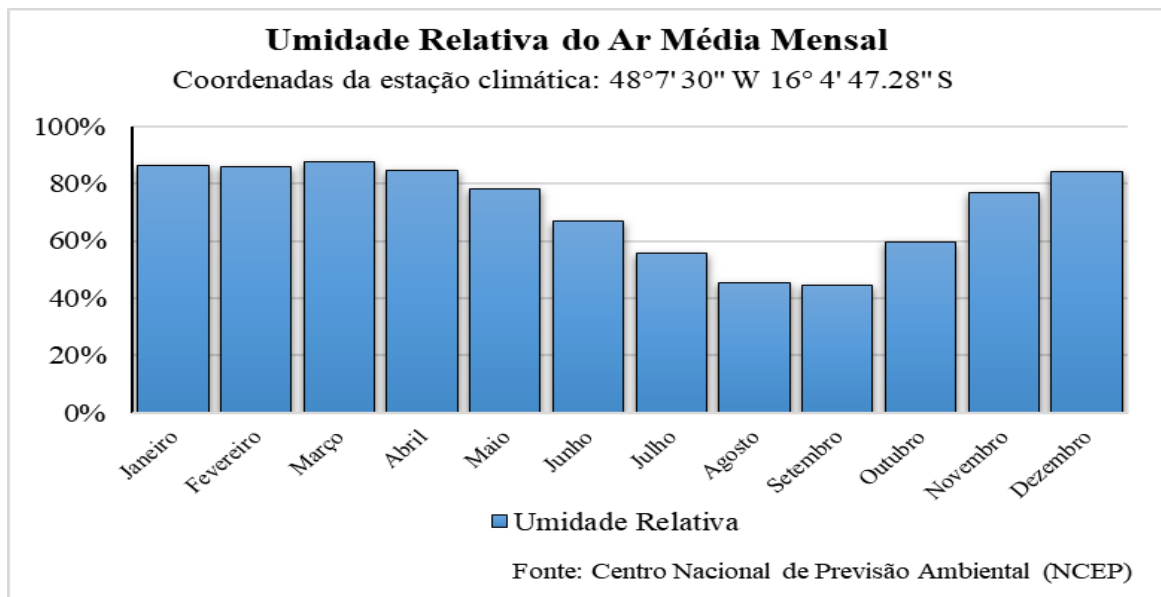


Figura 4.11 - Umidade relativa do ar média mensal histórica de 1979 a 2014 na área da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO).

Esses fatores climáticos apresentados, além da velocidade do vento e radiação solar, são utilizados como dados de entrada para o SWAT e são necessários para simular os processos que ocorrem na bacia, uma vez que influenciam na dinâmica do ciclo hidrológico.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA

A análise morfométrica constitui o conjunto de procedimentos para caracterizar os aspectos geométricos e de composição dos sistemas ambientais, procurando estabelecer indicadores relacionados com a forma, arranjo estrutural e composição integrativa entre os elementos (Christofolletti, 1999).

O presente estudo visou, em parte, a realização da caracterização ambiental da bacia hidrográfica do ribeirão Alagado. Parte da caracterização relaciona-se à análise morfométrica da área de estudo, utilizando como guias os cálculos descritos em Villela e Mattos (1975), Christofolletti (1980) e Rocha *et al.* (2014). Para tanto, foram selecionados algumas variáveis morfométricas descritas a seguir.

**Área da bacia (A)** – é toda área drenada pelo conjunto do sistema fluvial, projetada em plano horizontal, em km<sup>2</sup> (Christofolletti, 1980).

**Perímetro da bacia (P)** - comprimento da linha imaginária ao longo do divisor de águas que delimita área da bacia hidrográfica, em km (Rocha *et al.* 2014)..

**Comprimento total dos canais (Lt)** - refere-se à soma dos comprimentos dos rios da bacia hidrográfica, em km (Rocha *et al.* 2014).

**Comprimento do canal principal (L)** - distância que se estende ao longo do curso de água da nascente principal até o exutório, em km (Rocha *et al.* 2014).

**Ordem dos cursos d'água** - a ordem dos cursos d'água foi determinada conforme Strahler (1957), onde os menores canais sem tributários são considerados de primeira ordem; os canais de segunda ordem surgem da confluência de dois canais de primeira ordem, e só recebem afluentes de primeira ordem; os canais de terceira ordem surgem da confluência de dois canais de segunda ordem, podendo receber afluentes de segunda e primeira ordens; os canais de quarta ordem surgem da confluência de canais de terceira ordem, podendo receber tributários de ordens inferiores, assim sucessivamente.

**Coefficiente de compacidade (Kc)** - grandeza adimensional, varia com a forma da bacia independentemente de seu tamanho. Quanto mais irregular for a bacia, tanto maior será o coeficiente de compacidade. Um coeficiente mínimo, igual à unidade corresponderia a uma bacia circular (Villela e Mattos, 1975).

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (4.1)$$

em que:

Kc representa o Coeficiente de compacidade,

P é o perímetro da bacia em km e

A é a área da bacia em km<sup>2</sup>

**Fator de forma (F)** – é a relação entre a largura média e o comprimento axial da bacia, em que o comprimento da bacia é medido quando se segue o curso d'água mais longo desde o exutório até a cabeceira mais distante na bacia, podendo ser calculado através da Equação 4.2, segundo Villela e Mattos (1975).

$$F = \frac{A}{L^2} \quad (4.2)$$

em que:

F, adimensional, é o fator de forma,

A é a área da bacia em km<sup>2</sup> e

L é o comprimento axial da bacia em km

**Densidade de drenagem (Dd)** - correlaciona o comprimento total dos canais de escoamento com a área da bacia hidrográfica. A densidade de drenagem foi inicialmente

definida por Horton (1945) apud Christofolletti (1980), podendo ser calculada pela Equação 4.4.

$$Dd = \frac{Lt}{A} \quad (4.4)$$

em que:

Dd representa a densidade de drenagem;

Lt o comprimento total dos canais em km; e

A, a área da bacia em km<sup>2</sup>.

**Índice de Circularidade (IC)** - o índice de circularidade, grandeza adimensional, tende para unidade à medida que a bacia aproxima-se a forma circular e diminui à medida que a forma torna-se alongada (Rocha *et al.*, 2014). Seu cálculo é dado pela Equação 4.5.

$$IC = \frac{12,57 \times A}{P^2} \quad (4.5)$$

em que:

IC é o índice de circularidade,

A é a área da bacia em km<sup>2</sup> e

P é o perímetro da bacia em km.

**Coefficiente de manutenção (Cm)** -proposto por Schumm (1956) apud Christofolletti (1980) esse índice tem a finalidade de fornecer a área mínima necessária para a manutenção de um metro de canal de escoamento. Podendo ser calculado através da Equação 4.6.

$$Cm = \frac{1}{Dd} \times 1000 \quad (4.6)$$

em que:

Cm é coeficiente de manutenção e

Dd é o valor da densidade de drenagem, expresso em metros.

Para o cálculo das variáveis descritas foram utilizados os resultados obtidos a partir do MDE, além da hidrografia disponibilizada pela ANA (2015) Figura 4.5. A realização dos cálculos das geometrias foi feita com o auxílio da ferramenta QGIS.



### 4.3 ESTRUTURAÇÃO DA BASE DE DADOS

Para a realização da simulação o modelo SWAT requer uma série de dados, tais como séries de vazão, precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa, velocidade do vento. Também são necessários dados cartográficos como modelo digital de elevação, mapa de tipo de solo e mapa de uso do solo.

O modelo digital de elevação utilizado foi o MDE SRTM com resolução espacial de 30 metros disponibilizado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), no site <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Com o MDE como dado de entrada foi possível realizar a delimitação automática da bacia com a utilização do QSWAT.

Foram necessários dados de declividade, tipos de solo e uso e ocupação do solo, em que através da junção dos mapas o SWAT realiza a delimitação das HRUs.

Com o modelo digital de elevação foi possível realizar a classificação de declividade da bacia com o QGIS, em que foi adotada a classificação da Embrapa (1979), que classifica as declividades da seguinte forma: de 0 e 3% relevo plano; entre 3 e 8% suave ondulado; de 8 a 20% ondulado; 20 a 45% fortemente ondulado; 45 a 75% montanhoso; e maiores que 75% escarpado. Porém para que a discretização fosse menor em nível de HRU as declividades para a aplicação no modelo foram divididas em três classes de acordo com Uberti et. al (1991) em que de 0 a 8%, representa a classe de relevo plano e suavemente ondulado; de 8 a 20%, relevo ondulado e acima de 20% reúne as classes de relevo fortemente ondulado, montanhoso escarpado e escarpado.

A base de dados de referência do SWAT, a parametrização de dados de solos e de algumas classes de uso do solo, assim como dados climáticos regionais, utilizada neste projeto foi organizada por Ferrigo (2014) e Nunes (2016) para representar melhor as características do bioma cerrado.

O mapa de tipos de solo foi elaborado utilizando um shape file com escala 1:50.000 com as classificações de solo, disponibilizado na plataforma i3geo do Ministério do Meio Ambiente (MMA) da Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno (RIDE/DF), em que a classificação geológica foi desenvolvida pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), e faz parte do Diagnóstico Físico-Biótico do ZEE da RIDE. O shape obtido foi tratado uma vez que possuía áreas sem a tipologia dos solos, correspondente as áreas urbanas, para isso utilizou-se as classes de solo presente nas proximidades, uma vez que por serem áreas impermeabilizadas o impacto do tipo de solo não seria tão significativo.

Para elaboração do mapa de uso e ocupação do solo, foi utilizado o arquivo shape disponibilizado na plataforma i3geo do MMA da Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno (RIDE/DF). Para compatibilização dos usos com a base de dados utilizada no SWAT disponibilizada por Nunes (2016), foi realizada uma adaptação das classes de uso e ocupação do solo. Assim tem-se na Tabela 4.2 as classes originais e adaptadas e o código no arquivo de referência do SWAT.

Tabela 4.2 – Tipologias de uso e ocupação do solo

Classe Original	Classe Adaptada	Código
Savana Parque/Gramínea-Lenhosa	Cerrado	CERR
Lavoura Temporária	Campo Limpo	CAMP
Pastagem e Vegetação Secundária	Agricultura Genérica	AGRL
Savana Parque/Savana Arborizada	Pastagem	PAST
Solo Exposto	Mata Galeria	MATA
Lago	Água	WATR
Floresta Galeria	Solo exposto	BARR
Área Urbana	Residencial Média/Alta Densidade	UMAD
Área Urbana	Residencial Média/Baixa Densidade	UMBD

A tipologia de área urbana foi dividida em duas classes, a partir de observação de imagem de satélite do Google Earth Pro. As áreas classificadas como residencial de média/alta densidade possuem impermeabilização entre 50% e 70 % e as classificadas como residencial de média/baixa densidade área impermeabilizada de 30% a 50%.

Definidas as classes de uso e ocupação do solo e tipo do solo foram gerados arquivos matriciais a partir dos shapes e em seguida arquivos “.csv” contendo as identificação de cada classe no arquivo matricial e o código de acordo com as classes da base de dados do SWAT, para inserção no modelo.

Os dados de vazão foram adquiridos no portal HidroWeb que é uma ferramenta integrante do SNIRH e de responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA). Dentro da área de estudo a estação encontrada com dados disponíveis de vazão, corresponde a estação Ponte Alta localizada em Brasília (Código 6443830) e de responsabilidade da Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (ADASA), com dados diários de junho de 2009 a novembro de 2011. Para utilização na calibração utilizou-se passo mensal, portanto foram feitas as médias dos dados diários e para os dias dados medidos em dois diferentes horários, fez-se a média das médias mensais.

Já os dados climáticos de precipitação, temperaturas máxima e mínima, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento são produtos de Reanálise do Sistema de Previsão Climática (CFSR) dos Centros Nacionais de Previsão Ambiental (NCEP) e foram adquiridos através *Global Weather Data for SWAT* (<https://globalweather.tamu.edu/>) com periodicidade diária, com dados de 1979 a 2014, em formato já padrão para inserção no modelo. O CFSR foi projetado e executado como um sistema global, de alta resolução, oceano-atmosfera-terra acoplado, considerando superfície do gelo e do mar, para fornecer a melhor estimativa do estado destes domínios acoplados durante o período de 36 anos de 1979 a 2014. Para simulação no QSWAT o período de dados climáticos utilizados foi de 01/01/2004 a 31/12/2013, em que 5 anos foram destinados ao aquecimento do modelo. Utilizou-se um período de dados climáticos na simulação menor que o disponível para haver compatibilização dos dados durante a calibração, uma vez que o período de dados monitorados de vazão se restringe a junho de 2009 a novembro de 2011. Não foram encontrados dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) referentes a bacia estudada.

A localização das estações fluviométrica e climática são apresentadas na Figura 4.12.

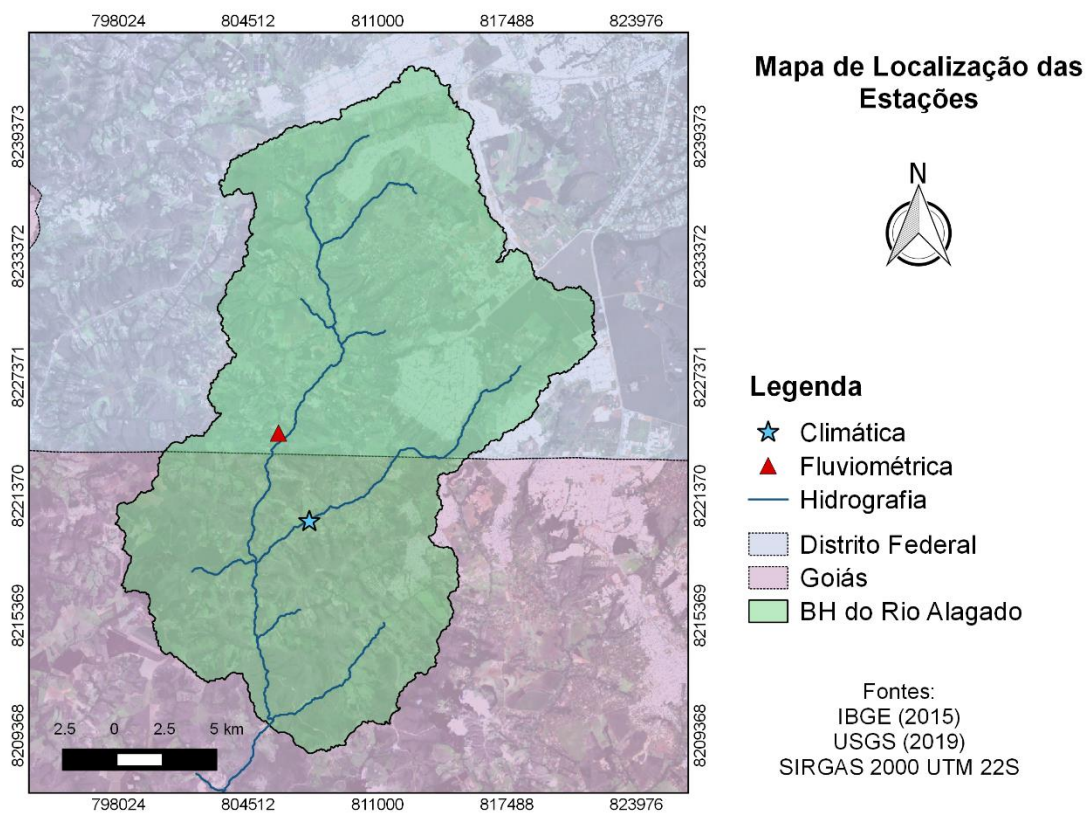


Figura 4.12 - Mapa de localização das estações climática e fluviométrica.

#### **4.4 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA**

Para simulação hidrológica o presente trabalho utilizou como ferramenta o QSWAT, que é a interface do modelo SWAT 2012 no software QGIS versão 2.6.1. A escolha do software QGIS para realização do estudo teve como motivação o fato deste ser um sistema de informação geográfica livre, ou seja, não há custos para sua utilização, o que faz do mesmo uma ótima alternativa para instituições públicas ou privadas que não podem obter softwares que necessitam de licença e que apresentam custos extremamente elevados.

Com os dados de entrada preparados de acordo com os formatos requeridos pelo SWAT foi possível iniciar o projeto de simulação.

##### **4.4.1 Simulação Inicial**

A simulação inicial ocorreu primeiramente a partir da delimitação da bacia, seguidos da criação sub-bacias e HRUs e, por fim, adição dos dados climáticos. Afim de geração de dados acerca dos processos hidrológicos que ocorrem na bacia.

Com a atualização da base de dados no SWAT para a fornecida por (Nunes 2016), foi possível iniciar o projeto de simulação. Inserido o MDE gerou-se a rede de drenagem, a discretização dessa rede é definida pelo usuário, para este trabalho utilizou-se uma área mínima de 15 km<sup>2</sup>, definida por tentativa e erro de acordo com a necessidade do trabalho, uma vez que quanto menor a área maior a discretização e conseqüentemente maior número de sub-bacias. A partir daí foram geradas as sub-bacias. Nesta etapa foi adicionado além do exutório, um ponto correspondente a estação de dados observados de vazão, afim de gerar uma sub-bacia a ser utilizada no processo de calibração.

Para etapa de geração das HRUs, o MDE inserido gerou a base cartográfica de declividade, e foram inseridas as bases cartográficas de tipo de solo e uso e ocupação do solo. Assim a partir da sobreposição dessas bases o modelo gerou as HRUs, cada uma com as mesmas características de solo, uso do solo e declividade. A subdivisão em HRUs aumenta a precisão, uma vez que o escoamento é separado para cada HRU e direcionado para que seja obtido um valor total de escoamento para a sub-bacia (Neitsch et al., 2009).

Na terceira etapa foram adicionados os dados climáticos de precipitação, radiação solar, velocidade do vento, temperatura mínimas e máximas, e umidade relativa do ar. Com todos os dados de entrada inseridos realizou-se a simulação para um período de 10 anos, de janeiro de 2004 a dezembro de 2013, utilizando os cinco primeiros anos para aquecimento, como forma de estabelecer as condições iniciais da bacia e diminuir os possíveis erros no início o processo. Bressiani *et al.* (2015), realizando um estudo de uma bacia no semi-árido

brasileiro, obteve estimativas mais confiáveis de vazão para um período de aquecimento de cinco anos, quando comparado a um período de aquecimento de um ano.

#### 4.4.2 Análise de Sensibilidade

Foram realizadas diversas etapas durante o processo de aplicação e ajuste do modelo SWAT. A análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo gerado é uma etapa fundamental que serve de base para a etapa de calibração.

Durante a análise de sensibilidade foram investigados os parâmetros mais sensíveis do modelo para a variável a ser calibrada, a fim de identificar os parâmetros com maior influência nos processos que ocorrem na bacia.

Para realização da análise de sensibilidade e calibração, utilizou-se o programa SWAT-CUP 2019 versão 5.2.1.1. O algoritmo escolhido para realização dos processos foi o SUFI2. As vantagens do SUFI2, segundo Abbaspour *et al.* (2004) é que ele combina otimização com análise de incertezas e pode trabalhar com um grande número de parâmetros.

Primeiramente foram verificados os parâmetros mais sensíveis para o centro-oeste de acordo com cinco estudos, apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Parâmetros mais sensíveis para estudos no centro-oeste.

Parâmetros mais sensíveis	Referência
SOL_AWC, CN2, SOL_K, CANMX, GW_DELAY, ESCO, GWQMN e ALPHA_BF.	(SILVA, 2016)
SOL_K, CN2, SOL_AWC, SHALLST, ANION_EXCL, REVAPMN, ESCO, ALPHA_BF, SOL_BD, DEEPST, GW_REVAP, GWHT, GWQMN, GW_DELAY	(FERRIGO, 2014)
ESCO, ALPHA_BF, SURLAG, GWQMN, GW_REVAP, CN2, CH_K, RCHRGH_DP, REVAPMN	(SALLES, 2012)
SURLAG, ALPHA-BF, CN2, GWQMN, SOL_K, CH_K2, SLOPE, SLUBBSN, BLAI, SOL_ALB	(CASTRO, 2013)
ESCO, GWQMN, SOL_AWC, SOL_Z, ALPHA_BF, GW_REVAP, REVAPMN, BLAI, CANMX, CN2	(SILVA 2015)

É possível observar que os parâmetros que aparecem em 100% dos estudos analisados são, CN2, GWQMN e ALPHA\_BF, em 80% dos estudos o ESCO e em 60% dos estudos os parâmetros SOL\_AWC, REVAPMN, SOL\_K e GW\_REVAP.

A fim de selecionar os 10 parâmetros mais sensíveis para esse estudo, foi realizada uma análise de sensibilidade com os 14 parâmetros mais sensíveis do estudo de Ferrigo (2014), uma vez que todos os parâmetros de maior frequência apresentados anteriormente estão compreendidos no estudo. Na

Tabela 4.4 é possível observar os parâmetros utilizados e seus respectivos intervalos de variação.

Para inserção dos parâmetros no SWAT-CUP é necessário definir o método de parametrização e o intervalo de variação de cada parâmetros. Nesse estudo, e baseado no estudo de Ferrigo (2014), foram utilizados os métodos de substituição e multiplicação. No método da substituição significa que o valor do parâmetro existente deve ser substituído por um determinado valor (Abbaspour, 2015). No método de multiplicação, um valor positivo no intervalo, por exemplo 0,2, indica que o parâmetro será aumentado em até 20%, entretanto, um valor negativo, por exemplo, -0,3 indica que o parâmetro poderá ser diminuído em até 30% (Ferrigo 2014).

Tabela 4.4 - Parâmetros utilizados na Análise de Sensibilidade e respectivos intervalos mínimo e máximo possíveis de variação. (adaptado de Ferrigo, 2014).

Parâmetro	Nome	Unidade	Intervalo Possível de Variação	
			Mínimo	Máximo
CN2	Curva número na condição II	adim*	0	1
ALPHA_BF	Constante de recessão do fluxo de base	dias	0	1
GW_DELAY	Tempo de retardo da água subterrânea	dias	0	500
GWQMN	Limiar da profundidade da água no aquífero superficial necessária para o fluxo de retorno ocorrer	mm	0	5000
GW_REVAP	Coefficiente "revap" de água subterrânea	adim	0,02	0,2
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo	adim	0	1
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo	mm/mm	0	1
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo	mm/h	0	100
SOL_BD	Densidade aparente do solo	[g/cm3]	0,9	2,5

Tabela 4.1 - Continuação

SHALLST	Altura inicial da água no aquífero raso	mm	0	1000
GWHT	Altura inicial da água subterrânea	mm	0	25
DEEPST	Altura inicial da água no aquífero profundo	mm	0	3000
REVAPMN	Profundidade em aquífero profundo para que aconteça o "revap"	mm	0	500
ANION_EXCL	Fração de porosidade (espaços vazios) a partir da qual os ânions são excluídos.	adim	0,01	1

\*adim- adimensional

Com intuito inicial de selecionar os 10 parâmetros mais sensíveis, foram realizadas apenas 200 simulações, em seguida foi feita análise dos resultados de sensibilidade global. Os resultados obtidos foram analisados com base na aplicação de dois testes, t-stat e p-value, em que quanto maior em valor absoluto o valor de t-stat e quanto menor o valor de p-value, mais sensível é o parâmetro (Abbaspour, 2015).

Tabela 4.5 - Características dos parâmetros utilizados na Análise de Sensibilidade da sub-bacia 11 da bacia do rio Alagado. (adaptado de Ferrigo, 2014)

Parâmetro	Método	Intervalo	
		Mínimo	Máximo
CN2	x	-0,3	0,2
ALPHA_BF	=	0	1
GW_DELAY	=	0	500
GWQMN	=	0	1228
GW_REVAP	=	0,02	0,1
ESCO	=	0,4	1
SOL_AWC	x	-0,2	0,5
SOL_K	x	-1,95	0,8
SOL_BD	x	-0,93	-0,6
SHALLST	=	1000	5000
GWHT	=	0	25
DEEPST	=	0	3000
REVAPMN	=	0	500
ANION_EXCL	=	0,1	1

x: multiplicação; =: Substituição

### 4.4.3 Calibração

Para avaliar a eficiência da simulação utilizou-se a função objetivo de Nash-Sutcliffe (NS) que é definida pela equação 4.1.

$$NS = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y^{obs} - Y^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y^{obs} - \bar{Y})^2} \right] \quad (4.1)$$

Em que,  $Y^{obs}$  é a variável observada,  $Y^{sim}$  a variável simulada e  $\bar{Y}$  a média dos dados observados.

Moriasi *et al.* (2007) classifica os resultados de NS obtidos nas simulações de acordo com faixas de desempenho, apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Classificação de desempenho para passo mensal (adaptado de Moriasi *et al.* (2007)).

Desempenho	NS
Muito bom	$0,75 < NS \leq 1,0$
Bom	$0,65 < NS \leq 0,75$
Satisfatório	$0,5 < NS \leq 0,65$
Insatisfatório	$NS \leq 0,5$

Os 10 parâmetros selecionados na análise de sensibilidade utilizados na etapa de calibração podem ser vistos na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Parâmetros utilizados na calibração.

Parâmetros
CN2
ALPHA_BF
GW_DELAY
GW_REVAP
ESCO
SOL_AWC
SOL_K
SHALLST
REVAPMN
ANION_EXCL



O período de dados observados utilizado na calibração foi de junho de 2009 a novembro de 2011. A calibração foi realizada para a sub-bacia de número 11 (Figura 5.1), em uma região localizada na região central da bacia. Essa sub-bacia foi criada a partir da inserção do ponto referente a localização da estação fluviométrica com dados disponíveis de vazão. Dessa forma, o exutório da sub-bacia foi inserido no mesmo ponto onde são medidos os dados utilizados na calibração do modelo SWAT.

#### **4.5 ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS**

Após o término das etapas da modelagem hidrológica, com a calibração do modelo, foram elaborados cenários para avaliação da influência dos impactos antrópicos na bacia do rio Alagado (DF/GO), com base nas alterações no uso e na ocupação do solo. Em que foram utilizados os valores dos parâmetros calibrados para os diferentes cenários.

Inicialmente a modelagem visou analisar um estado mais recente da bacia, com uso e ocupação apresentados no item 4.1.5, Figura 4.8. Posteriormente, foram gerados cenários hipotéticos, apenas como forma de analisar o impacto das mudanças nas simulações hidrológicas com o modelo calibrado. O objetivo foi entender como as alterações no uso e na ocupação do solo seriam refletidas nas vazões, para um período sem ação antrópica, denominado cenário preservado, e para um período com, ainda, maior alteração antrópica do que a situação real, na atualidade. Dessa forma, foi desenvolvido um cenário antropizado, com possível intensificação da agricultura e expansão urbana na bacia.

Com as respostas obtidas com a simulação para os diferentes cenários foi realizada uma análise comparativa dos resultados, observando-se as alterações ocorridas com o aumento ou a diminuição de variáveis hidrológicas para os diferentes tipos de uso e ocupação do solo.

## 5 - RESULTADOS

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA

Inicialmente foi feito um levantamento de dados relacionados caracterização física da bacia hidrográfica do rio Alagado, com dados sobre o uso e ocupação do solo, tipos de solo na bacia, declividade e clima, já apresentados no item 4.1 sobre a caracterização da área de estudo.

De maneira a completar a caracterização da bacia hidrográfica, são apresentados, na sequência, os resultados da caracterização morfométrica.

As variáveis utilizadas para caracterização morfométrica da bacia do rio Alagado (DF/GO) e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Características morfométricas da bacia do rio Alagado (DF/GO).

Variável Morfométrica	Símbolo	Unidade	Valor
Área da Bacia	A	km <sup>2</sup>	446,20
Perímetro	P	km	156,95
Comprimento total dos canais	Lt	km	445,90
Comprimento do canal principal	L	km	37,10
Coefficiente de compacidade	Kc	adim*	2,08
Fator de Forma	F	adim	0,32
Ordem do rio	N		5°
Densidade de Drenagem	Dd	km/km <sup>2</sup>	0,999
Índice de Circularidade	IC	adim	0,23
Coefficiente de Manutenção	Cm	m <sup>2</sup> /m	1000,67

\*adim- adimensional

A bacia hidrográfica estudada apresenta uma área de 446,2 km<sup>2</sup>, com perímetro de 156,95 km e hierarquia fluvial de 5° ordem, conforme a metodologia Strahler (1957). A extensão do canal principal é de 37,1 km e o comprimento de todos os cursos d'água soma 445,9 km.

O coeficiente de compacidade da bacia é de 2,08. Esse coeficiente varia conforme a forma da bacia, quanto mais próxima a unidade mais circular e maior tendência a enchentes (Villela e Mattos, 1975). O valor encontrado demonstra que a bacia tem formato irregular e pouca tendência a picos de enchentes, a depender das alterações antrópicas.

O fator de forma constitui outro índice indicativo de tendência a enchentes de uma bacia, em que uma bacia com fator de forma baixo é menos sujeita a enchentes que outra de mesmo tamanho porém com fator de forma maior (Villela e Mattos, 1975). O valor encontrado para o fator de forma da bacia estudada foi de 0,38, que é um valor considerado baixo, o que comprova o indicado pelo coeficiente de compacidade, sendo a bacia pouco sujeita a enchentes se ocupada e manejada adequadamente.

A densidade de drenagem varia inversamente com a extensão do escoamento superficial e, portanto, fornece uma indicação da eficiência de drenagem da bacia. Quando esse índice é menor que 0,5 km/km<sup>2</sup> a bacia é considerada com drenagem pobre, bacias com valores de densidade de drenagem entre 0,5 e 1,5 km/km<sup>2</sup> são consideradas de drenagem regular, entre 1,5 e 2,5 km/km<sup>2</sup> para bacias com drenagem boa, entre 2,5 e 3,5 km/km<sup>2</sup> drenagem muito boa e, por fim, valores acima de 3,5 bacias excepcionalmente bem drenadas (Rocha et al., 2014; Villela e Mattos, 1975). A densidade de drenagem da bacia estudo é de 0,999 km/km<sup>2</sup>, o permite identificar a bacia com densidade de drenagem regular.

O índice de circularidade da bacia estudada foi de 0,23, indicando a geometria alongada da bacia. Já o coeficiente de manutenção obtido indica que são necessários 1000,67 m<sup>2</sup> de área para manter cada metro de canal de escoamento.

Portanto a bacia hidrográfica do rio Alagado, possui forma alongada, possui densidade de regular e é pouco suscetível a enchentes.

## **5.2 MODELAGEM**

### **5.2.1 Delimitação da Bacia, das Sub-bacias e HRUs**

A partir da estruturação da base de dados para simulação do modelo SWAT, foi possível iniciar a aplicação do modelo. A primeira etapa foi a delimitação da bacia do rio Alagado, geração das sub-bacias e Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs), um cruzamento único entre tipo de solo, uso do solo e declividade. A partir da inserção do modelo digital de elevação foi gerada a hidrografia e realizado o delineamento da bacia em que foram geradas 16 sub-bacias, sendo a de número 11 gerada com o objetivo de calibração. O contorno da bacia hidrográfica e as sub-bacias são apresentadas na Figura 5.1. Com os dados de declividade, tipo de solo e uso do solo, o modelo gerou 432 HRU's.

As sub-bacias são criadas na interface QSWAT a partir da união dos corpos hídricos. A sub-bacia 11, conforme descrito anteriormente, foi criada a partir da inserção de um novo exutório localizado no mesmo ponto onde ocorre o monitoramento fluviométrico da ADASA, no ponto anterior à divisa entre o Distrito Federal e o Estado de Goiás.

Até o exutório da sub-bacia 11, a área a montante é de 168,5 km<sup>2</sup>, o que representa 37,8% de toda a bacia. Dessa forma, o ponto de monitoramento hidrológico, assim como o ponto de calibração do modelo construído no presente trabalho, está localizado em uma área intermediária da bacia hidrográfica.

As características quanto ao uso do solo, tipo de solo e declividade da área a montante do exutório da sub-bacia 11, são apresentados na Tabela 5.2, Tabela 5.3 e Tabela 5.4, respectivamente.

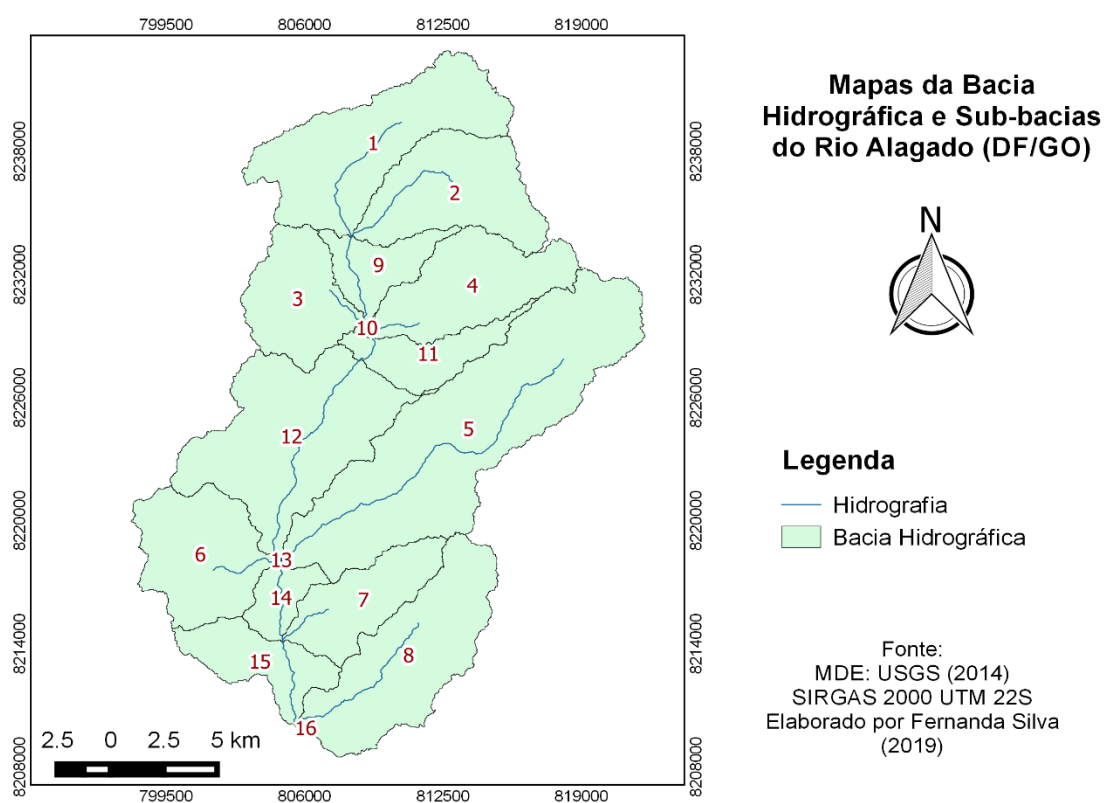


Figura 5.1- Mapa da bacia hidrográfica e sub-bacias do rio Alagado (DF/GO).

Tabela 5.2 - Uso e ocupação do solo da área a montante do exutório da sub-bacia 11 bacia do rio Alagado (DF/GO).

Uso e Ocupação do Solo	Área km <sup>2</sup>	%	% Bacia
Pastagem	85.46	50.69	19.15
Residencial Média/Baixa Densidade	26.60	15.78	5.99
Agricultura	23.28	13.81	5.22
Residencial Média/Alta Densidade	18.92	11.22	4.24
Mata Galeria	8.26	4.90	1.85
Campo Limpo	5.88	3.49	1.32
Cerrado	0.19	0.11	0.42
Total	168.6	100.00	37.8

Tabela 5.3 - Tipos do solo da área a montante do exutório da sub-bacia 11 da bacia do rio Alagado (DF/GO).

Tipo de Solo	Área km <sup>2</sup>	%	% Bacia
Cambissolo	52.92	31.39	11.86
Latossolo Vermelho-Amarelo	43.28	25.68	9.70
Latossolo Vermelho	72.38	42.93	16.22
Total	168.6	100.0	37.8

Tabela 5.4 - Classes de declividade da área a montante do exutório da sub-bacia 11 da bacia do rio Alagado (DF/GO).

Declividade	Área km <sup>2</sup>	%	% Bacia
0-8.0	112.9225	66.98	25.31
8.0-20.0	39.9642	23.71	8.96
20.0-9999	15.6962	9.31	3.52
Total	168.6	100.0	37.8

### 5.2.2 Simulação Inicial

Após a inserção de todos os dados de entrada, o SWAT gerou resultados iniciais de vazão para o período estipulado de dados climáticos, sem o período de aquecimento, apresentado na Figura 5.2, em que se observa as recessões ocorrendo entre os meses de julho e setembro e os picos de vazão principalmente nos meses de janeiro e fevereiro. O hidrograma comparativo com resultados da simulação inicial e dados observados para a sub-bacia 11, para o período de junho de 2009 a novembro de 2011, podem ser observados na Figura 5.3.

É possível observar que na simulação inicial, sem calibração, os picos de vazão foram bem superiores aos observados, principalmente para o segundo período em que a vazão simulada chegou a 25,64 m<sup>3</sup>/s. Já para os períodos de recessão houve subestimação das vazões. Esse resultado demonstra a pouca aderência entre dados simulados e observados, e é confirmado pelo coeficiente de Nash Sutcliffe (NS) que para essa simulação foi de -5,8, considerado insatisfatório segundo a classificação de Moriasi *et al.* (2007).

Visando melhorar os resultados de simulação foi realizada a calibração do modelo.

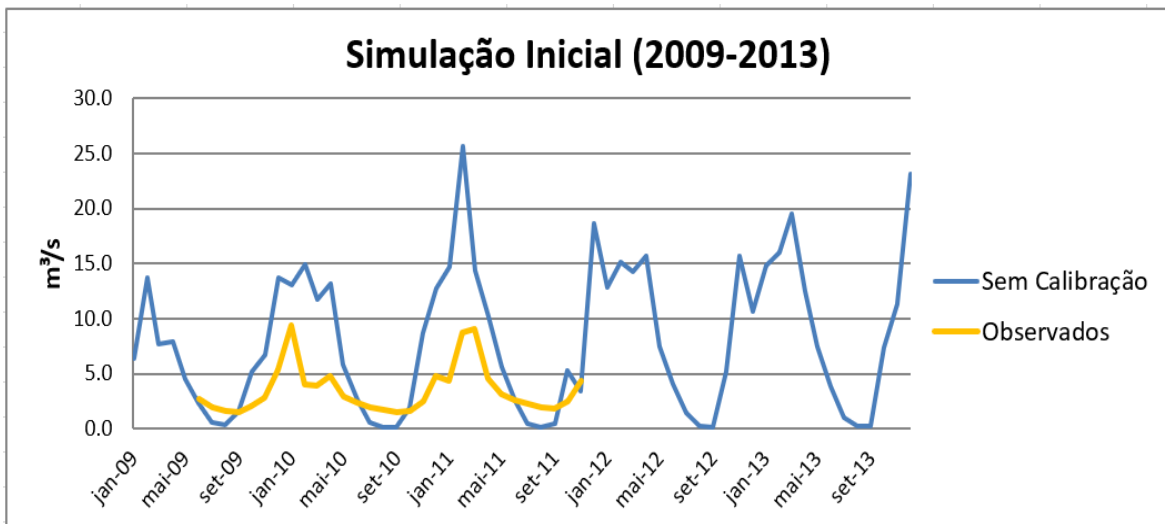


Figura 5.2 – Hidrograma dos dados simulados sem calibração (2009-2013) e dados observados (2009-2011) para sub-bacia 11 da bacia hidrográfia do rio Alagado (DF/GO) (Adasa-Hidroweb).

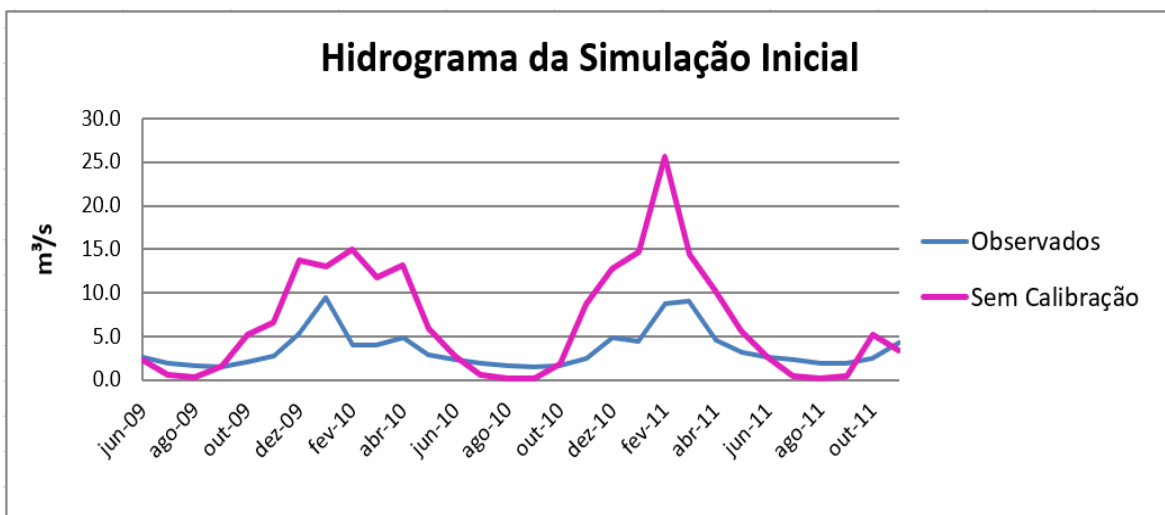


Figura 5.3 – Hidrograma dos dados simulados sem calibração e dados observados para sub-bacia 11 da Bacia Hidrográfica do Rio Alagado (DF/GO) (Adasa-Hidroweb).

### 5.2.3 Análise de Sensibilidade

Para realização do processo de calibração foram adotados os parâmetros utilizados no estudo de Ferrigo (2014). A primeira iteração foi realizada com 200 simulações a fim de obtenção dos parâmetros mais sensíveis. Assim dos 14 parâmetros analisados, os 10 mais sensíveis foram selecionados para as calibrações posteriores.

Como resultados da primeira iteração foram obtidos a análise de sensibilidade global mostrada na Figura 5.4 e o hidrograma apresentado na Figura 5.5.

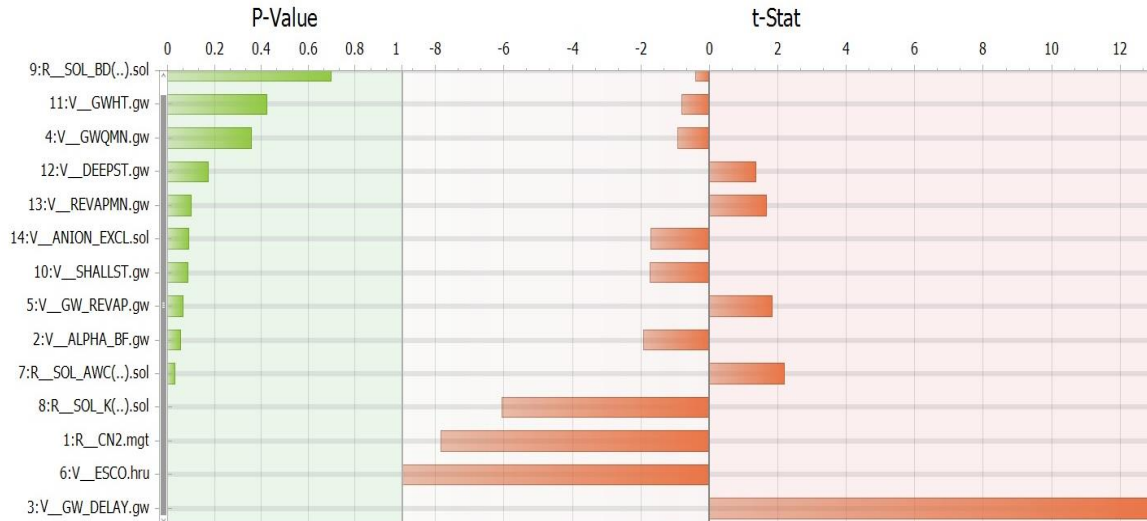


Figura 5.4 – Análise de sensibilidade global da calibração inicial

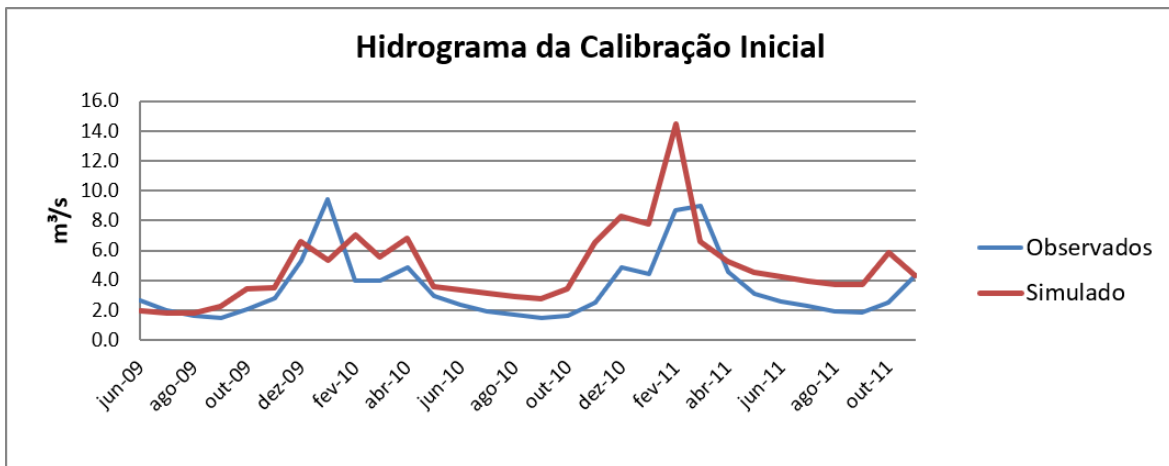


Figura 5.5 - Hidrograma dos dados simulados da calibração e dados observados para sub-bacia 11 da hacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO) (Adasa-Hidroweb).

Como se pode observar na Figura 5.5, após a realização da calibração automática, quando comparados com simulação inicial, houve melhora dos resultados. Ocorrendo diminuição dos picos de vazão e aumento da vazão nos períodos de recessão, que anteriormente eram próximos a zero. Porém, o resultado ainda pode ser considerado insatisfatório, uma vez que o NS obtido para essa simulação foi de -0,8, indicando que o valor médio observado é melhor que o valor simulado.

Considerando os resultados obtidos de p-value e t-stat na análise de sensibilidade global os 5 parâmetros que apresentaram maior sensibilidade foram: tempo de retardo da água subterrânea (GW\_DELAY), fator de compensação de evaporação do solo (ESCO),

curva número na condição II (CN2) , condutividade hidráulica saturada do solo (SOL\_K) e capacidade de água disponível no solo SOL\_AWC.

O parâmetro de maior sensibilidade para este estudo foi o GW\_DELAY- intervalo de tempo para recarga do aquífero, que apresenta pouca frequência para os estudos analisados e apresentados na Tabela 4.3. Esse parâmetro é importante no cálculo da recarga do aquífero e é dependente da formação geológica, sendo inversamente proporcional a recarga (Ferrigo 2014).

O ESCO – fator de compensação de evaporação do solo, é importante no processo de evapotranspiração. Os valores desse parâmetro representam um percentual aplicado à evaporação da camada superior do solo, de modo que percentuais elevados significam maior evaporação (Ferrigo, 2014).

O parâmetro CN2 – curva número na condição II, é um parâmetro importante no cálculo do volume de escoamento superficial, e é função da capacidade de infiltração, do tipo de solo, do uso do solo, e das condições antecedentes de umidade no solo (Ferrigo, 2014).

O SOL\_K – condutividade hidráulica saturada do solo é um parâmetro necessário para calcular o tempo de percolação da água de uma camada do solo para uma camada inferior (Neitsch *et al.* 2009). Segundo Ferrigo (2014), este parâmetro interfere no fluxo de base pois é responsável pelo fluxo horizontal na zona saturada, e isso pode ser determinante na simulação da vazão em épocas de estiagem. Para trabalhos desenvolvidos no centro-oeste brasileiro, esse parâmetro tende a ser importante e significativo na simulação do decaimento da vazão após o período chuvoso.

O parâmetro SOL\_AWC – capacidade de água disponível no solo, tem uma relação inversa com vários componentes do balanço hídrico. Dessa forma, um aumento no valor desse parâmetro diminuirá o fluxo de base, o escoamento superficial, e conseqüentemente a vazão (Kannan *et al.*, 2007).

#### **5.2.4 Calibração**

Após a seleção dos 10 parâmetros mais sensíveis, a etapa de calibração foi realizada com o objetivo de aproximar os dados observados e simulados, aumentando a aderência entre os dois conjuntos de valores. Para os parâmetros selecionados, inseriu-se os respectivos valores de mínimo e máximo apresentados na Com intuito inicial de selecionar os 10 parâmetros mais sensíveis, foram realizadas apenas 200 simulações, em seguida foi feita análise dos resultados de sensibilidade global. Os resultados obtidos foram analisados com



base na aplicação de dois testes, t-stat e p-value, em que quanto maior em valor absoluto o valor de t-stat e quanto menor o valor de p-value, mais sensível é o parâmetro (Abbaspour, 2015).

Tabela 4.5, e a calibração foi efetuada com 1000 simulações. Como resultado obteve-se o hidrograma apresentado na Figura 5.6.

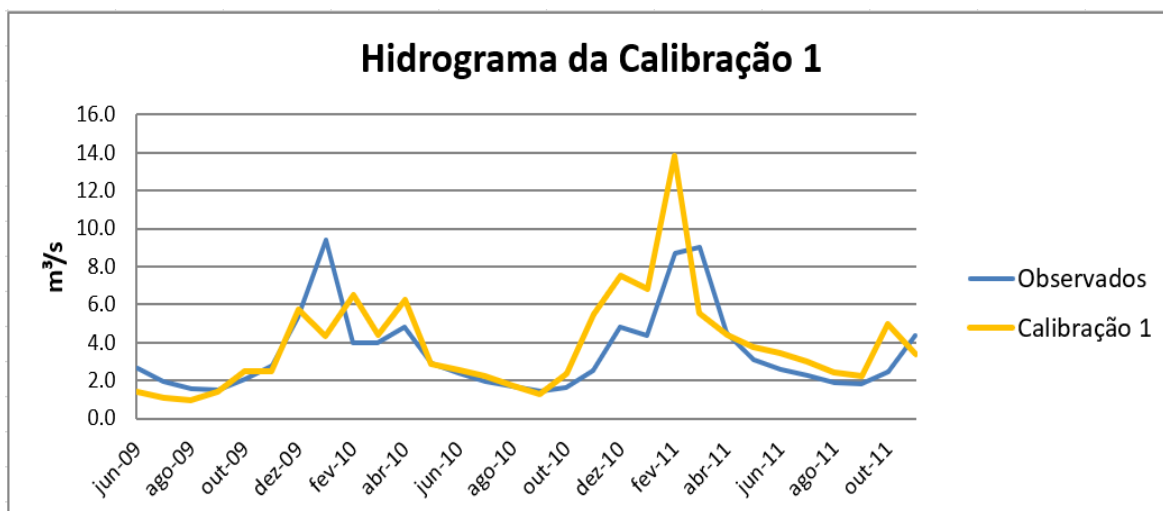


Figura 5.6 - Hidrograma da calibração 1 para a sub-bacia 11 da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO) (Adasa-Hidroweb).

Observa-se que o modelo simulou de forma satisfatória o período de recessão entre maio e setembro de 2010, e o de ascensão de vazão, entre setembro e novembro de 2009, porém superestimou o pico de vazão em 2011 e subestimou em janeiro de 2010.

De modo geral a diminuição do número de parâmetros, e utilização dos que mais influenciavam no modelo melhorou a aderência dos dados observados e simulados, em que o NS saiu de -5,8 na simulação sem calibração e atintiu o valor de 0,24 na calibração 1. Porém segundo a classificação de Moriasi *et al.* (2007) o valor de NS obtido é insatisfatório.

Como resultado da iteração também foram sugeridos novos intervalos para os parâmetros analisados, como forma a diminuir a faixa de variação dos parâmetros e aproximar os dados observados e simulados.

Com o ajuste dos dados sugeridos pelo SWAT-CUP, mantendo os valores pré-estabelecidos de mínimo e máximo para cada parâmetro foi possível a realização de nova iteração. Segue na

Tabela 5.5 os novos intervalos de mínimo e máximo dos parâmetros, adaptados para calibração 2.

Na calibração 2, quando comparada a calibração 1, nota-se uma piora na simulação para o período de recessão entre maio e setembro de 2010, e uma melhora para o período de novembro de 2010 a abril de 2011, em que as vazões simuladas ficaram mais próximas as observadas e houve diminuição de cerca de 8% no pico de vazão ocorrido em fevereiro de 2011. O NS obtido para essa calibração foi de 0,36, indicando que a simulação no geral foi mais satisfatória comparada a calibração 1, porém ainda insatisfatória de acordo com a classificação de Moriasi *et al.* (2007).

Tabela 5.5 – Intervalos de Mínimo e Máximo utilizados na calibração 2.

Parâmetro	Mínimo	Máximo
CN2	-0.3	0.014643
ALPHA_BF	0.431215	1
GW_DELAY	246.0984	500
GW_REVAP	0.05986	0.1
ESCO	0.239027	0.746373
SOL_AWC	-0.0021	0.393799
SOL_K	-1.95	-0.24559
SHALLST	1000	3177.14
REVAPMN	0	303.8924
ANION_EXCL	0.1	0.609656

Para a calibração 2, também foram realizadas 1000 simulações. Os hidrograma obtido é apresentado na Figura 5.7.

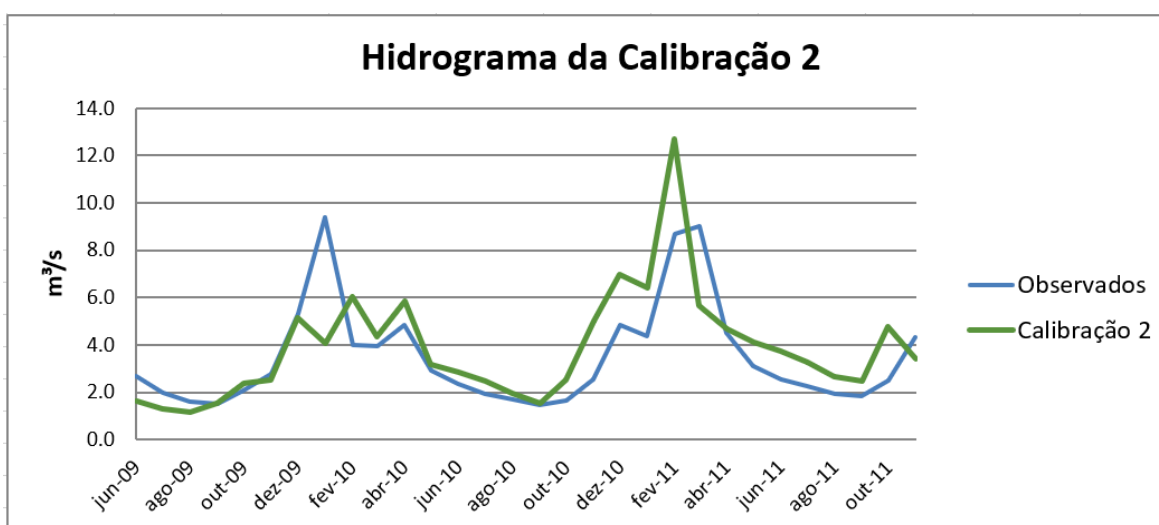


Figura 5.7- Hidrograma da calibração 2 para a sub-bacia 11 da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO)(Adasa-Hidroweb).

Com objetivo de aproximar ainda mais os resultados simulados e observados, realizou-se uma nova calibração, utilizando novos intervalos de parâmetros sugeridos nos resultados da calibração 2 e adaptados para calibração 3, apresentados na Tabela 5.6.

Foi observado, que na calibração 1 e 2 as melhores simulações ocorreram antes da nº 500 e levando em consideração que Abbaspour (2015) recomenda cerca de 500 simulações a cada iteração, o número de simulações para calibração 3 foi diminuído para 500. Com a realização da calibração 3, foi possível obter os resultados de vazão apresentados na Figura 5.8.

Tabela 5.6 - Intervalos de Mínimo e Máximo utilizados na calibração 3.

Parâmetro	Mínimo	Máximo
CN2	-0.3	-0.1396
ALPHA_BF	0	0.926505
GW_DELAY	361.9319	500
GW_REVAP	0.02	0.1
ESCO	0.384237	0.67473
SOL_AWC	0.040744	0.276132
SOL_K	-1.42553	-0.37633
SHALLST	1000	2110.977
REVAPMN	31.9741	213.2671
ANION_EXCL	0.045832	0.421738

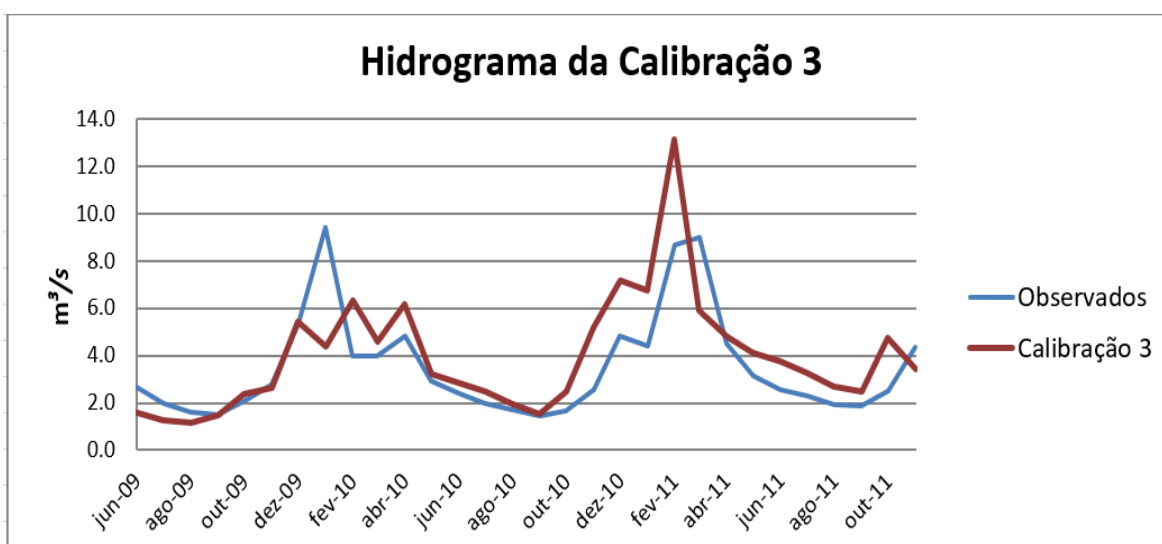


Figura 5.8 - Hidrograma da calibração 3 para a sub-bacia 11 da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO) (Adasa-Hidroweb).

Analisando os resultados das calibrações 2 e 3, percebe-se pouca diferença quanto ao hidrograma, porém houve uma piora nos resultados, em que o NS foi de 0,36 para 0,33. Como uma tentativa de melhorar os resultados, realizou-se mais uma calibração com 500 simulações e utilizando os intervalos de parâmetros apresentados na Tabela 5.7. O hidrograma gerado é apresentado na Figura 5.9.

Tabela 5.7 - Intervalos de Mínimo e Máximo utilizados na calibração 4.

Parâmetro	Mínimo	Máximo
CN2	-0.3	-0.2
ALPHA_BF	0.374681	1
GW_DELAY	406.582977	495.940887
GW_REVAP	0.02	0.1
ESCO	0.36489	0.571488
SOL_AWC	0.11781	0.272036
SOL_K	-1.58356	-0.77858
SHALLST	606.037109	1609.49231
REVAPMN	34.585278	153.729919
ANION_EXCL	0.062523	0.302049

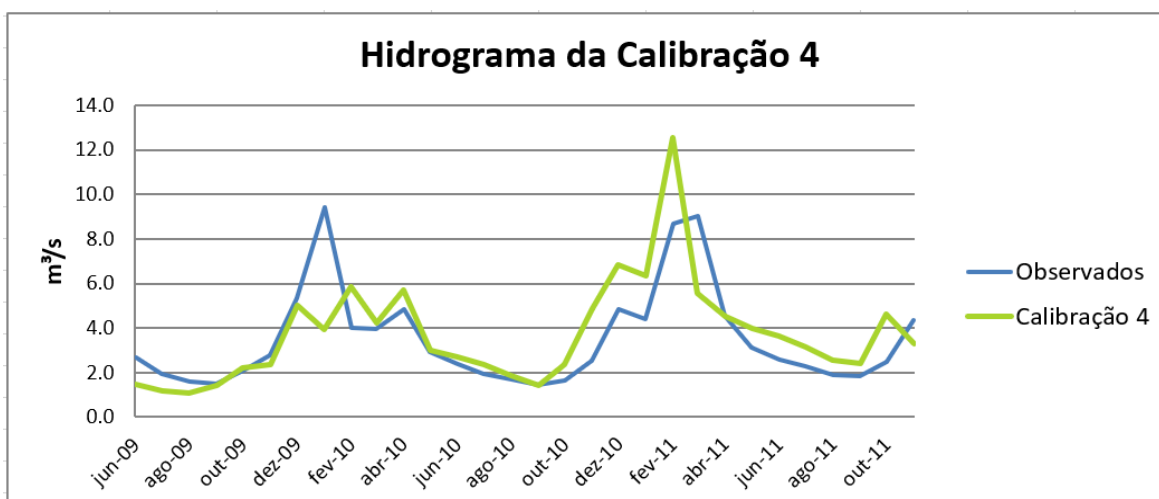


Figura 5.9 -Hidrograma da calibração 4 para a sub-bacia 11 da bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO) (Adasa-Hidroweb)..

Os resultados obtidos na calibração 4, voltaram a melhorar em relação a calibração 3 porém não diferiram significativamente da calibração 2. O NS obtido para essa iteração foi de 0,38 apresentando uma melhora pouco significativa quanto a função objetivo. Uma vez que as 3 últimas calibrações não apresentaram melhoras significativas, finalizou-se o

processo de calibração, e considerou-se a calibração 4 como a melhor calibração, sendo esta utilizada para posteriores simulações no SWAT.

Vale ressaltar que segundo Moriasi et al., (2007) o valor de NS encontrado para calibração 4, ainda é considerado insatisfatório.

Há diversos fatores que podem ter contribuído para o resultado insatisfatório da calibração. Dentre eles os parâmetros do modelo, a base de dados de referência utilizada no estudo que foi adaptada de maneira a abranger as características de tipo e usos do solo para o cerrado. As observações da variável de interesse, uma vez que os dados foram obtidos diariamente, adicionando erro ao se condiserar o valor mensal como a média dos diários. Além dos dados climáticos, que foram dados gerados e não medidos.

Outro fator importante é a função objetivo escolhida, o coeficiente de Nash-Sutcliffe é extremamente sensível a eventos extremos, por elevar os desvios ao quadrado, o que tende a penalizar grandes desvios que ocorrem geralmente em vazões altas (Legates & McCabe, 1999).

A fim de observar e comparar o comportamento das vazões antes e após a calibração, e com os dados observados, regou-se o hidrograma apresentado na Figura 5.10.

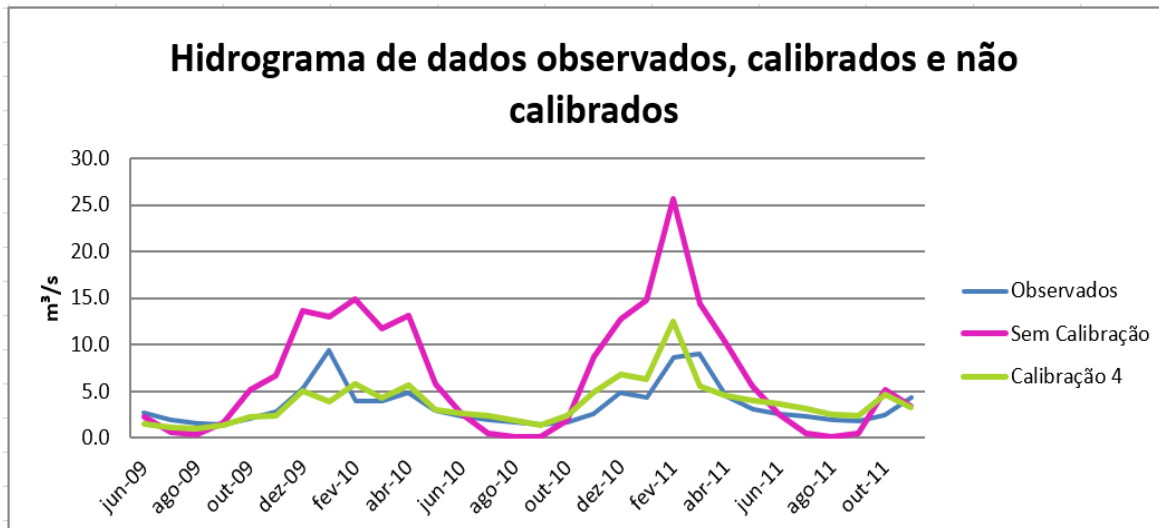


Figura 5.10 - Hidrograma de dados observados, não calibrados e calibrados para a sub-bacia 11 da bacia do rio Alagado (DF/GO) (Adasa-Hidroweb).

Na Figura 5.10 é nítido a diferença dos hidrogramas antes e após a calibração, tem-se uma queda significativa para as vazões de pico, correspondendo a uma diminuição de cerca de 70 e 51 % para os eventos de janeiro de 2010 e fevereiro de 2011. Além do aumento para os períodos de recessão, que se apresentavam nulos na simulação sem calibração.

De maneira geral, nota-se da melhor calibração que as recessões simuladas apresentaram maiores valores de vazão que as observadas, também ocorreu a superestimação das vazões para o período de outubro de 2010 a fevereiro de 2011. Já o pico observado em janeiro de 2010, com vazão de 9,4m<sup>3</sup>/s não foi bem simulado, ocorrendo uma subestimação com uma diferença significativa entre a vazão simulada após a calibração e a observada.

Portanto é evidente a importância da calibração do modelo a fim da obtenção de valores mais representativos de vazão para a área de estudo.

Com a calibração do modelo e considerando que a calibração foi representativa para toda área da bacia, foi possível adicionar os parâmetros calibrados, apresentados na Tabela 5.8, no SWAT e gerar resultados de vazão no exutório na bacia Figura 5.11.

Tabela 5.8 - Parâmetros, intervalos e valores resultantes da calibração 4 da sub-bacia 11 da bacia do rio Alagado (DF/GO).

Parâmetro	Intervalo		Valor na Calibração
	Mínimo	Máximo	
CN2	-0,3	0,2	-0,2971
ALPHA_BF	0	1	0,751748
GW_DELAY	0	500	487,988
GW_REVAP	0,02	0,1	0,0996
ESCO	0,4	1	0,376666
SOL_AWC	-0,2	0,5	0,249673
SOL_K	-1,95	0,8	-0,89208
SHALLST	1000	5000	1096,727
REVAPMN	0	500	82,36228
ANION_EXCL	0,1	1	0.275462

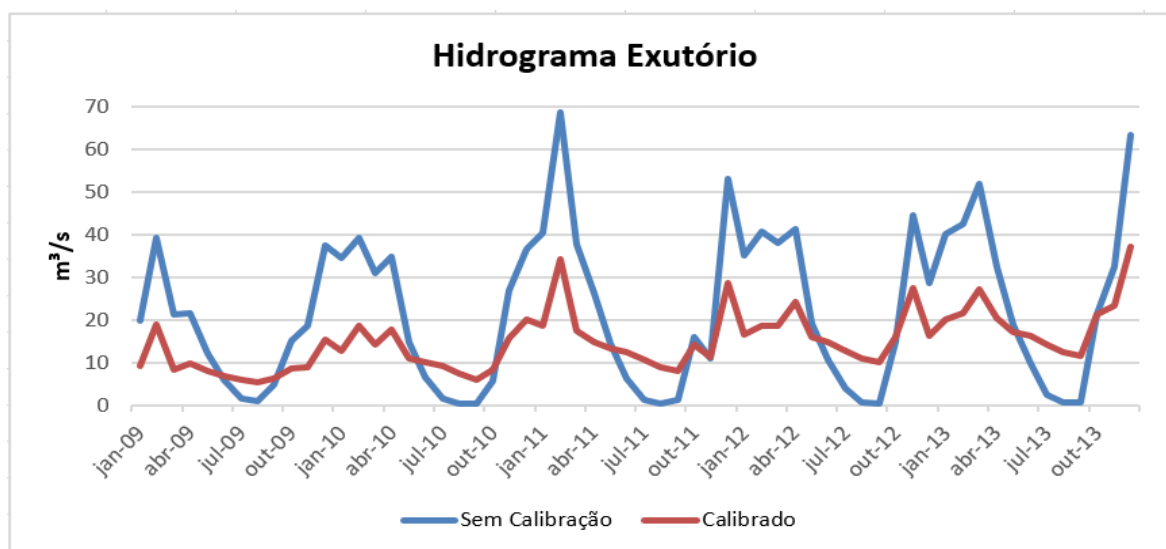


Figura 5.11 - Hidrograma de dados não calibrados e calibrados para o exutório da bacia do rio Alagado (DF/GO).

Nota-se da Figura 5.11 a enorme discrepância entre os dados de vazão no exutório da bacia antes e depois da calibração, em que em diversos períodos a vazão simulada antes da calibração foi o dobro da vazão para o modelo calibrado, quando se observava as vazões de pico. Olhando para os valores nas recessões a vazão simulada antes da calibração chega a ser cerca de 26 vezes menor que os valores encontrados com a calibração em agosto de 2013. Esses resultados ressaltam a necessidade da calibração, uma vez que o modelo superestima os picos de vazão e subestima os períodos secos de forma significativa.

### **5.2.5 Simulação de Cenários**

A partir dos resultados obtidos pelo processo de calibração do modelo SWAT para a bacia do rio Alagado, assumindo que a vazão da bacia hidrográfica no exutório estaria mais próxima das séries de vazões reais, foi possível realizar uma análise com a bacia submetida a diferentes cenários de alterações antrópicas.

Para avaliar o comportamento das vazões frente aos diferentes usos e ocupações do solo na bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO), foram criados dois cenários, um cenário preservado e um cenário extremamente antropizado, como forma de representar a bacia em um período com vegetação predominantemente nativa e outro com a bacia predominante urbanizada.

Para o cenário preservado foram considerados apenas os seguintes usos, cerrado (411.84 km<sup>2</sup>), Mata de Galeria (33.93 km<sup>2</sup>) e Água/Lago (0.43 km<sup>2</sup>). A distribuição dessas classes na bacia são apresentadas na Figura 5.12.

Para o cenário antropizado, considerou-se que haveria uma grande urbanização da área da bacia, em que os usos e ocupações seriam predominantemente de área urbana de média e alta densidade ocupando 367.7 km<sup>2</sup> da bacia e de uso agrícola com área de 78.07 km<sup>2</sup>, além de uma pequena parcela de água/lago de 0.43 km<sup>2</sup>. A distribuição desses usos para a bacia podem ser visto na Figura 5.13.

#### **5.2.5.1 Resultados dos cenários**

Com a realização das simulações para os cenários antropizado e preservado, foi possível gerar um hidrograma comparativo, com os resultados desses cenários e o hidrograma obtido com o uso e ocupação atual da bacia (Figura 4.8). Esse hidrograma comparativo é apresentado na Figura 5.14.

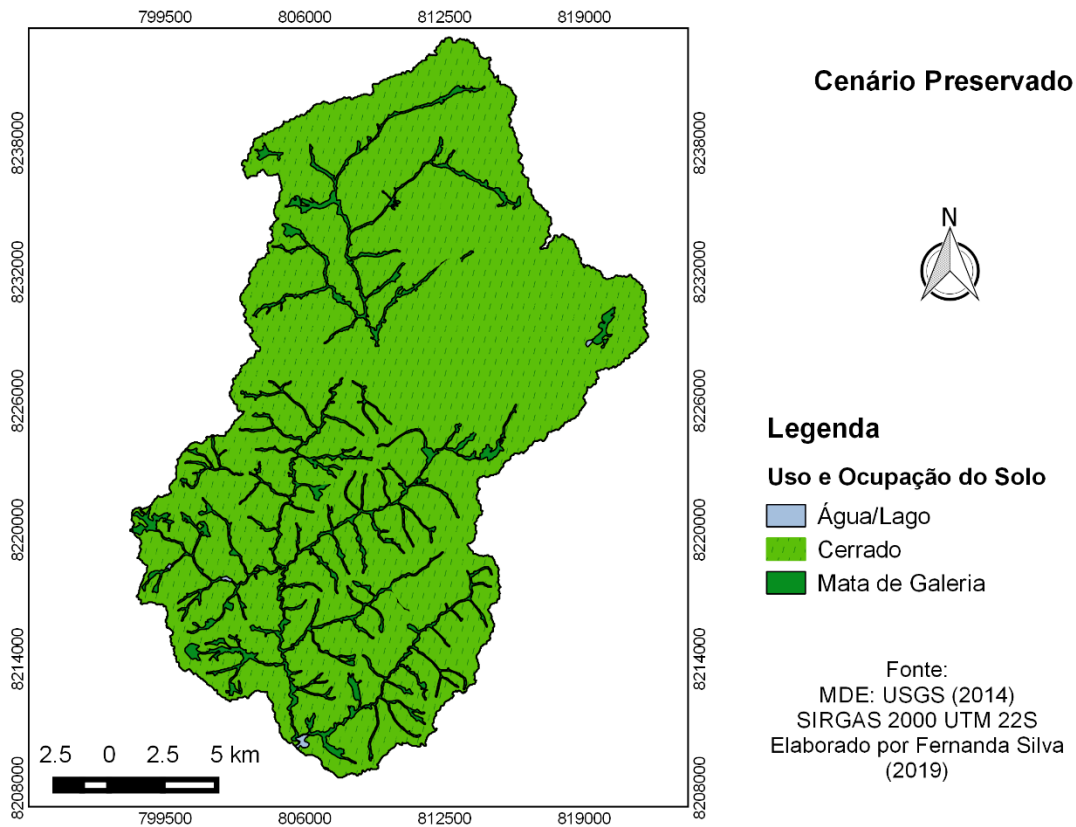


Figura 5.12- Cenário preservado de uso e ocupação do solo para a bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO).

Observa-se que o resultado mais divergente entre os apresentados foi para o cenário com uso do solo predominantemente urbano. Com valores de vazões bem maiores para os períodos chuvosos e de bem menores para os períodos de recessão. As mudanças nas vazões para o cenário preservado e com uso e ocupação atual da bacia foram mais sutis, porém representaram de forma satisfatória o comportamento das vazões para o cenário preservado, com a diminuição das vazões de pico e aumento das vazões nos períodos de recessão.

De modo geral os resultados obtidos para os cenários foram satisfatórios. O comportamento das vazões demonstrou que para bacias predominantemente urbanizadas as vazões de pico tendem a aumentar, uma vez que a área disponível para infiltração é limitada, aumentando assim o escoamento superficial. Porém como a diminuição da infiltração é significativa devido a impermeabilização da área, ocorre diminuição no escoamento subsuperficial e na descarga do aquífero, refletindo assim nas menores vazões para os períodos de recessão.

Já no cenário preservado ocorre o inverso, tem-se o aumento da infiltração, o que diminui o escoamento superficial e conseqüentemente os picos de vazão, e com isso a



recarga do aquífero é maior, resultando em um período de seca com vazões maiores devido a disponibilidade maior de descarga do aquífero.

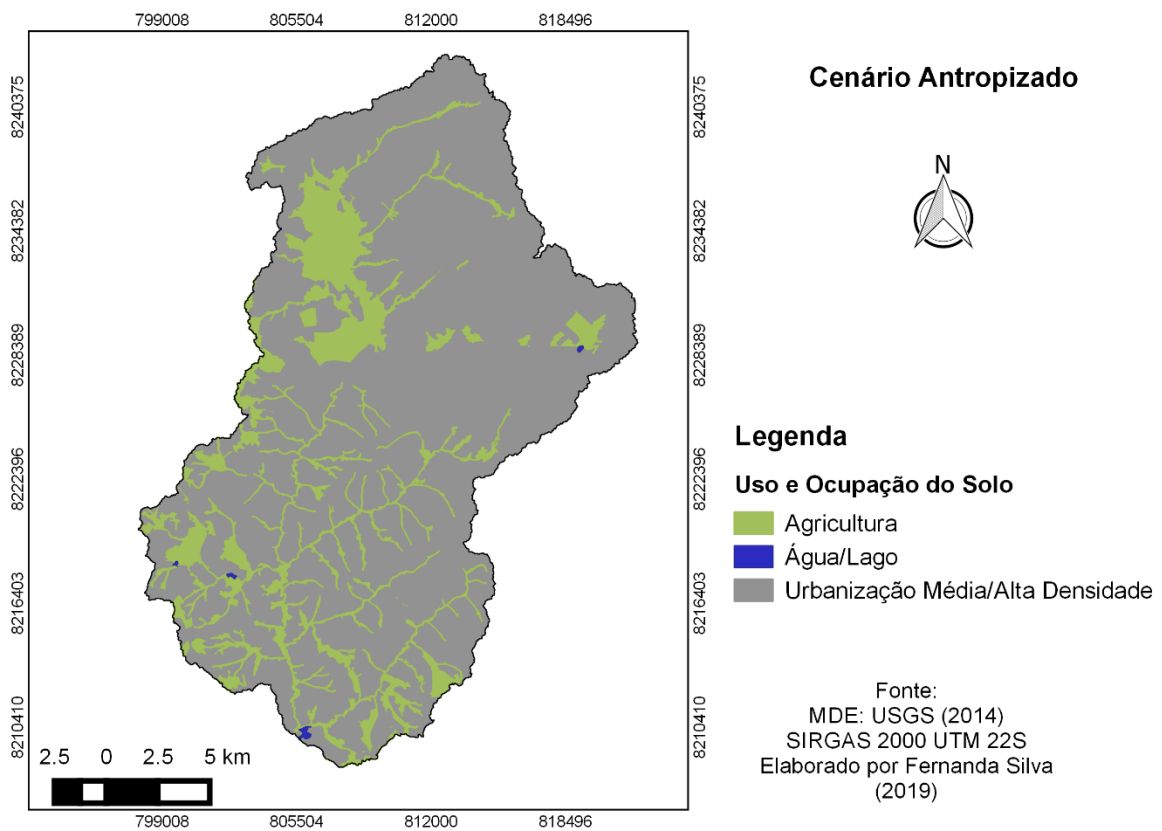


Figura 5.13 - Cenário antropizado de uso e ocupação do solo para a bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO).

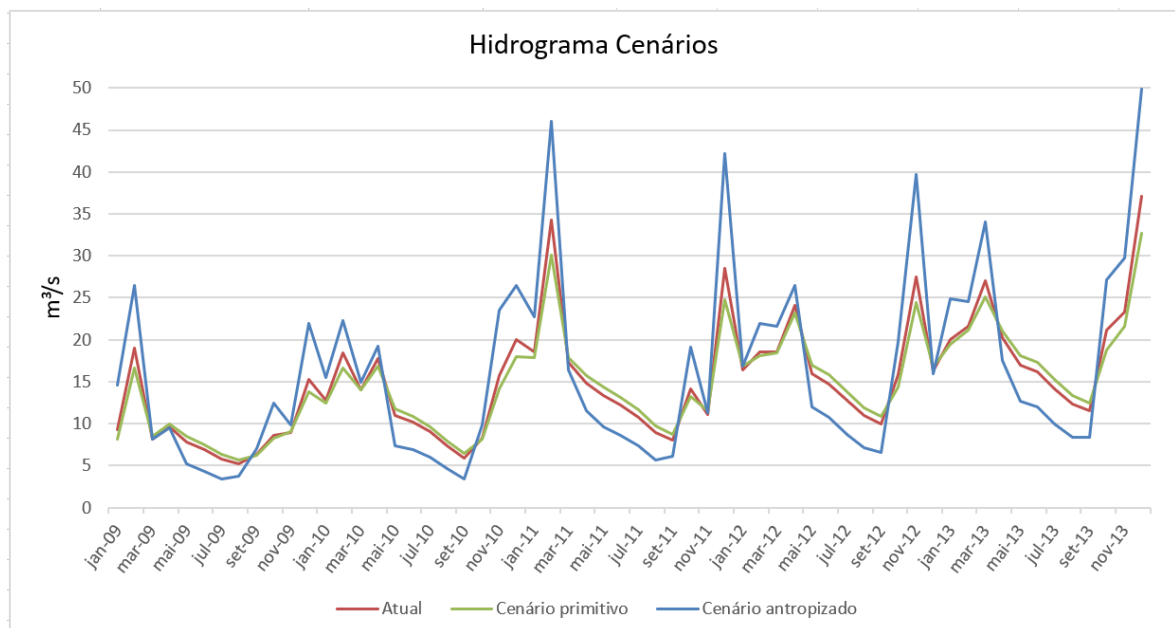


Figura 5.14 - Hidrograma para os diferentes cenários de uso e ocupação do solo.

## 6 - CONCLUSÕES

As simulações hidrológicas são uma alternativa para avaliar os processos que ocorrem na bacia e auxiliar nos processos de tomada de decisão. A aplicação do modelo SWAT, acoplado ao software QGIS, se mostrou uma alternativa viável, levando em consideração que não houve problemas na simulação utilizando a interface QGIS e que o mesmo pode ser adquirido gratuitamente.

Os resultados gerados inicialmente pelo modelo não representaram de forma satisfatória os processos ocorridos na bacia, ocorrendo uma superestimação da vazão para os períodos chuvosos e subestimação para os períodos secos, que apresentaram vazões nulas.

A análise de sensibilidade permitiu identificar os parâmetros mais sensíveis para a área de estudo, em que os cinco mais sensíveis foram GW\_DELAY, ESCO, CN2, SOL\_K e SOL\_AWC.

Com a realização da calibração do modelo ocorreu a melhora significativa dos resultados, o que reforça a necessidade de realização dessa etapa. O melhor resultado obtido após a calibração gerou um valor de coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,38, considerado insatisfatório segundo a classificação Moriasi et al. (2007) porém não distante do valor satisfatório segundo a mesma classificação. Esse resultado pode-se ser reflexo de diversas fontes de erro, desde as observações da variável de interesse até a escolha da função objetivo, que é extremamente sensível a eventos extremos.

A escassez de dados hidrológicos relacionados à bacia hidrográfica do rio Alagado limitou o processo de calibração do modelo SWAT para as vazões. Um maior período de dados contínuos na estação já existente na saída do Distrito Federal ou a existência de dados no exutório da bacia hidrográfica contribuiriam para ampliar a base de dados disponível para essa etapa do processo de modelagem hidrológica.

As classes de enquadramento propostas e a quantidade de estações de tratamento de esgoto que despejam efluente nos corpos d'água da bacia, contribuindo significativamente para piora na qualidade da água, demonstram a necessidade de um maior monitoramento quanto a qualidade da água.

Os cenários gerados apresentaram os impactos que a mudança no uso e ocupação do solo na bacia geram no balanço hídrico e, conseqüentemente, o reflexo das alterações nas vazões simuladas. O cenário preservado resultou em uma diminuição das vazões nos períodos chuvosos e aumento das vazões nos períodos secos, o contrário aconteceu para o

cenário antropizado. Isso demonstra a necessidade de planejamento territorial da bacia hidrográfica, do controle no processo de urbanização a fim de evitar eventos extremos, como enchentes e secas.

## **7 - RECOMENDAÇÕES**

As limitações de dados disponíveis no exutório da bacia hidrográfica indicam uma necessidade premente de ampliação dos programas de monitoramento hidrológico na bacia do rio Alagado. O aprimoramento da gestão de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Alagado (DF/GO) deverá envolver uma ampliação desses programas, com a ampliação da geração de dados fluviométricos e de qualidade de água, tanto no exutório da bacia hidrográfica como em pontos intermediários.

Sugere-se para trabalhos futuros a análise de aspectos referentes a qualidade da água, como descarga sólida, cargas de nutrientes (nitrogênio e fósforo), oxigênio dissolvido (OD) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO), uma vez que o exutório da bacia fica a montante do futuro sistema de captação de água (Corumbá IV) sendo importante avaliar o impacto das mudanças no uso e ocupação da bacia e sobre o lançamento de efluentes. Além da aquisição de dados monitorados de qualidade da água da CAESB, não disponíveis no HidroWeb.

Além de criação de cenários com maior embasamento teórico, levando em consideração estudos populacionais e socioeconômicos, a análise de planos diretores, pesquisa metropolitana por amostras de domicílio, previsão de cargas de poluição efluentes ao longo dos próximos anos e lei de uso e ocupação do solo.

Também sugere-se a avaliação dos resultados com mais de uma função objetivo, como forma de melhor avaliar os resultados obtidos, uma vez que cada função é sensível a determinado evento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbaspour, K. C, Johnson, C. A., e van Genuchten, M. Th. (2004). “Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure”. *Vadose Zone Journal* 3(4): 1340–1352.
- Abbaspour, K. C. (2015). *Science And Technology SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual*. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, 100 p.
- Adasa - Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. (2012). *Revisão e Atualização do Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal - PGIRH-DF: Prognóstico – Volume II*. Brasília: ADASA, 2012
- Adasa - Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. (2017). “Plano Distrital de Saneamento Básico”. Disponível em:< [www.so.df.gov.br](http://www.so.df.gov.br)>. Acesso: 5 de jun. de 2019.
- Almeida, L., & Serra, J. C. V. (2017). “Modelos hidrológicos , tipos e aplicações mais utilizadas”. *FAE*, 20(1), 129–137.
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M.; Sparovek, G. Köppen’s climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- Ana – Agência Nacional de Águas. (2015). Disponível em:< <http://metadados.ana.gov.br/geonetwork>> Acesso: 10 de jun. de 2019.
- Ana - Agência Nacional de Águas. (2017). *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil*. Brasília: Agência Nacional de Águas. 169p.
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Arnold, J.F. G. (2012). “Swat: model use, calibration, and validation.” *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491–1508.
- Blainski, É., Acosta, E., e Prado Nogueira, P. C. do. (2017). “Calibração e validação do

modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense.” *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 12(2), 226–237.

Bourotte, C. L. M. (2014). “O Ciclo da Água”. *Geologia*. São Paulo: USP/UNIVESP. 118–133.

BRASIL. Lei Complementar nº 94, de 19 de fevereiro de 1998. Autoriza o Poder Executivo a criar a Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno - RIDE e instituir o Programa Especial de Desenvolvimento do Entorno do Distrito Federal, e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/lcp/Lcp94.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/Lcp94.htm)> Acesso: 06 de jul. de 2019.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências (2010). Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm)> Acesso: 20 out. de 2018.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei (1997). Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm)> Acesso: 26 out. de 2018.

Bressiani, D. D. A., Raghavan, S., Jones, C. A. e Mendiondo, E.M. (2015). “Effects of different spatial and temporal weather data resolutions on the stream flow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil”. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 8(3): 1–16.

Caprario, J. C., Rech, A. S., Caprario, G. N., & Finotti, A. R. (2018). Simulação Hidrossedimentológica da Bacia Hidrográfica do Rio Quatorze, Francisco Beltrão (Paraná, Brasil). *Anuário Do Instituto de Geociências - UFRJ*, 40(1), 102–114.

Castro, K. B. de. (2013). *Avaliação do modelo swat na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada*. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, DF. 122p.

Cherem, L. F. S. (2008). “Análise Morfométrica da Bacia do Alto Rio das Velhas – MG”.

Universidade Federal de Minas Gerais.

Christofolletti, A. (1980). *Geomorfologia*. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher.

Christofolletti, A. (1999). *Modelagem de sistemas ambientais*. 1 ed. org. São Paulo: Edgard Blucher.

CNRH. Resolução no. 32, de 15 de Outubro de 2003., 2003 Ministério do Meio Ambiente: Conselho Nacional de Recursos Hídricos (2003). Brasília - DF, Brasil. Disponível em: <[http://www.cnrh.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=14](http://www.cnrh.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=14)> Acesso: 16 out. de 2018.

Codeplan. (2017). *Densidades Urbanas Nas Regiões Administrativas Do Distrito Federal*. Distrito Federal: Companhia de Planejamento do Distrito Federal.

Comissão Europeia. (2012). *Orientações sobre as melhores práticas para limitar, atenuar ou compensar a impermeabilização dos solos*. Luxemburgo: Serviço das Publicações da União Europeia.

EMBRAPA. (1979). *Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos*. Rio de Janeiro: Reunião Técnica de Levantamento de Solos.

Fernandes, M. R. (2014). *Parâmetros básicos de bacias hidrográficas*. Belo Horizonte: EMATER - MG.

Ferrigo, S. (2014). *Análise de Consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática - Estudo de caso da bacia do lado Descoberto - DF*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-159/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 164p.

Fisrwg. (1998). *Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices*. Bridges. Federal Interagency Stream Restoration Working Group.

Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(4), 1211–1250.

- Gouveia, N. (2012). Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. *Ciencia & Saude Coletiva*, 17(6), 1503–1510.
- IBGE. (2007). *Manual técnico de pedologia*. Ibge (2ed.). Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- IBGE. (2018). Estimativas da população residente no Brasil e unidades da Federação com data de referência em 1º de julho de 2018 Brasil.
- Kannan, N., S. M. White, F. Worrall, e M. J. Whelan. (2007). “Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modelling in SWAT-2000”. *Journal of Hydrology* 332(3–4): 456–66.
- Legates, D., e G. McCabe. (1999). “Evaluating the use of goodness-of-fit Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation”. *Water Resources Research* 35(1): 233–41.
- Lelis, T. A., Calijuri, M. L., da Fonseca Santiago, A., de Lima, D. C., & de Oliveira Rocha, E. (2012). “Análise de Sensibilidade e Calibração do Modelo Swat Aplicado em Bacia Hidrográfica da Região Sudeste do Brasil”. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 36(2), 623–634.
- Lino, J. de L., Corseuil, C. W., Kobiyama, M., Malutta, S., Uda, P. K., Bortolotto, N. L., & Santos, I. dos. (2009). “Análise Da Vazão Da Bacia Hidrográfica Do Rio Preto Com O Modelo Swat” . *Assessment*, (November), 1–20.
- Mansor, M. T. C., Filho, J. T., & Roston, D. M. (2006). “Avaliação preliminar das cargas difusas de origem rural, em uma sub-bacia do Rio Jaguari, SP”. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10(3), 715–723.
- Martini, L. C. P., & Trentini, É. C. (2011). “Agricultura em zonas ripárias do sul do Brasil: conflitos de uso da terra e impactos nos recursos hídricos”. *Revista Sociedade e Estado*, 26(3), 613–630.
- Miranda, R. A. C. de, Oliveira, M. V. S. de, & Silva, D. F. da. (2010). “Ciclo hidrológico planetário: abordagens e conceitos”. *Geo UERJ*, 1(21), 109–119.
- MMA. (2016). Florestas, Desmatamento e Mudança do Clima. Disponível em: <



<http://redd.mma.gov.br/pt/o-que-e-redd> > Acesso : 24 out. de 2018.

- Moriasi, D. N. et al. (2007). “Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations”. *Transactions of the ASABE* 50(3): 885–900. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.532.2506&rep=rep1&type=pdf> (13 de novembro de 2018).
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, R. L. Bingner, Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). “Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations”. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
- Mucelin, C. A., & Bellini, M. (2008, June). “Lixo e impactos ambientais perceptíveis no ecossistema urbano”. *Sociedade & Natureza*, 20(1), 111–124.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2009). Soil and Water Assessment Tool Version 2009. *Texas Water Resources Institute*, 543, 647p.
- Nunes, G., (2016). *Aplicação do modelo SWAT no estudo hidrológico e de qualidade de água da Bacia Hidrográfica do lago Paranoá - DF*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM - 185/2016, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.
- Ortega, D. J. P. (2011). *Avaliação dos Efeitos das Atividades Antrópicas na Bacia Hidrográfica do Ipê, Município de Ilha Solteira - SP*. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira. 151p.
- Porto, M. F. A., & Porto, R. L. L. (2008). “Gestão de bacias hidrográficas”. *Estudos Avançados*, 22(63), 43–60.
- Rempel, C., Eckhardt, R. R., Markus, E., Cyrne, C. C. da S., & Périco, E. (2015). “Urbanidade, Produção Agrícola E Conservação Ambiental – Estudo De Caso Na Região Do Vale Do Taquari/Rs/Brasil”. *Holos*, 1, 87.
- Rennó, C. D., e Soares, J. V. (2000). “Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental”. 263–268.
- Rocha, Ricardo Monteiro et al. (2014). “Caracterização morfométrica da sub-bacia do rio

- Poxim-Açu, Sergipe, Brasil”. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science* 9(2): 17–35.
- Rouholahnejad, E. et al. (2012). “A parallelization framework for calibration of hydrological models”. *Environmental Modelling and Software* 31: 28–36.
- Salles, L. de A. (2012). *Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pipiripau*. Dissertação de Mestrado, Publicação PPG EFL. DM-172/2012, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 130p.
- Santos, L. L. dos. (2009). “Modelos Hidráulicos-Hidrológicos: Conceitos e Aplicações.” *Revista Brasileira de Geografia Física*, 2(3), 01-19.
- Santos, M. de O. R. M. dos. (2002). *O Impacto da Cobrança pelo Uso da Água no Comportamento do Usuário*. Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro. 231p.
- Santos, T. O. dos, Andrade Filho, V. S. de, Rocha, V. M., & Menezes, J. de S. (2017). “Os impactos do desmatamento e queimadas de origem antrópica sobre o clima da Amazônia brasileira: um estudo de revisão”. *Revista Geográfica Acadêmica*, 11(2), 157–181.
- Silva, B. A. W., Azevedo, M. M. de, & Matos, J. S. (2006). “Gestão Ambiental de Bacias Hidrográficas Urbanas.” *Revista VeraCidade*, (1), 1–7.
- Silva, B. F. (2015). “Análise Dos Parâmetros Do Modelo Hidrossedimentológico Swat Na Bacia Hidrográfica Do Córrego Samambaia, Goiânia-Go”. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil (EEC).
- Silva, F. D. M. di (2016). Aplicabilidade do modelo Swat na simulação de vazão em bacia hidrográfica do Cerrado utilizando valores de parâmetros regionalizados. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Geografia, Universidade de Brasília, 2016, 90 p.
- Silva, L. P. e. (2007). *Modelagem e geoprocessamento na identificação de áreas com risco de inundação e erosão na bacia do Rio Cuiá*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana). UFPB/CT, João Pessoa. 114p.

- Souza, M. M. de. (2012). *Carga de poluição difusa em bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos*. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 182p.
- Souza, R.M., Santos, I.; Kobiyama, M. (2009). “O modelo SWAT como ferramenta para gestão de recursos hídricos: avaliação de vazões de outorga na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro”. *XIII Simposio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 1-14.
- Strahler, A. N. (1957). “Quantitative analysis of watershed geomorphology”. *Transactions, American Geophysical Union* 38(6): 913.
- Teodoro, V. L. I., Teixeira, D., Costa, D. J. L., e Fuller, B. B.(2017). “O Conceito de Bacia Hidrográfica e a Importância da Caracterização Morfométrica para o Entendimento da Dinâmica Ambiental Local”. *Revista UNIARA*: 137–57.
- Tucci, C. E. M. (2002). *Hidrologia: Ciência e Aplicação* (3 ed.). Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH. 943p.
- Tucci, C. E. M. (2005). *Modelos hidrológicos* (2 ed.). Porto Alegre: Editora da UFRGS. 678p.
- Tucci, C. E. M. (2010a). Modelos hidrológicos distribuídos. Disponível em: <<http://rhama.com.br/blog/index.php/sem-categoria/modelos-hidrologicos-distribuidos/>> Acesso: 19 de out. de 2018.
- Tucci, C. E. M. (2010b). Usos dos modelos hidrológicos. Disponível em: <<http://rhama.com.br/blog/index.php/sem-categoria/usuarios-dos-modelos-hidrologicos/>> Acesso: 29 de out. de 2018.
- Tucci, C. E. M., Hespanhol, I., & Netto, O. de M. C. (2001). *Gestão da Água no Brasil*. Brasília: UNESCO. 192p.
- Tundisi, J. G. (2003). “Ciclo hidrológico e Gerenciamento Integrado”. *Gestão Das Águas*, 55(4), 31–33.
- Uberti, A. A. A., Bacic, I. L. Z., Panichi, J. A.V., Laus Neto, J. A., Moser, J. M., Pundek, M., Carrião, S.L. (1991). Metodologia para classificação da aptidão de uso das terras do Estado de Santa Catarina. Florianópolis: Empasc: Emater (SC), 119p.

Villela, S. M., e Mattos, A. (1975). *Hidrologia Aplicada*. São Paulo: McGRAWHill do Brasil.

Von Sperling, M. (2007). *Estudos e modelagem da qualidade da água de rios*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais. 588p.