

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

**APLICAÇÃO DO MODELO QSWAT NA SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA  
DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO CHAPADINHA/DF**

**MARIANNA SILVA DA COSTA**

**ORIENTADOR: RICARDO TEZINI MINOTI**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**BRASÍLIA / DF, JULHO DE 2018**

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

**APLICAÇÃO DO MODELO QSWAT NA SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA  
DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO CHAPADINHA/DF**

**MARIANNA SILVA DA COSTA**

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)**

---

**CONCEIÇÃO DE MARIA DE ALBUQUERQUE ALVES, PhD (ENC-UnB)**

**(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**GILLIARD NUNES, MsC. – PTARH/UnB**

**(EXAMINADOR EXTERNO)**

**BRASÍLIA/DF, JULHO DE 2018.**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

COSTA, MARIANNA SILVA DA

Aplicação do modelo QSWAT na simulação hidrológica da bacia hidrográfica do córrego Chapadinha/DF [Distrito Federal] 2018.

ix, 57 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2018)

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

1. Modelagem Hidrológica

2. QSWAT

3. Modelo SWAT

4. Bacia do Córrego Chapadinha

I. ENC/FT/UnB

2. Título II (Série)

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

COSTA, M.S. (2018). Aplicação do modelo QSWAT na simulação hidrológica da bacia hidrográfica do córrego Chapadinha/DF. Monografia de Projeto Final, Publicação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 57 p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Marianna Silva da Costa

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Aplicação do modelo QSWAT na simulação hidrológica da bacia hidrográfica do córrego Chapadinha/DF.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2018.

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.

---

Marianna Silva da Costa  
Setor de Indústrias, Lotes 1700 a 1780,  
Residencial Gamaggiore T 3 apt. 1806  
72445-010 – Gama/DF - Brasília

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida e por me proporcionar a oportunidade e o auxílio necessário para chegar até aqui.

À toda minha gigante família, que com tanto amor e carinho me fizeram ser quem sou hoje. Em especial à minha mãe pelo amor, compreensão, paciência e apoio incondicional; e aos meus irmãos, Diego e Anna Terra, por todo suporte, incentivo e amor durante os longos anos de graduação e por me presentear, durante esse período, com o maior amor do mundo: meus sobrinhos. Vocês são minha base e essa conquista é de vocês e por vocês!

Ao Hildoglas, por tamanho amor, companheirismo, apoio, incentivo e compreensão; um dos melhores presentes que a graduação me proporcionou. E à toda família Botelho Chaves, que ganhei de presente e que me acolheu como membro integrante. Agradeço por tanto suporte, amor e aprendizado.

Aos meus amigos de infância Naiara Andrade, Bruno Vilas Boas, Carolina Felipe, Ananda Ellen, Jéssyca Patrícia, Juliana Régis e Gabriel Macedo, por infinita parceria, amizade, amor e apoio incondicional. Cada um tem papel fundamental no meu crescimento pessoal e profissional.

Aos grandes amigos do AOA, que conquistei graças à UnB. Em especial ao Romário, pela grande amizade, generosidade e apoio em todos os momentos, um grande exemplo de ser humano para mim; e à Taynara, pela companhia, auxílio e amizade sincera. Agradeço também ao Matheus Fatel, pela amizade conquistada ao longo dos anos de graduação e, que hoje, me ajuda a realizar sonhos. E à Francielly, pela eterna amizade e ajuda em todos os momentos.

Ao meu orientador e professor, Ricardo Minotti, pela disponibilidade, apoio, incentivo, paciência e tanto conhecimento compartilhado durante o período de realização do presente trabalho. Agradeço também ao Gilliard Nunes, por tamanha ajuda e auxílio durante toda a elaboração deste projeto.

À todos os professores do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental pelo conhecimento e experiências compartilhados durante toda a graduação, determinantes na formação de todos os alunos. Em especial a professora Conceição, pela participação na banca avaliadora e por todas as contribuições.

Por fim, agradeço à todas as pessoas que fizeram parte dessa jornada, me ajudando de alguma forma. Muita gratidão!

## RESUMO

As bacias hidrográficas são caracterizadas por uma diversidade de processos dinâmicos e complexos, diretamente influenciados pela fase terrestre do ciclo hidrológico. O Distrito Federal recentemente passou pela maior crise hídrica de sua história e, por este motivo, é necessário que se elabore estudos com este enfoque. Com o intuito de entender as alterações no comportamento das bacias, é de suma importância a obtenção de maior conhecimento acerca dos processos hidrológicos nas suas bacias afluentes, gerando estimativas de vazão no exutório quando submetidas a diferentes condições. Dessa forma, a utilização da modelagem hidrológica como enfoque na análise e tratamento da informação tem sido cada vez mais recorrente. O presente trabalho teve como objetivo a realização da simulação hidrológica utilizando o modelo SWAT, como forma de obtenção de conhecimento acerca da bacia do córrego Chapadinha/DF. A metodologia adotada baseia-se na aplicação do modelo hidrológico SWAT com a interface QGIS, para verificação de sua aplicabilidade; seguida da simulação, calibração, verificação e geração de cenários com diferentes usos e ocupações do solo. Os resultados das simulações realizadas com a interface QSWAT foram utilizados na análise de sensibilidade, que estabeleceu os parâmetros SOL\_K, SOL\_BD, SOL\_AWC, CN2 e GW\_DELAY como os mais sensíveis para o modelo da bacia do córrego Chapadinha. O resultado mais significativo na calibração do modelo, realizada no período de 2000 a 2010, foi obtido com o valor do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,2, considerado insatisfatório. Na verificação, para o período de 2011 a 2016, obteve-se um NSE de -0,03, resultado também considerado insatisfatório de acordo com Moriasi *et. al* (2007). O motivo para os resultados terem sido obtidos abaixo do esperado se deve à dificuldade do modelo de representar alguns parâmetros como, por exemplo, o que representa a recarga do aquífero. Em relação aos cenários, o cenário preservado apresentou resultado mais distinto acerca das variáveis FLOW\_IN e FLOW\_OUT, por ser o ambiente preservado. A condição atual e o cenário antrópico, por serem caracterizados por média intensidade e alta intensidade de atividade antrópica, respectivamente, apresentaram resultados bastante similares. Já em relação à variável EVAP, as três situações apresentaram o comportamento consideravelmente igualitário. Portanto, pode-se concluir a partir do presente trabalho que o uso do modelo SWAT na interface do QGIS é totalmente viável. Além disso, foi possível inferir a partir deste estudo que os processos de uso e ocupação do solo estão intimamente ligados ao balanço hídrico, o que estabelece uma grande importância do controle desse uso para a preservação do meio, bem como para a qualidade do abastecimento de água para consumo humano, no caso do corpo hídrico ser utilizado para devido fim, como é o caso da bacia de estudo.

Palavras-Chaves: Modelagem hidrológica; QSWAT; Modelo SWAT; Bacia do Córrego Chapadinha.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES .....	x
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	4
2.2 OBJETIVO GERAL.....	4
2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1. CICLO HIDROLÓGICO E BACIA HIDROGRÁFICA.....	5
3.2. PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS.....	7
3.2.1 Relevo .....	8
3.2.2 Classes de Solos .....	9
3.2.3 Usos do Solo .....	9
3.3. POLÍTICA E GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL .....	10
3.4. PROBLEMÁTICA DOS RECURSOS HÍDRICOS .....	12
3.5. MODELAGEM E SIMULAÇÃO .....	16
3.5.1 Utilização da modelagem .....	16
3.5.2 Modelagem hidrológica.....	17
3.5.3 Modelo SWAT .....	20
3.5.3.1 Equacionamentos básicos do modelo SWAT .....	22
3.5.3.2 SWAT-CUP.....	23
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	26
4.2 APLICAÇÃO DO MODELO SWAT - INTERFACE QSWAT .....	31
4.2.1 Estruturação da base de dados .....	31
4.2.2 Simulação Inicial .....	32
4.2.3 – Análise de sensibilidade .....	33
4.2.4 – Calibração e Verificação .....	35
4.3 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA EM DIFERENTES CENÁRIOS DE USO DO SOLO .....	35
5. RESULTADOS.....	37

<b>5.1 - MODELAGEM COM O SWAT .....</b>	<b>37</b>
<b>5.1.1 - Sub-bacias e HRU's .....</b>	<b>37</b>
<b>5.1.2 – Simulação Inicial .....</b>	<b>38</b>
<b>5.1.3 - Análise de sensibilidade.....</b>	<b>39</b>
<b>5.1.4 - Calibração e Verificação .....</b>	<b>41</b>
<b>5.1.5. Simulação hidrológica de cenários.....</b>	<b>45</b>
<b>5.1.5.1 Cenário Preservado.....</b>	<b>45</b>
<b>5.1.5.2 Condição atual.....</b>	<b>46</b>
<b>5.1.5.3 Cenário Atrópico.....</b>	<b>46</b>
<b>5.1.5.4 Resultados dos Cenários .....</b>	<b>47</b>
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>50</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>52</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros utilizados na Análise de Sensibilidade e respectivos intervalos mínimo e máximo de variação. (adaptado: Ferrigo,2014).....	33
Tabela 2 - Classificação da performance dos coeficientes para.....	34
Tabela 3 - Parâmetros selecionados para a calibração e seus respectivos valores de máximo e mínimo .....	35
Tabela 4 - Valores de mínimo e máximo para cada parâmetro utilizados na calibração.....	42
Tabela 5 -Valores de mínimo e máximo para cada parâmetro utilizados na calibração 3 .....	43



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de uma bacia hidrográfica mostrando os divisores de água, as sub-bacias e a drenagem principal (SANTANA, 2003).....	7
Figura 2 -Matriz institucional do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (ANA, 2011b).....	12
Figura 3 - Bacias hidrográficas do Distrito Federal (ADASA, 2011).....	14
Figura 4 - Região do Distrito Federal (ANA, 2010). ....	14
Figura 5 - Local de depósito de lixo próximo ao córrego Chapadinha (Costa, 2015). ....	16
Figura 6 - Relação do processo de modelagem com a gestão de Recursos Hídricos (UM/ECE 2000).....	18
Figura 7 - Processo de modelagem voltado para a gestão de recursos hídricos (Tucci, 2005). .....	19
Figura 8 - Fluxograma de processamento do modelo SWAT (Adriolo et. al., 2008).....	22
Figura 9 - Fluxograma da metodologia de trabalho .....	25
Figura 10 - Localização geográfica da bacia hidrográfica do lago Descoberto. ....	26
Figura 11 - Sub-bacias localizadas ao redor do lago Descoberto (Minoti, 2013).....	27
Figura 12 - Precipitação média anual das estações próximas ao lago Descoberto (1971-2013) (Ferrigo, 2014). ....	28
Figura 13 - Tipos de solos presentes próximo à bacia do lago Descoberto (Fonte: Ferrigo, 2014).....	29
Figura 14 - Mapa de relevo das bacias próximas ao lago Descoberto (Ferrigo, 2014).....	30
Figura 15 - Mapa de uso e ocupação do solo de bacias próximas ao lago Descoberto (Ferrigo, 2014).....	30
Figura 16 - Bacia Hidrográfica do Córrego Chapadinha/DF .....	37
Figura 17 - HRUs e Sub-bacias da bacia hidrográfica do Córrego Chapadinha.....	38
Figura 18 - Hidrograma de dados observados e simulados sem calibração da Bacia Hidrográfica do Córrego Chapadinha .....	38
Figura 19 - Hidrograma de dados observados e simulados na calibração 1 da Bacia Hidrográfica do Córrego Chapadinha .....	40
Figura 20 - Análise de sensibilidade global da calibração inicial .....	40
Figura 21 - Hidrograma de dados observados e simulados na calibração 2 da Bacia Hidrográfica do Córrego Chapadinha .....	42
Figura 22 - Hidrograma de dados observados e simulados na calibração 3 da Bacia Hidrográfica do Córrego Chapadinha .....	43
Figura 23 - Hidrograma de dados de vazão da bacia hidrográfica do Córrego Chapadinha....	44
Figura 24 - Hidrograma de dados observados e simulados na etapa de verificação da Bacia Hidrográfica do Córrego Chapadinha .....	44
Figura 25 - Bacia Hidrográfica do Córrego Chapadinha às vistas do Cenário Preservado ....	45
Figura 26 - Bacia Hidrográfica do Córrego Chapadinha às vistas do Cenário Antrópico .....	47
Figura 27 - Comparação dos resultados de FLOW_OUTcms das três situações.....	48
Figura 28 - Comparação dos resultados de EVAPcms das três situações.....	49

## **LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES**

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

ANA – Agência Nacional de Águas

APA – Área de Proteção Ambiental

BHCC – Bacia Hidrográfica Córrego Chapadinha

BHLD – Bacia Hidrográfica do Lago Descoberto

CAESB - Companhia de Saneamento do Distrito Federal

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DF – Distrito Federal

EMATER – Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Distrito Federal

GLUE – Generalized Likelihood Uncertainty Estimation

HRU – Unidade de Resposta Hidrológica

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

MCMC – Markov Chain Monte Carlo

MDE – Modelo Digital de Elevação

MMA – Ministério do Meio Ambiente

RIDE – Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal

SBCC – Sub-Bacia Córrego Chapadinha

SIAGUA – Sinopse do Abastecimento de Água do Distrito Federal

SINGREH – Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SRHU/MMA – Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano do Ministério do Meio Ambiente

SUFI-2 – Sequential Uncertainty Fitting

SWAT – Soil and Water Assessment Tool

SWAT-CUP – SWAT Calibration and Uncertainty Programs

ParaSol – Parameter Solution

PNRH – Política Nacional dos Recursos Hídricos

PSO – Particle Swarm Optimization

QGIS – Quantum Geographic Information System

QSWAT – Interface do modelo SWAT no QGIS

TERRACAP – Agência de Desenvolvimento do Distrito Federal

# 1. INTRODUÇÃO

A água é um dos principais recursos naturais para a manutenção da dinâmica da natureza, sendo determinante para a conservação aos ciclos biogeoquímicos e a sustentação da vida. A questão acerca da sua disponibilidade tem se tornado um assunto cada vez mais notório nos diversos campos de conhecimento, em debates populares e na elaboração de políticas públicas. Isso se deve aos recentes episódios de crises hídricas em diferentes localidades do país e do mundo, advindos do crescimento da população e da intensificação das atividades humanas, que exige a utilização de grande quantidade de recursos para que se tenha uma constância no desenvolvimento econômico e social.

As bacias hidrográficas são caracterizadas por uma diversidade de processos dinâmicos e complexos, que podem ser alterados por fatores externos como atividades antrópicas. Essas alterações podem ocorrer por fontes pontuais, como poluição por lançamento de efluentes, ou por fontes difusas, como as advindas de agricultura e/ou expansão urbana. Nesse sentido, uma das vertentes do planejamento e gestão ambiental tem sido o manejo integrado de bacias hidrográficas, que visa compatibilizar o uso das águas com a preservação ambiental, de forma a minimizar os impactos negativos.

No Brasil, a lei 9.433/97 que institui Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH), decretou em seu artigo 1º, inciso IV, que a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas. De outro modo, a lei estabelece que a estruturação de um processo de gestão deve ocorrer de tal forma que, frente ao surgimento de conflitos relacionados aos usos múltiplos dos recursos hídricos, a administração deve advir de forma suficientemente satisfatória. Nesse sentido, esta lei foi o marco estruturante da gestão das águas, sendo determinante na sua conservação, por meio da abordagem de uma série de medidas necessárias para tal.

Os principais usos da água nas atividades humanas relacionam-se ao abastecimento público, irrigação, geração de energia, pesca, navegação e recreação. Por esse motivo, a PNRH tem o papel chave na gestão integrada dos recursos hídricos. Para que o planejamento e o gerenciamento dos corpos hídricos sejam realizados da forma mais adequada o possível, é determinante que se obtenha a maior quantidade de informação acerca desses corpos hídricos, já que o conhecimento da alteração quantitativa e qualitativa da água na área é preponderante para assegurar a saúde da população local, controlando os processos poluidores por meio de ações preventivas e permanentes.

Dessa forma, no que se refere à ampliação do conhecimento acerca dos processos que ocorrem nas bacias hidrográficas, a utilização da modelagem hidrológica como enfoque na análise e tratamento da informação tem sido cada vez mais recorrente. Isso se deve a grande quantidade de resultados gerados relacionados aos aspectos hidrossedimentológicos, bem como a possibilidade de geração de cenários, que podem ser utilizados como ferramenta de auxílio à gestão de recursos hídricos.

No contexto da atual situação da água no Distrito Federal, é necessário que se elaborem estudos com este enfoque. Elementos climáticos da região estão caracterizados, nos últimos anos, por índices mais baixos de precipitação e altas temperaturas, associado ao crescimento intensivo da população local, gerando alterações consideráveis nas características das bacias hidrográficas. Isso se deu com ações de assoreamento de mananciais e nascentes, captações clandestinas e insuficiência de ações governamentais como obras de melhoria para o sistema de abastecimento. Esta série de agentes foi responsável por suscitar a mais intensa crise hídrica do DF, com os níveis dos principais reservatórios utilizados para abastecimento humano estarem em estado crítico.

O reservatório do Rio Descoberto é responsável por atender mais da metade da demanda total de abastecimento de água para a população do Distrito Federal. Há pouco tempo, o nível do seu reservatório encontrava-se em valores nunca constatados anteriormente, o que afetou à todos que dependiam do seu abastecimento. É de extrema importância que se realizem estudos em toda a área de influência deste lago, tendo em vista sua importância no quesito de abastecimento de água.

A área de estudo do presente trabalho é a Bacia Hidrográfica do Córrego Chapadinha, afluente do Lago Descoberto. De acordo com Costa (2015), a área de influência desta bacia é composta majoritariamente por ocupação urbana e, por este motivo, existem diversos conflitos de interesse na região. Costa (2015), em seu estudo acerca da região, apresentou impactos negativos causados por conflitos sociais na localidade, visto que o córrego serve de abastecimento para consumo humano, bem como para irrigação de agricultura. A depender do nível de impacto no curso do córrego, as alterações podem influenciar quantitativamente e qualitativamente o reservatório do Rio Descoberto.

Considerando a amplitude da responsabilidade que este reservatório tem para o abastecimento de água para consumo humano, torna-se imprescindível a realização de

monitoramento das possíveis alterações físicas, bem como de conflitos sociais, de bacias afluentes do reservatório, já que estes tributários influenciam em sua vazão final.

Com base no exposto, o presente trabalho teve como objetivo a realização da simulação hidrológica por meio do modelo SWAT como forma de obtenção de conhecimento acerca de uma das bacias hidrográficas afluentes ao lago descoberto, a bacia do córrego Chapadinha/DF. Para isso, o desenvolvimento do trabalho se deu com a realização de testes de aplicação do modelo hidrológico SWAT com a interface QGIS para verificação de sua aplicabilidade em bacia hidrográfica localizada na região do Distrito Federal. Em seguida, foi feita a simulação com dados disponibilizados pela CAESB e por Ferrigo (2014), a calibração e a geração de cenários com diferentes usos e ocupação do solo.

Dessa forma, foi possível obter maior conhecimento acerca do uso de um modelo de bacias hidrográficas e como ele auxilia no entendimento dos processos de uma bacia hidrográfica.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo do presente trabalho foi realizar a simulação hidrológica por meio do modelo SWAT como forma de obtenção de conhecimento acerca de uma das bacias hidrográficas afluentes ao lago descoberto, a bacia do Córrego Chapadinha/DF.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar a modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do córrego Chapadinha/DF com o uso do modelo SWAT, interface QSWAT;
- Realizar a análise de sensibilidade, calibração e verificação;
- Gerar cenários a partir da simulação hidrológica da bacia hidrográfica do Córrego Chapadinha com diferentes usos do solo.

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

#### **3.1. CICLO HIDROLÓGICO E BACIA HIDROGRÁFICA**

O ciclo hidrológico, ou ciclo da água, é o movimento contínuo da água presente nos oceanos, continentes (superfície, solo e rocha) e na atmosfera. Esse movimento é alimentado pela força da gravidade e pela energia do Sol, que provocam a evaporação das águas dos oceanos e dos continentes (MMA, 2017). De acordo com Tucci (2005), o ciclo hidrológico, a nível global, é um fenômeno de circulação fechada de água entre a superfície da Terra e a atmosfera, impulsionado principalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre. Em contrapartida, a medida que a área de abrangência diminui, ou seja, a nível local, este ciclo é classificado como ciclo aberto.

Embora exista essa diferença, a relação entre a atmosfera e a superfície terrestre ocorrem da mesma forma a qualquer nível, podendo ser em duas direções: superfície-atmosfera e atmosfera-superfície. No primeiro caso, o fluxo ocorre principalmente em forma de vapor, uma vez que a transferência da água é feita por evaporação direta, por transpiração dos seres vivos (tanto plantas quanto animais) e por sublimação, ou seja, a passagem direta da água no estado sólido para o estado de vapor. A evaporação direta ocorre mais abundantemente nos oceanos, visto que estes estão sob grande influência da radiação solar. No segundo caso o fluxo ocorre em qualquer estado físico, sendo mais representativo na forma de precipitação, sendo possível incidir na forma de chuva, granizo, orvalho e neve.

Com a ocorrência da precipitação, parte do volume de água evapora e a outra parcela pode percorrer diferentes caminhos ao entrar em contato com o solo. Um dos possíveis rumos é a sua interceptação por meio da vegetação, sofrendo evaporação posteriormente. Se a quantidade precipitada for grande o suficiente para entrar em contato com o solo, a água sofre infiltração e percolação, permeando o solo e/ou rochas até que o volume seja maior que a capacidade de absorção do solo, causando a sua saturação.

A partir desse processo e sob influência da força gravitacional, é possível que haja a formação de aquíferos na camada saturada do solo. A medida que o solo se torna saturado, o residual de água gera o fenômeno denominado de escoamento, podendo ser classificado como subterrâneo e/ou superficial. O escoamento subterrâneo caracteriza a movimentação das águas subterrâneas e, seguindo a lógica, o superficial é o fluxo da água na camada externa do solo. De acordo com Tucci (1993), essa água escoada geralmente segue a menor altitude da declividade do relevo, fazendo com que seja gerada uma microrrede de drenagem que



converge para um curso de água de rios e arroios. Toda a rede formada pela convergência dos escoamentos da água de precipitação é induzida a um ponto final, denominado de exutório. Toda essa área de captação natural de água é o que conceitua a bacia hidrográfica.

A Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, incorpora princípios e normas para a gestão de recursos hídricos adotando a definição de bacias hidrográficas como unidade de estudo e gestão (Teodoro et. al., 2007). Yassuda (1993) traz o conceito de bacia hidrográfica como o palco unitário de interação das águas com o meio físico, o meio biótico e o meio social, econômico e cultural. Já Lima e Zakia (2000), conceituam bacias hidrográficas como sistemas abertos que recebem energia através de agentes climáticos e perdem energia através do deflúvio, podendo ser descritas em termos de variáveis interdependentes, que oscilam em torno de um padrão, e, desta forma, mesmo quando perturbadas por ações antrópicas, encontram-se em equilíbrio dinâmico.

Segundo Tucci (1993) e Porto (2008), a bacia hidrográfica 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, considerando-se como perdas intermediárias os volumes evaporados, transpirados e infiltrados. A bacia hidrográfica pode ser então considerada um ente sistêmico, onde se realizam os balanços de entrada proveniente da chuva e saída de água através do exutório, permitindo que sejam delineadas bacias e sub-bacias, cuja interconexão se dá pelos sistemas hídricos.

A subdivisão de uma bacia hidrográfica de maior ordem em microbacias permite a pontualização de problemas difusos, tornando mais fácil a identificação de focos de deterioração dos recursos naturais, dos processos de degradação ambiental instalados e do grau de comprometimento da produção existente (Alves Sobrinho et al., 2010). Portanto, as sub-bacias são áreas de drenagem dos tributários do curso d'água principal (Teodoro et. al., 2007). Dessa forma, é possível observar na Figura 1 alguns componentes da bacia hidrográfica, como os tributários e a rede de drenagem.

Pode-se perceber que os subafluentes e afluentes formados a partir do escoamento superficial gerado pela precipitação compõem o rio principal. Esses tributários podem ser considerados como sub-bacias hidrográficas, isso dependerá apenas da área de interesse.



Figura 1 - Ilustração de uma bacia hidrográfica mostrando os divisores de água, as sub-bacias e a drenagem principal (SANTANA, 2003).

Cada um desses afluentes que desaguam no curso principal formam a rede hidrográfica e a área na qual essa rede está presente é denominada de Bacia Hidrográfica. Esse sistema é considerado uma parte fundamental do ciclo hidrológico, onde seu comportamento é considerado como ciclo aberto, já que a análise é feita localmente.

Do ponto de vista da hidrologia, a classificação de bacias hidrográficas é feita considerando os efeitos de certos fatores dominantes na geração do deflúvio, tendo as microbacias como características distintas uma grande sensibilidade tanto às chuvas de alta intensidade (curta duração), como também ao fator uso do solo (cobertura vegetal), sendo assim, as alterações na quantidade e qualidade da água do deflúvio, em função de chuvas intensas e ou em função de mudanças no solo, são detectadas com mais sensibilidade nas microbacias do que nas grandes bacias (Teodoro et.al, 2007).

Levando em consideração que é sobre o território definido como bacia hidrográfica que se desenvolvem as atividades humanas (Porto, 2008), é possível afirmar que o conhecimento acerca dos processos hidrossedimentológicos que ocorrem na bacia hidrográfica aliada a gestão dos recursos hídricos é essencial para que se tenha um desenvolvimento adequado desse sistema integrado.

### **3.2 PROCESSOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS**

De acordo com Carvalho (1994), sedimentologia é o estudo de sedimentos, levando em consideração os processos hidroclimatológicos, com foco principalmente na relação água-sedimento. Seguindo esta linha, os processos hidrossedimentológicos são

caracterizados pela sedimentologia com o envolvimento restrito aos corpos d'água e ao processo de erosão, que, conseqüentemente, leva entrada de sedimentos à bacia.

Esse processo, quando enfatizado ao estudo relacionado à vazão de entrada e saída bacia, a parte de maior importância se deve à fase terrestre. A referida fase depende, principalmente, de características relacionadas ao relevo, ao tipo de solo e ao uso e ocupação do terreno.

### **3.2.1 Relevo**

A importância do relevo no entendimento dos processos de uma bacia hidrográfica se deve, principalmente, à influência da declividade em fenômenos como erosão, deslocamento de partículas e transporte de sedimentos por escoamento a partir da ocorrência da precipitação.

Carvalho (1994) define erosão como o processo de separação e remoção da partícula da rocha e do solo pela ação da água, do vento ou por outro efeito, sendo que diversos fenômenos têm ação preponderante nesse processo. O autor traz ainda que as gotas de chuva caindo em terrenos inclinados desagregam as partículas, provocando o deslocamento e removendo a camada superficial.

Em uma localidade a qual o terreno se desenvolve no sentido plano, a velocidade de escoamento será menor e, por este motivo, a dimensão em que ocorrerá erosão e o transporte de sedimentos será pequena, acarretando menor impacto no corpo d'água. Em contrapartida, a medida em que a inclinação do relevo aumenta, podendo ser tão significativa a ponto de gerar ravinas, a velocidade de escoamento será intensificada, tornando essa região mais propensa aos fenômenos de erosão e, conseqüentemente, ao transporte de sedimentos que terão como receptores os corpos d'água, causando assoreamento.

A erosão torna-se mais intensa a medida que se diminui a proteção natural do solo, isto é, a vegetação. Estando a partícula solta, é deslocada de sua posição, podendo ser transportada pelas enxurradas para o curso d'água (Carvalho, 1994).

Torna-se indispensável a obtenção do conhecimento das características do solo, para que se saiba a capacidade de infiltração e, com isso, a geração de escoamento que é crucial no processo de transporte de sedimentos. Além disso, o uso do solo é preponderante, já que quanto menor quantidade de vegetação nativa a bacia possuir, maior a ocorrência dos fenômenos de erosão e transporte de sedimentos.

### **3.2.2 Classes de Solos**

O conhecimento das propriedades do solo é fator determinante para o uso adequado da terra, bem como para o reconhecimento de possíveis processos de degradação ambiental e para auxiliar na escolha entre as medidas preventivas e corretivas possíveis. Nesse sentido, é essencial para o desenvolvimento de tais atividades a elaboração de um documento contendo todas as informações necessárias para a resolução de questões diretamente relacionadas ao solo, tal documentação denominada de mapa de solos.

Para a construção de um mapa de solos, é necessária a identificação dos tipos existentes na área de estudo. A classificação dos solos se deu início por volta da década de 1960 e, a partir disso, foi possível identificar as características do solo brasileiro e ordená-las em classes. De acordo com Lepsch (2002), no Brasil há, principalmente, solos avermelhados e/ou amarelados, desenvolvidos sob uma influência marcante e prolongada de um ambiente tropical úmido.

O Planalto Central, caracterizado pela vegetação arbustiva do Cerrado, é contemplado em sua maioria por Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Amarelo, contudo, além disso, há a presença de Neossolos e Cambissolos.

Os Latossolos na região central do Brasil são ácidos e pobre em nutrientes, que são as principais causas do aparecimento do cerrado como vegetação natural, ao invés de floresta. Contudo, as maiores partes dos Latossolos dessas áreas podem ser utilizadas para a agricultura intensiva, desde que se faça a neutralização da acidez, que é prejudicial à plantação, com a aplicação de calcário e que se adicionem quantidades adequadas de nutrientes, com a aplicação de fertilizantes. (Lepsch, 2002).

O tipo de solo influencia no balanço hídrico de forma que, se o solo for mais arenoso, a água tem a capacidade de infiltrar mais, porém se o solo for argiloso, a infiltração é menor. Sendo assim, essa é uma informação de grande importância.

### **3.2.3 Usos do Solo**

O uso e a ocupação dos solos exercem influência marcante no escoamento superficial e aporte de sedimentos no leito dos mananciais, podendo alterar a qualidade e a disponibilidade da água (Vanzela et. al., 2009).

A cobertura do solo representa um obstáculo mecânico ao escoamento superficial da água, em caso de cobertura preservada, ocorre a diminuição da velocidade e da capacidade de desagregação e transporte de sedimentos (Silva et al., 2005).

Donadio et al. (2005), em seu estudo, avaliaram a influência da vegetação natural remanescente e de atividades agrícolas na qualidade da água de quatro nascentes. Chegaram à conclusão de que os períodos de amostragem, bem como as características do solo e seus usos distintos, influenciam na qualidade da água das sub-bacias.

Caso a bacia seja composta, em sua maioria, por vegetação preservada, o ciclo hidrológico não será afetado de forma expressiva. Diferentemente do caso em que há degradação do meio por influência de atividades antrópicas, como agricultura, que altera intensamente o escoamento superficial, que ganha maior velocidade, já que a retenção da água precipitada pela vegetação nativa é afetada e, com isso, a infiltração diminui de forma significativa.

Nesse sentido, é de fundamental importância que se amplie o nível de conhecimento da dimensão que a alteração do uso e ocupação do solo pode causar no ciclo hidrológico da bacia. Os gestores dos recursos hídricos devem utilizar ferramentas que auxiliem de forma representativa nas tomadas de decisão.

### **3.3 POLÍTICA E GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL**

No Brasil, a gestão de recursos hídricos baseada no recorte territorial das bacias hidrográficas ganhou força no início dos anos 1990 quando os Princípios de Dublin foram acordados na reunião preparatória à Rio-92 (Porto, 2008). Carvalho et al. (2008) igualmente afirmam que no ano de 1992, houve uma mudança particularmente fundamental no cenário internacional, no que se diz respeito à concepção de gestão dos recursos hídricos, por meio da “Conferência Internacional da Água e do Meio Ambiente: Desenvolvimento de temas para o século XXI” realizada em Dublin, como evento preparatório para a “Rio 92”.

Nesse evento ficou estabelecido que existem quatro pontos principais que devem ser levados em consideração no que se diz respeito à gestão da água, sendo eles: metodologia holística integrando os aspectos sociais, ambientais e econômicos; processos participativos na estratégia de integrar todos os utilizadores (gestão de demanda); papel fundamental da mulher na gestão e proteção das águas; e, por último, a água vista como bem econômico

(Carvalho et al., 2008). Em junho, na Rio 92, o consenso geral foi de que a política em relação à água precisaria ser reformada (Easter, 1993).

A Constituição Federal de 1988 já havia dado aos estados o domínio das águas subterrâneas, gerando a discussão sobre a necessidade de legislação federal específica a respeito (Carvalho et. al., 2008). Dessa forma, o evento da Rio 92 foi determinante para que fosse modificada a visão da sociedade com relação à gestão dos recursos hídricos. No ano de 1997, o país deu um salto nesse aspecto com a criação da Lei 9.433, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, também conhecida como a lei das águas, e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Singreh).

Entre os fundamentos da referida Lei, pode-se destacar a categorização da água como um valor econômico; a gestão dos recursos hídricos que deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas; e a bacia hidrográfica como unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. De seus objetivos, o principal está diretamente relacionado ao desenvolvimento sustentável, onde assegura à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos.

Ainda acerca da qualidade da água, a Lei 9.433/97 introduz em um de seus instrumentos o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água. Em relação ao Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, entre os seus objetivos, pode-se considerar como um dos principais a coordenação e gestão integrada das águas; a arbitrariedade administrativa dos conflitos ligados ao uso da água, sendo esse um dos mais importantes; o planejamento, a regulação e controle do uso, a preservação e a recuperação dos recursos hídricos; e promoção da cobrança pelo uso da água.

Em 2000 foi criada a Agência Nacional de Águas (ANA), de forma a complementar a estrutura institucional da gestão de recursos hídricos do país. De acordo com Porto (2008), essa entidade também é uma das responsáveis pela implementação da lei 9.433/97, já que detém do poder outorgante de fiscalização e de cobrança pelo uso da água. O objetivo da sua criação foi promover a descentralização da gestão para permitir que uma maior quantidade de instituições possa participar das tomadas de decisão relacionada aos recursos hídricos.

Porto (2008) apresenta ainda a importância em frisar a oportunidade que a Política Nacional de Recursos Hídricos dá à participação social, que é garantida como forma de dar legitimidade à decisão e também é a forma mais eficiente de garantir a implantação das

decisões tomadas. Dessa forma, atualmente, o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos é composto por uma série de entidades, cada uma com uma responsabilidade diferente. A Figura 2 apresenta esquematicamente a organização em âmbito nacional e estadual.

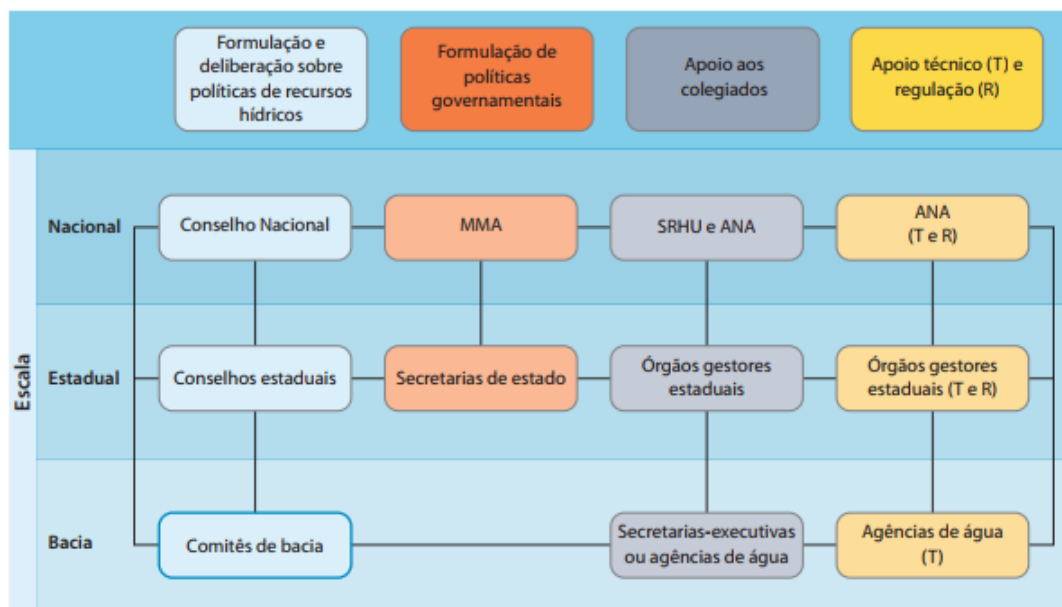


Figura 2 -Matriz institucional do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (ANA, 2011b).

Esse formato de Sistema descentralizado, é importante para que se tenha um controle das diversas faces relacionadas aos recursos hídricos. Por exemplo, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) tem o dever de subsidiar a formulação de Recursos Hídricos, já a Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano do Ministério do Meio Ambiente (SRHU/MMA) formula a Política Nacional de Recursos Hídricos e subsidia a formulação do orçamento da União. O órgão estadual é responsável pela outorga e fiscalização dos recursos hídricos de domínio do estado. Enfim, cada uma das entidades relacionadas à gestão de recursos hídricos é de primordial importância na fiscalização e monitoramento de uso.

### 3.4 PROBLEMÁTICA DOS RECURSOS HÍDRICOS

Tradicionalmente, ao redor do planeta, a água era considerada como um bem público inesgotável e, por este motivo, o seu uso era feito de forma ilimitada. Entretanto, a escassez

de água passou a existir em várias partes do mundo, principalmente nos lugares caracterizados pela intensa exploração dos recursos naturais com o objetivo de crescimento econômico e industrial. Dessa forma, a disputa entre Estados Nacionais pela conquista de territórios caracterizados pela presença de grandes quantidades de água superficial e subterrânea passou a guiar a política nacional e internacional de vários países.

A realidade de disponibilidade hídrica brasileira é privilegiada se comparada à situação global. Isso se deve principalmente à grande quantidade de bacias hidrográficas com um alto volume hídrico atravessando seu território. Apesar disso, existe uma distribuição extremamente desigual de recursos hídricos entre as regiões brasileiras, já que em certas localidades de grande densidade demográfica existe disponibilidade hídrica insuficiente para atender a demanda local, entretanto, em outras regiões a disponibilidade de água é maior que a demanda necessária. A região central do país, por exemplo, é uma localidade desfavorecida, por ser uma área de nascentes de grandes regiões hidrográficas.

De acordo com a ANA (2010), o Distrito Federal está localizado nas cabeceiras de três Regiões Hidrográficas do País: Tocantins-Araguaia, Paraná e São Francisco. Por sua proximidade com as nascentes, os mananciais da região possuem baixa disponibilidade hídrica para atender ao contingente populacional que cresce exponencialmente. As regiões hidrográficas do DF podem ser visualizadas na Figura 3.

A região ilustrada de cor rosa na Figura 4 é a representação da área urbana. Nesse sentido, ANA (2010) proporciona a percepção de que atualmente o Distrito Federal e os municípios do Entorno possuem elevadas taxas de crescimento populacional e pressão sobre os recursos hídricos locais causadas, principalmente, pela expansão urbana.



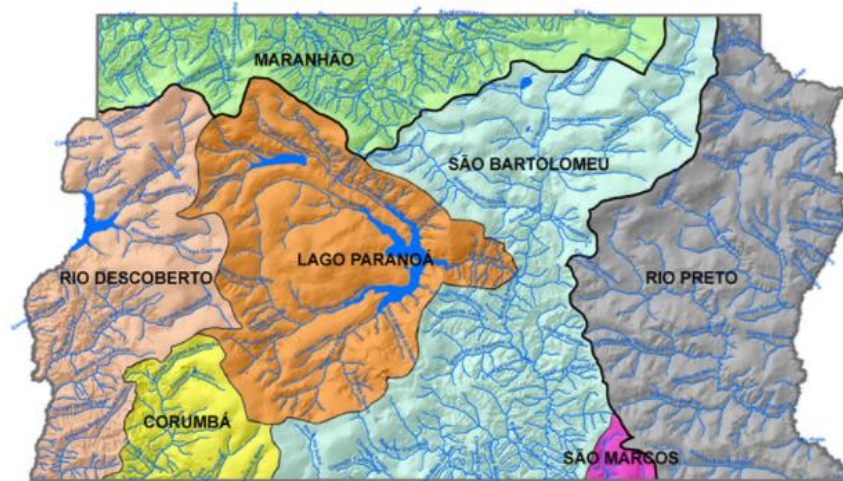


Figura 3 - Bacias hidrográficas do Distrito Federal (ADASA, 2011).

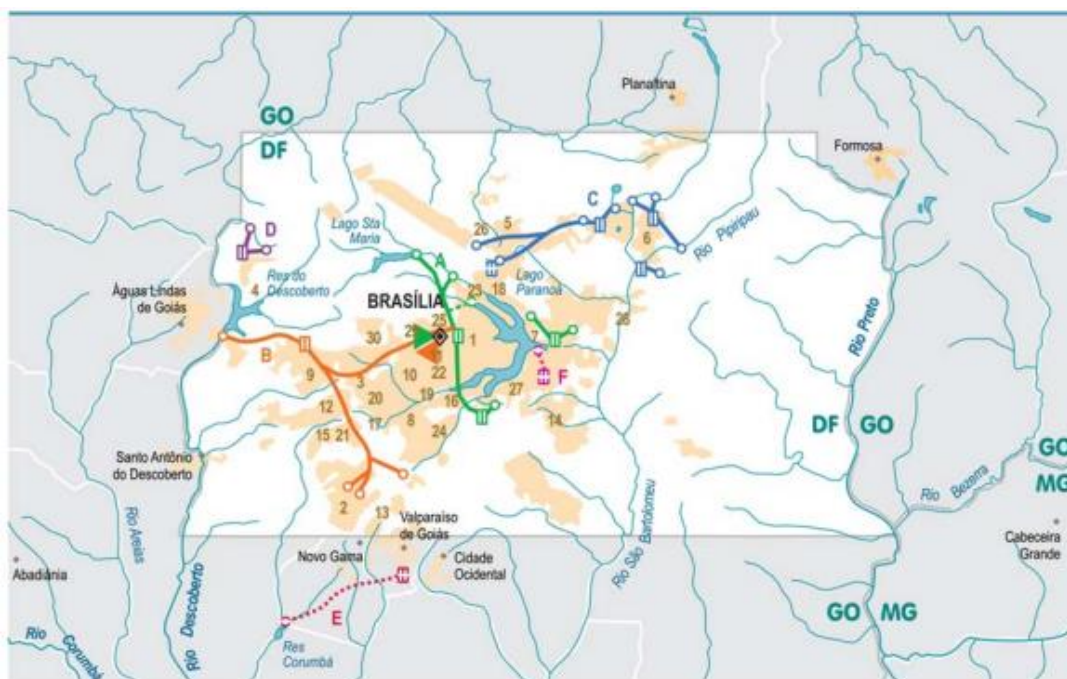


Figura 4 - Região do Distrito Federal (ANA, 2010).

O abastecimento público de água para a população é garantido por sistemas construídos e operados pela CAESB (Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal), na qual tem um índice de atendimento à população de 98,04% do DF (CAESB, 2017), embora atualmente o Distrito Federal passe por uma situação hídrica bastante delicada. O reservatório do Descoberto é responsável por atender a demanda de 61,52% da população do Distrito Federal, e produz uma vazão média de 4.579 L/s. O rio Descoberto

contribui com 98,8% da produção desse reservatório, sendo que isso representa 58,2% da produção de água para abastecimento (CAESB, 2014). Nos anos de 2016 e 2017, o nível do seu reservatório chegou à níveis emergenciais, onde afetou grande parte da população da região.

Para que ocorra a preservação dos aspectos qualitativos e quantitativos e, assim, extensão do tempo de vida útil do reservatório, é primordial que sejam realizados estudos em toda a sua área de influência. Um dos tributários afluentes do lago é a Bacia Hidrográfica do Córrego Chapadinha. De acordo com Costa (2015), a área de influência desta bacia é composta majoritariamente por ocupação urbana e, por este motivo, existem diversos conflitos de interesse na região.

Costa (2015) afirma que os conflitos são de natureza, principalmente, social e ambiental: Primeiro, é social porque a população local busca garantir o direito social à moradia próximo à região do córrego, com pleno desenvolvimento das funções sociais; segundo, é ambiental, porque visa ao uso sustentável da natureza de forma que, mesmo com o conflito social, deve haver preservação dos recursos hídricos, promoção da educação ambiental a partir da comunidade e do seu contato direto com o meio natural.

A ilustração do conflito entre a comunidade urbana e a preservação dos recursos hídricos pode ser vista na Figura 5, onde Costa (2015) apresenta a situação precária na região. A autora afirma que em 1983, houve a criação da Área de Proteção Ambiental (APA) da Bacia do Rio Descoberto, onde o meio ambiente foi priorizado, embora tenha sido ignorado quando surgiu o assentamento próximo ao Córrego Chapadinha, oriundo de invasão.

Portanto, o crescimento desenfreado da população tem consequências negativas quantitativamente e qualitativamente na vazão, gerados por ações como o assoreamento de mananciais e nascentes, captações e lançamento de cargas clandestinos e insuficiência de ações governamentais como obras de melhoria para o sistema de abastecimento.



Fotografia: Gilney de Araújo Costa (Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2014).  
Data: 15 de março de 2014.

Figura 5 - Local de depósito de lixo próximo ao córrego Chapadinha (Costa, 2015).

Dessa forma, para que o abastecimento continue ocorrendo de forma eficiente para toda a população, é de primordial importância que haja a fiscalização de uso, bem como o monitoramento da qualidade das águas.

### **3.5 MODELAGEM E SIMULAÇÃO**

#### **3.5.1 Utilização da modelagem**

A compreensão acerca de processos ambientais nos seus mais complexos estados é fundamental para a gestão dos recursos hídricos bem como para auxiliar nas tomadas de decisões. Além disso, permitem que seja feita uma visualização acerca do comportamento do sistema em situações futuras, gerando cenários ainda não explorados e, dessa forma, reduzindo possíveis gastos e esforços.

Para se ter, por exemplo, o conhecimento acerca do comportamento da água no solo, deve-se levar em consideração uma série de fatores como a disponibilidade hídrica da região, a ocorrência de inundações, a dinâmica de elementos, entre outros aspectos. Diante disso, a modelagem se torna um instrumento fundamental na quantificação desses fatores, auxiliando no entendimento da dinâmica de processos.

A concepção da modelagem advém da representação de um sistema físico, normalmente por meio de equações, ou seja, a representação do comportamento de uma

estrutura, esquema ou procedimento, real ou abstrato, que num dado intervalo de tempo inter-relaciona-se com uma entrada, causa ou estímulo de energia ou informação, e uma saída, efeito ou resposta de energia ou informação (Tucci, 2005). Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que envolvem esta realidade. Os modelos estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais, pois ajudam a entender o impacto das mudanças no uso e cobertura da terra e prever alterações futuras nos ecossistemas (Rennó e Soares, 2007).

Dessa forma, qualquer modelo é resultado da criatividade e do conhecimento que o modelador possui a respeito do fenômeno observado, por esse motivo, um único fenômeno pode ser modelado de várias maneiras (Christofolletti, 1999).

A Figura 6 ilustra a importância da definição do problema, bem como objetivos e justificativas, para a obtenção de resultados que auxiliem na tomada de decisão dos órgãos gestores. Após a aceitação clara do problema, deve-se tomar conhecimento da infinidade de modelos existentes e, por isso, é importante que se escolha o modelo que mais se adequa a situação, já que o resultado emitido será primordial na gestão da localidade de estudo. Com os resultados obtidos, torna-se essencial a criação de cenários futuros que se adequam a realidade, permitindo uma visualização desde a situação mais pessimista para o problema até a situação mais otimista, auxiliando de forma apropriada à tomada de decisão.

Em síntese, com a obtenção de informações necessárias a partir do monitoramento, onde utiliza-se como dados de entrada, faz-se o uso da modelagem como forma de compreender o comportamento de regiões hídricas. O modelo gera dados de saída com informações importantes acerca da localidade, na qual devem ser tratadas e compreendidas para auxiliar na gestão e no gerenciamento dos Recursos Hídricos.

### **3.5.2 Modelagem hidrológica**

Os modelos exigem uma grande quantidade de informações para a geração de um resultado aproximado da realidade. Entretanto, em caso de uma modelagem hidrológica, por exemplo, é impossível ou inviável traduzir todas as relações existentes entre os diferentes componentes da bacia hidrográfica em termos matemáticos.

De fato, ou essas relações são extremamente complexas a ponto de não existir uma formulação matemática capaz de descrevê-las completamente, ou apenas uma parte dos processos envolvidos nessas relações é parcialmente conhecida. Assim, na maioria dos

casos, a modelagem hidrológica torna-se somente uma representação aproximada da realidade (Rennó e Soares, 2007).



Figura 6 - Relação do processo de modelagem com a gestão de Recursos Hídricos (UM/ECE 2000).

Através da aplicação de princípios de uma ou mais teorias e conceitos, os modelos hidrológicos são capazes de reproduzir os fenômenos hídricos dentro de uma escala de tempo definida, estimando componentes do fluxo hidrológico, anteriormente desconhecidos ou não quantificados (Marinho et. al., 2013).

A modelagem hidrológica requer conhecimento aprofundado sobre o ciclo hidrológico, e conseqüentemente, sobre todos os processos físicos que ocorrem durante uma chuva, ou seja, a própria chuva ou precipitação, a interceptação, a evapotranspiração, a infiltração e o escoamento superficial (Santos, 2009).

A utilização de modelos hidrológicos tem sido bastante difundida e suas aplicações na representação do comportamento de bacias hidrográficas têm apresentado resultados representativos, tanto na simulação e previsão de cenários hipotéticos para avaliação de impactos, bem como ferramenta na elaboração de projetos hidrológicos ou hidráulicos (Marinho et. al., 2013). Para se fazer uso desse tipo de modelo de forma adequada, é necessário que se tenha plena compreensão do funcionamento do modelo, bem como de suas limitações.

A Figura 7 demonstra uma estrutura do processo de modelagem, na qual foi apresentada por Tucci (2005).

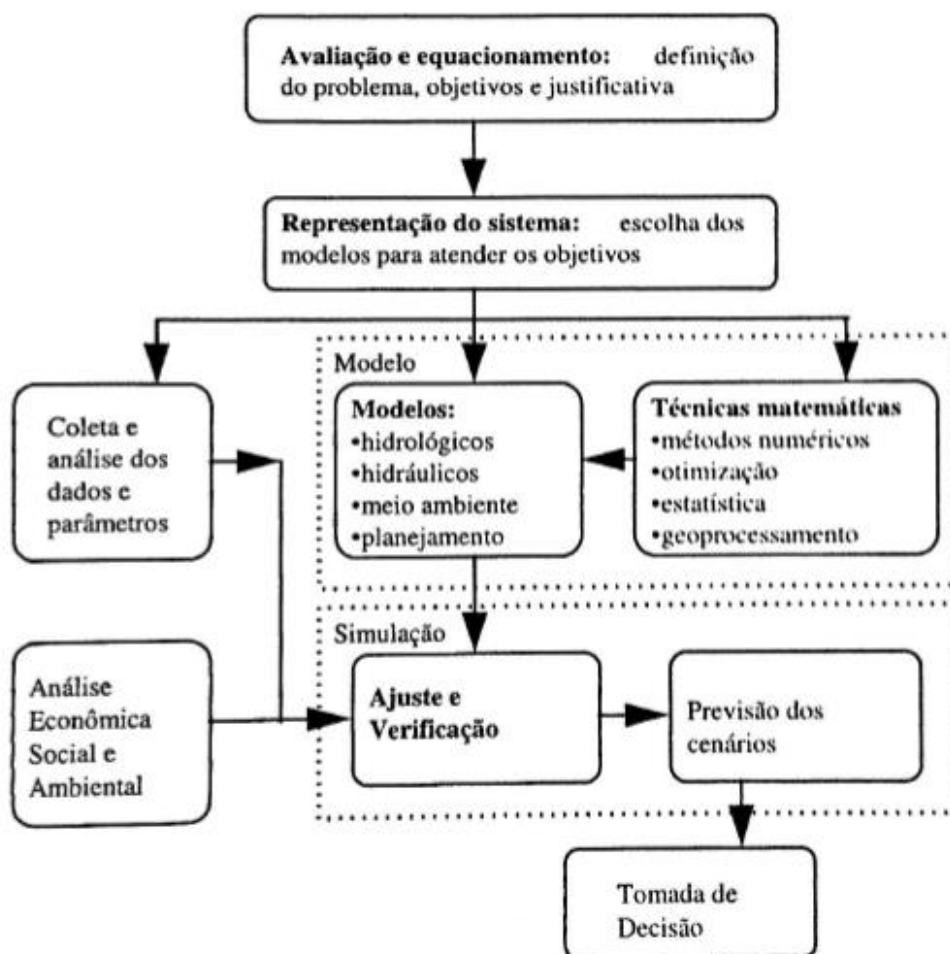


Figura 7 - Processo de modelagem voltado para a gestão de recursos hídricos (Tucci, 2005).

Dessa forma, após a compreensão sobre qual tipo de modelo determinada situação melhor se adequa, existem as etapas de manipulação do modelo. De acordo com Tucci (1993), no caso de utilização de modelagem hidrológica, as etapas são baseadas nos seguintes elementos: discretização da bacia hidrográfica (dependente do modelo), variáveis de entrada (chuva, evapotranspiração, etc.), estrutura básica da integração dos processos (bacia, canal, encosta), aquisição de dados físicos das bacias e determinação dos parâmetros. Após a execução de cada uma destas etapas, é possível se obter os resultados para a problemática inicial.

Na gestão ambiental, a principal importância da modelagem hidrológica é a análise de condições diferentes das observadas atualmente, possibilitando maior compreensão do

passado e a realização de predições quanto às mudanças no clima e no uso e ocupação do solo, auxiliando no processo de tomada de decisão (Tucci, 2005).

### **3.5.3 Modelo SWAT**

Diversos modelos hidrológicos podem ser utilizados com a finalidade de modelagem hidrológica, sendo o SWAT (Soil and Water Assessment Tool) um desses modelos (Blainski et al., 2010). Esse modelo foi desenvolvido pelo serviço de pesquisa agrícola dos Estados Unidos (Agricultural Research Service) e pela Texas A&M University, e, de acordo com Srinivasan e Arnold (1994), seu objetivo é analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subsuperficial, produção de sedimentos e qualidade da água em bacias hidrográficas agrícolas não instrumentadas, possibilitando a obtenção do prognóstico acerca de cada uma dessas situações através da geração de cenários. Ou seja, o modelo trabalha principalmente com parâmetros relacionados ao solo e ao sistema hidrológico da região de estudo. O SWAT simula os processos de forma sequencial dentro do sistema físico, num intervalo de tempo, e fornece séries temporais de saída do modelo (Tim, 1994).

Os principais componentes do SWAT incluem hidrologia, clima, sedimentos, temperatura do solo, crescimento de plantas, nutrientes, agroquímicos e manejo do solo (Arnold et al., 1998). De acordo com Machado e Vettorazzi (2003), a componente hidrológica do modelo inclui sub-rotinas para determinação do escoamento superficial, percolação, fluxo lateral subsuperficial, fluxo de retorno do aquífero raso e evapotranspiração.

Já em relação ao solo, o SWAT é extremamente sensível à qualidade dos dados. Assim, a acurácia do modelo depende, em grande parte, dos parâmetros que descrevem as características relevantes da bacia hidrográficas e do quão representativos eles são (Adriolo et al., 2008). Dessa forma, como dados de entrada, o SWAT também necessita de mapas produzidos por meio do geoprocessamento, contendo informações como declividade, tipos de solo, bem como seu uso e manejo. Caso se tenha mais informações, é possível que sejam inseridos dados de geologia e geomorfologia, por exemplo, para aprofundar ainda mais a análise e os resultados obtidos com a modelagem.

De acordo com Adriolo et al. (2008), o SWAT possui uma série de características específicas que devem ser levadas em consideração. A primeira característica é o fato de possuir uma base física, isto é, o modelo incorpora equações que descrevem a relação entre as variáveis do sistema. Para isso, é necessária a introdução de informações acerca do clima,

propriedades do solo, bem como seu uso e manejo, questões sobre o relevo e vegetação. Com base nestas informações é possível que seja feita a simulação dos processos físicos associados com o movimento da água, movimento de sedimentos, crescimento da vegetação, ciclagem de nutriente, qualidade da água, entre outros.

Adriolo et. al. (2008) traz ainda uma segunda característica do modelo, que é a sua distribuição, isto é, divisão da bacia hidrográfica em sub-bacias para a melhor percepção das diferenças presentes no solo e em seu uso, na cobertura vegetal e na topografia, com base nas características topográficas do terreno, preservando o canal natural. Essa divisão é feita a partir da discretização da bacia hidrográfica em Unidades de Resposta Hidrológica (HRU – Hydrologic Response Units), que passam pelo processo de simulação e, com os resultados obtidos para cada HRU, é possível obter um conhecimento geral de todo o ciclo hidrológico da bacia de estudo.

De acordo com Ferrigo (2014), se a interação entre uma área de uso do solo e outra for importante, em vez de definir os domínios uso do solo como HRUs eles devem ser definidos como sub-bacias. É só em nível de sub-bacia que as relações espaciais podem ser especificadas. O benefício das HRUs é o aumento da precisão que contribuem para a predição de cargas a partir da sub-bacia.

Adriolo et. al. (2008) afirma que o modelo hidrológico SWAT utiliza informações prontamente disponíveis, ou seja, é possível utilizar as funções mais básicas já presentes no modelo para simular um conjunto mínimo de dados através de informações disponíveis por agências governamentais. O modelo é ainda considerado computacionalmente eficiente por permitir a simulação de bacias em diferentes escalas e em uma grande variedade de situações de uso e manejo do solo de forma rápida e eficiente. Por fim, o modelo permite simular longos períodos de forma contínua, o que é bastante importante para um modelo voltado à questão ambiental, já que impactos ambientais se tornam mais perceptíveis após uma análise feita durante longos períodos de tempo.

De acordo com Adriolo et. al. (2008), os processos presentes no modelo podem ser visualizados na Figura 8, que representa um esquema onde estão correlacionadas as componentes disponíveis para o processo de modelagem.

Neste sentido, a quantidade de informações que o modelo SWAT pode gerar sobre uma região hidrológica a partir de uma base de dados consistente de conteúdos terrestres e aquático é bastante significativa, tornando-se suficiente para aprimorar o conhecimento



acerca dos processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica, sendo determinantes para a geração de cenários e possíveis tomadas de decisões baseadas nestas informações. Por este motivo, este modelo torna-se uma ferramenta de alta eficácia no que se diz respeito ao auxílio à gestão e gerenciamento de recursos hídricos.

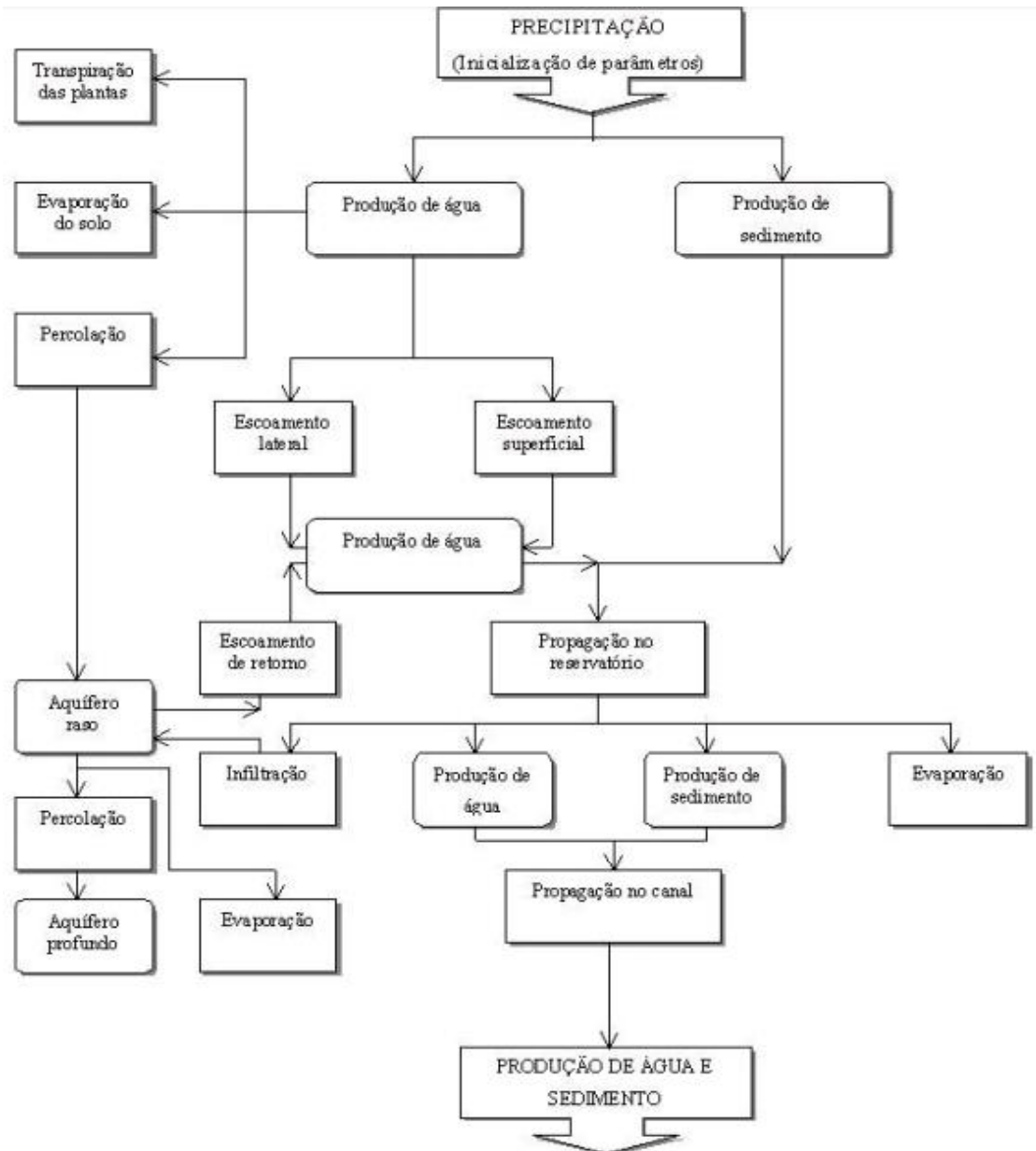


Figura 8 - Fluxograma de processamento do modelo SWAT (Adriolo et. al., 2008).

### 3.5.3.1 Equacionamentos básicos do modelo SWAT

Para a execução da simulação dos processos que ocorrem na bacia hidrográfica, o modelo SWAT utiliza equacionamentos necessários para a geração de informações. Na fase terrestre, o ciclo hidrológico é baseado na equação 1, do balanço hídrico.

Equação 1 - Equação do balanço hídrico utilizada pelo modelo SWAT.

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

Onde,

$SW_t$  = quantidade final de água no solo (mm H<sub>2</sub>O);

$SW_0$  = quantidade inicial de água no solo no dia i (mm H<sub>2</sub>O);

$t$  = tempo (dias);

$R_{day}$  = quantidade de precipitação no dia i (mm H<sub>2</sub>O);

$Q_{surf}$  = quantidade de escoamento superficial no dia i (mm H<sub>2</sub>O);

$E_a$  = quantidade de evapotranspiração no dia i (mm H<sub>2</sub>O);

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

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

O manual de uso, calibração e validação do modelo SWAT apresenta uma série de métodos disponibilizados pelo modelo. Os equacionamentos de cada um desses métodos não serão explicitados no presente trabalho, mas são apresentados e descritos no manual do modelo disponibilizado por Neitsch *et al.* (2011).

### 3.5.3.2 SWAT-CUP

A calibração consiste na adaptação dos parâmetros como forma de adequar o resultado da simulação aos dados observados. A calibração do modelo pode ocorrer de duas formas: manualmente, onde é realizada o ajuste de cada variável individualmente afim de igualar o máximo possível aos dados reais; e de forma automatizada. Para aplicação do modelo SWAT, existe uma ferramenta desenvolvida para a realização da calibração

automática do modelo denominada SWAT Calibration and Uncertainty Program – SWAT-CUP.

O SWAT-CUP é uma interface desenvolvida por Abbaspour *et al.*, (2009) e aprimorada por Abbaspour *et al.* (2013), com o objetivo de realizar análises sobre a modelagem visando o aperfeiçoamento da informação gerada na modelagem (Nunes, 2016).

De acordo com Abbaspour *et al.* (2013), para o SWAT-CUP, essa ferramenta é um programa computacional ajustado para calibrar o modelo SWAT. Assim como o SWAT, o SWAT-CUP é de domínio público e pode ser obtido gratuitamente. Contém cinco algoritmos disponíveis para a realização do processo, sendo eles GLUE, ParaSol, SUFI-2, MCMC e PSO. Todos estão disponíveis para realização dos processos de análise de sensibilidade, calibração e verificação.

Nos estudos de Zhou *et al.* de 2012 e de 2014, que avaliaram o desempenho e a viabilidade do modelo SWAT para a previsão de vazões na bacia do Lago Dianchi, o *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI-2) apresentou bom desempenho nos processos de calibração e verificação.

Sendo assim, o presente trabalho utilizou o algoritmo SUFI-2 no SWAT-CUP para a elaboração das etapas de calibração e verificação.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo visa caracterizar a área de estudo, descrever os procedimentos realizados na aplicação do modelo QSWAT para a realização da modelagem e, por fim, explicar como foi realizada a calibração e verificação do modelo, bem como a geração de cenários, considerando a situação atual, a situação preservada e a situação degradada.

A estruturação do trabalho pode ser melhor visualizada a partir do fluxograma ilustrado na Figura 9.

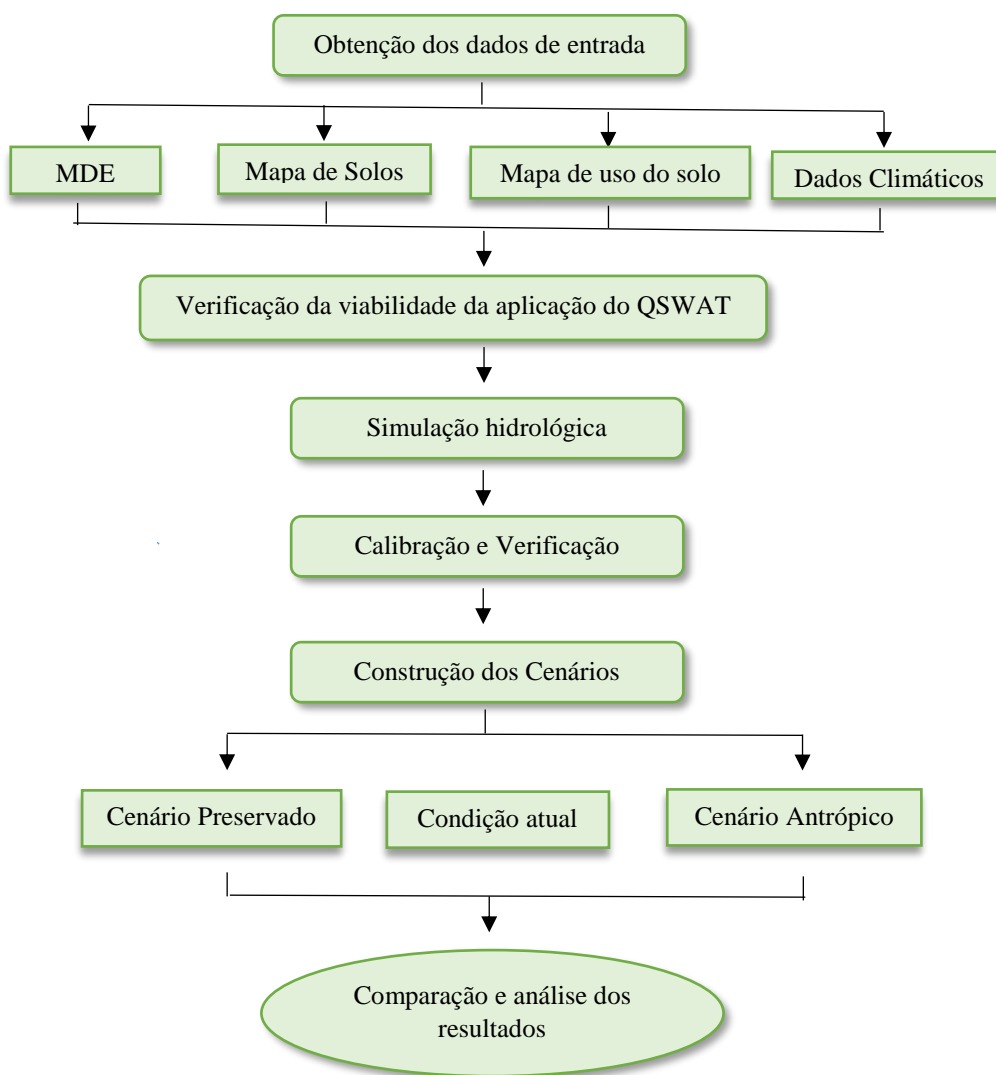


Figura 9 - Fluxograma da metodologia de trabalho

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do córrego Chapadinha (BHCC) é uma das bacias afluentes ao lago Descoberto e está localizada integralmente no Distrito Federal, mais especificamente na região administrativa de Brazlândia. É afluente ao lago descoberto, o principal manancial para abastecimento humano do Distrito Federal. A sua localização espacial é apresentada na Figura 10.

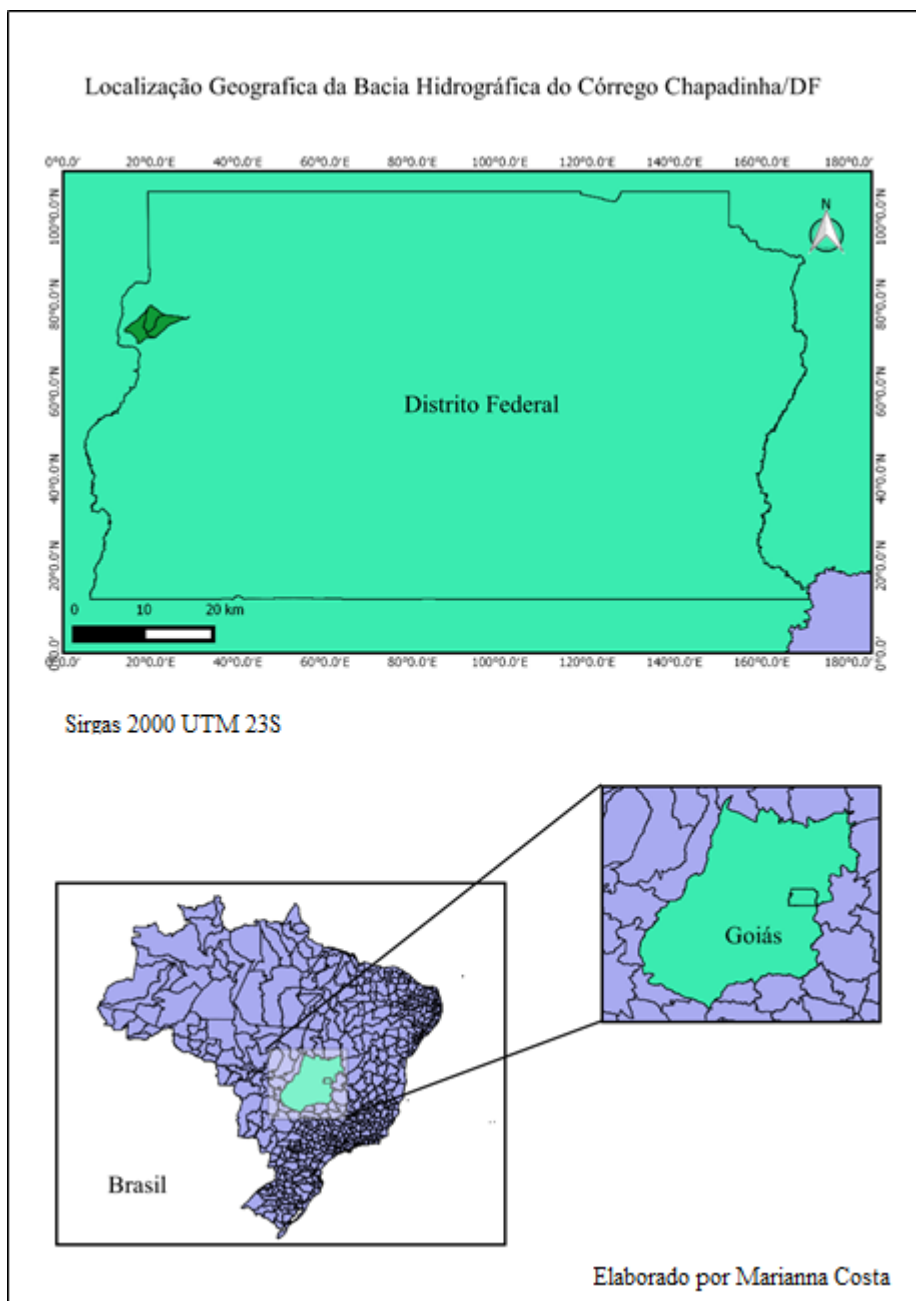


Figura 10 - Localização geográfica da bacia hidrográfica do lago Descoberto. (Fonte de dados: IBGE)

De acordo com Ferrigo (2014), a BHCC possui uma área de drenagem de 20,47 km<sup>2</sup>, constituindo 4,53% da Bacia Hidrográfica do Lago Descoberto (BHL D). De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região é tropical de altitude do tipo Cwa. O total anual das chuvas se concentra, principalmente, entre dezembro e março. A Figura 11 apresenta a localização espacial ao redor da BHL D, onde a Bacia Hidrográfica do Córrego Chapadinha está situada.

Em seu curso principal, existe uma estação pluviométrica de responsabilidade da Companhia de Saneamento do Distrito Federal (CAESB). As coordenadas geográficas da estação são: 15°40'16"S (latitude) e de 48°13'19"O (longitude) e altitude de 1106m. A coleta de dados de precipitação na estação teve início em 1973, estendendo-se até os dias atuais. Por esse motivo, há a possibilidade de analisar o comportamento da precipitação no local e, dessa forma, relacioná-lo com diversos outros parâmetros hidrológicos de interesse.

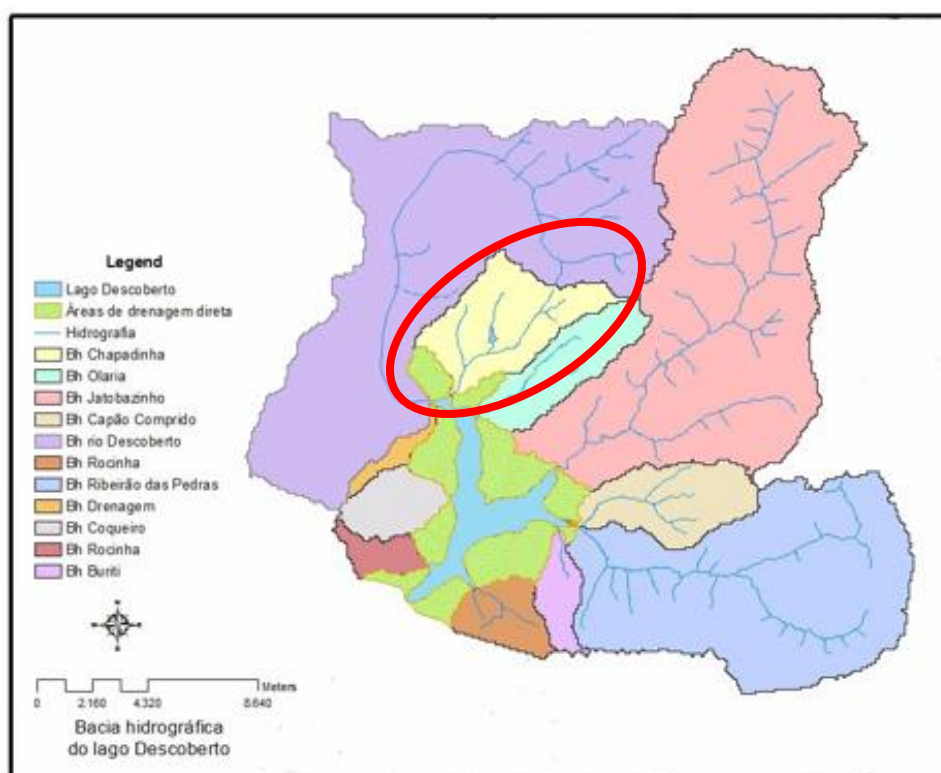


Figura 11 - Sub-bacias localizadas ao redor do lago Descoberto (Minoti, 2013).

Ferrigo (2014), analisou uma série de estações pluviométricas localizadas próximas a BHL D, inclusive a estação localizada na BHCC, circulada de vermelho na Figura 12. Foi avaliado que, de 1971 a 2013, a área referenciada à estação, denominada de estação de Brazlândia Quadra 18, apresenta maior média anual de precipitação. Isso pode ser observado na Figura 4.4, que compara com a precipitação média anual das outras estações avaliadas.

Em relação às características do solo, Ferrigo (2014) afirma que ao redor da BHL D é o solo diversificado, que predominam na região, correspondentes a aproximadamente 71% da área da BHL D, são o latossolo vermelho (lv) (34,09%) e o latossolo vermelho-amarelo (lva) (36,58%). Além destes, aproximadamente 14% da área é representada por cambissolo (c), que ocupa as porções mais elevadas da paisagem, o gleissolo háplico (gx), que perfaz 3,38% da bacia; 1,58% do solo é gleissolo melânico, 1,11% é plintossolo, 0,5% é neossolo flúvico, 0,24% nitossolo háplico e 0,17% do solo é neossolo quartzarênico. Esse mapeamento dos solos próximo à BHL D pode ser visualizado na Figura 14. A bacia de estudo do presente trabalho, BHCC, está incluída no mapa de solos, mas está apresentada pela sigla SBCC.

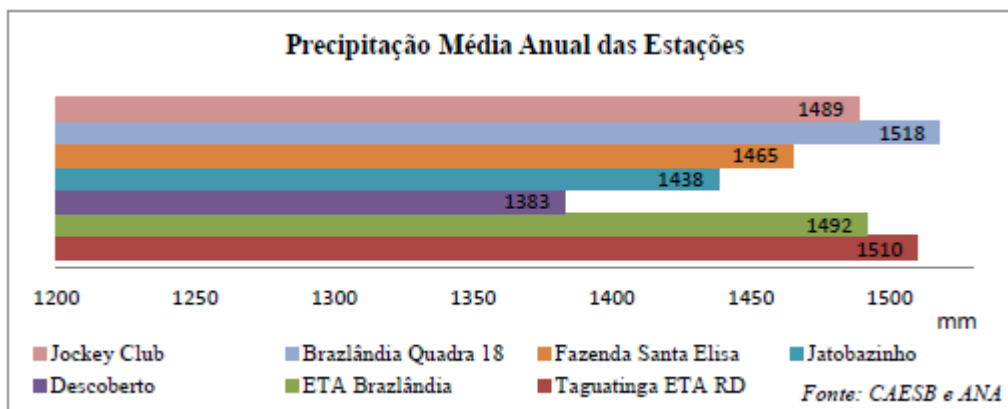


Figura 12 - Precipitação média anual das estações próximas ao lago Descoberto (1971-2013) (Ferrigo, 2014).

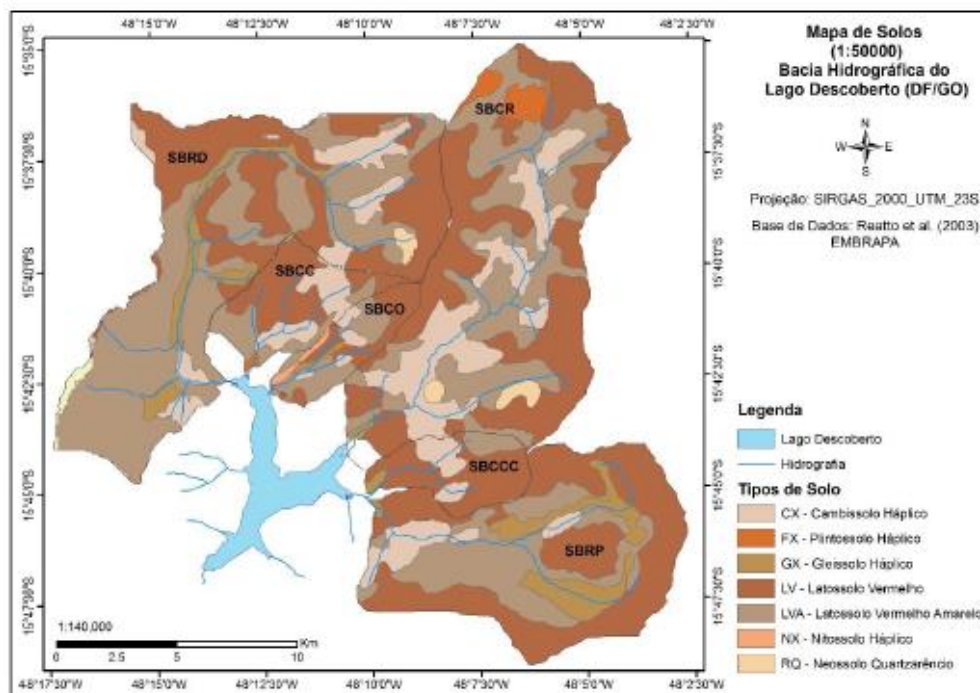


Figura 13 - Tipos de solos presentes próximo à bacia do lago Descoberto (Fonte: Ferrigo, 2014).

Em relação ao relevo da área de estudo, Ferrigo (2014) o classifica em três classes: entre 0 e 8%, representada como classe de relevo plano e suavemente ondulado, de 8 a 20%, representando a classe de relevo ondulado; e (3) acima de 20%, reunindo as classes de relevo ondulado, fortemente ondulado, montanhoso e escarpado, onde a maior parte do relevo próximo a BHL D possui declividade da primeira classe.

Essa classificação abrange a estrutura do relevo na bacia hidrográfica do Córrego Chapadinha que, de acordo com Ferrigo, 85,30% de sua extensão é composta dessa classe, embora 11,30% seja classificado como relevo ondulado e 5,26% compreende alguma das classes de relevo ondulado, fortemente ondulado, montanhoso e escarpado. O mapa de relevo está apresentado na Figura 14.

E, por fim, Ferrigo (2014) apresenta o mapa de uso e ocupação do solo, que é de extrema importância para entender como os processos da bacia ocorrem, principalmente os de alteração de origem antrópica. O referido mapa pode ser visualizado na Figura 15.



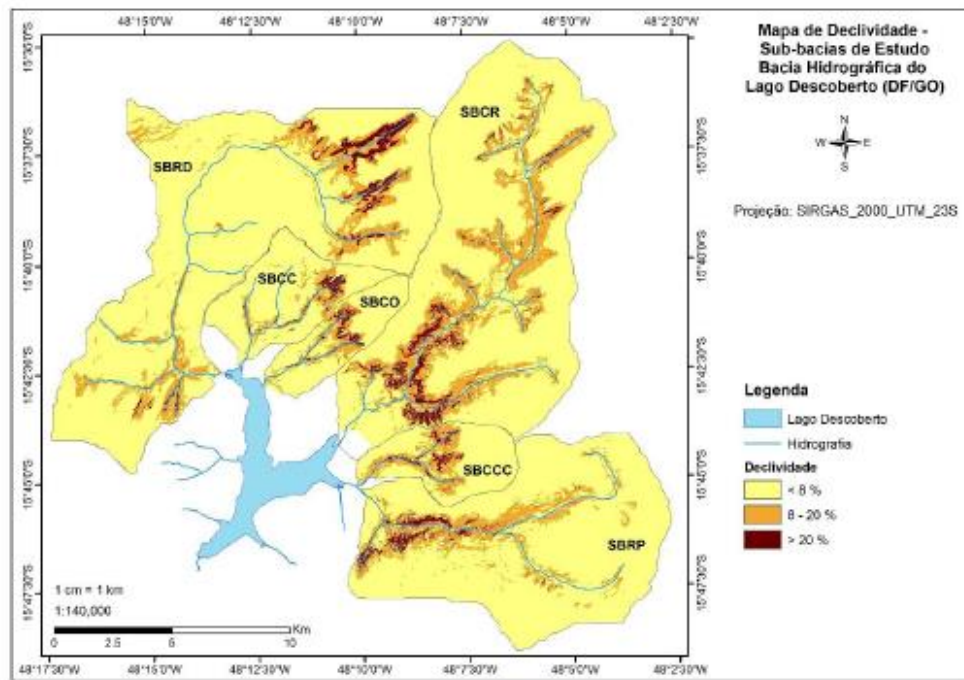


Figura 14 - Mapa de relevo das bacias próximas ao lago Descoberto (Ferrigo, 2014).

Pode-se observar que o solo na BHCC, representada pelo SBCC, está ocupado principalmente por urbanização de alta densidade. A partir disso, é possível se deduzir que o perfil do solo e dos corpos d'água sofrem alterações por influência da atividade antrópica de alta densidade.

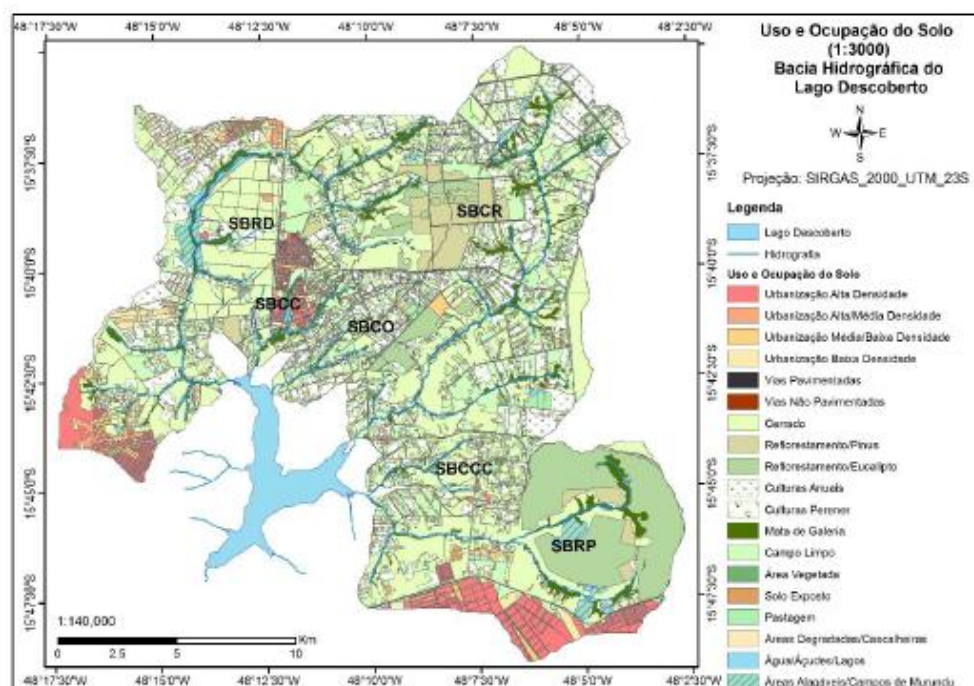


Figura 15 - Mapa de uso e ocupação do solo de bacias próximas ao lago Descoberto (Ferrigo, 2014).

## **4.2 APLICAÇÃO DO MODELO SWAT - INTERFACE QSWAT**

Para a aplicação do modelo hidrológico SWAT, o presente trabalho utilizou a interface do QSWAT, isto é, o modelo SWAT acoplado ao software livre de geoprocessamento Quantum Geographic Information System (QGIS). A motivação para este propósito foi a baixa quantidade de registros de estudos que utilizam esta interface no Brasil, bem como a facilidade de acessibilidade do software.

Dado que o QGIS é um Sistema de Informação Geográfica livre e aberto, isto é, está disponibilizado publicamente, surgiu o interesse em analisar a viabilidade de utilização do modelo SWAT nesta plataforma, uma vez que facilitaria a sua implementação para o grande público, contanto que certos softwares, como o ARCGIS, existem licença de alto valor aquisitivo. Nesse sentido, a expectativa era que o presente trabalho, ao realizar a aplicação, pudesse contribuir com a realização de uma aplicação do QSWAT no Brasil a fim de aprimorar o uso dessa interface no Brasil.

O processo de modelagem ocorreu a partir da aquisição de dados de solo, uso e ocupação do solo, de declividade e séries temporais climatológicas e, após a conclusão desta etapa, iniciou-se a realização das simulações com o modelo. Em seguida, para melhorar a aderência entre os resultados gerados e os observados, foram realizadas a análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo e calibração. Por fim, geraram-se cenários a partir dos resultados obtidos pela simulação.

### **4.2.1 Estruturação da base de dados**

O presente trabalho foi desenvolvido utilizando uma base de dados disponibilizada pelo Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH/UnB), construída por Ferrigo (2014), a qual possui informações da bacia hidrográfica do Córrego Chapadinha. Como dados de entrada, foram utilizados o modelo digital de elevação (MDE); mapa de uso e ocupação do solo; mapa de solo; e séries temporais climatológicas.

O modelo digital de terreno foi elaborado por Ferrigo (2014) a partir de curvas nível disponibilizadas pela TERRACAP. Já o mapa de uso e ocupação do solo, foi confeccionado a partir da ortofoto de abril de 2013 disponibilizada pela Terracap, a qual apresenta uma resolução espacial de 24 cm.

Ferrigo (2014) achou necessária a realização da parametrização dos dados de solo, que foi realizada com base no estudo desenvolvido por Lima *et al.* (2013), em que apresenta o desenvolvimento da base de dados de solos do bioma cerrado para aplicação no modelo SWAT. Já a parametrização dos usos do solo foi realizada pelo complemento da base de dados obtida do sistema MapWindow-SWAT, interface MWSWAT.

Os dados de clima foram calculados conforme recomendação do manual Input/Output, de Arnold *et al.* (2011).

#### **4.2.2 Simulação Inicial**

O processo de simulação ocorreu para análise dos processos do ciclo hidrológico, baseados na variável de vazão. Ocorreu no âmbito de três etapas: delimitação da bacia hidrográfica; criação de HRU's; e edição dos dados de entrada em conjunto com a execução do processo de simulação. Esses passos são executados no próprio SWAT, que desmembra dessa forma.

Na primeira etapa utilizou-se um MDE já construído para a geração da base cartográfica de declividade, definição da rede de drenagem, identificação do exutório, delimitação da bacia e sua discretização em sub-bacias. A identificação do exutório foi dada a partir do auxílio da localização das estações fluviométricas da CAESB no perímetro da bacia.

Em seguida, iniciou-se o processo de criação das Unidades de Resposta Hidrológicas (HRU). Para a realização desse passo, foram utilizadas as informações do MDE já inserido e, além disso, foi necessária a inserção da base cartográfica de uso e ocupação do solo e uma base cartográfica dos solos que abrangessem a região. Por conseguinte, utilizou-se os dados para sobrepor os mapas e, dessa forma, discretizar a bacia em diversas microrregiões singulares que possuem declividade, tipo de solo e uso do solo em comum.

A partir das informações de cada uma das HRU's formadas, é possível se obter um maior conhecimento acerca da bacia. No presente trabalho, a importância maior foi dada as características específicas acerca dos processos do ciclo hidrológico, no que se diz respeito ao aspecto quantitativo de vazão. De acordo com Ferrigo (2014), a vantagem em se utilizar HRU's para a simulação é o aumento da precisão.

O terceiro passo foi caracterizado pela adição de dados climáticos de precipitação, temperatura mínimas e máximas, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do

ar. Em seguida, realizou-se a simulação do modelo entre os períodos de janeiro de 1998 a dezembro de 2016, utilizando os dois primeiros anos para aquecimento, como forma de diminuir os possíveis erros no início o processo.

### 4.2.3 – Análise de sensibilidade

Após a simulação inicial, o primeiro passo realizado foi a calibração com os dados simulados e observados, com propósito do ajuste do modelo. Os dados observados da variável de vazão foram adquiridos a partir das informações disponibilizadas pelas CAESB, contendo informações de 2000 a 2016.

O programa utilizado para a calibração e para a análise de sensibilidade foi o SWAT-CUP 2012 – versão 5.1.6.2, onde sua funcionalidade está descrita no item 3.5.3.2 do presente trabalho. Dentre os algoritmos presentes no programa, o escolhido para a realização do processo foi o SUFI-2, por ser o que melhor representa a bacia hidrográfica quando se tem grande quantidade de informações, já que há maior liberdade em realizar alterações acerca dos dados observados e simulados.

Os parâmetros utilizados na simulação e, posteriormente os cinco mais significantes foram selecionados e utilizados no processo de análise de sensibilidade, estão apresentados e descritos na Tabela 1. É válido ressaltar que todos os parâmetros apresentados estão ligados a aspectos físicos da bacia hidrográfica, representando os processos que ocorrem na realidade.

No processo de calibração, foram utilizados dados para o período de 2000 a 2010. O SWAT-CUP foi ajustado para realizar uma iteração com 600 simulações. Essa primeira fase tem o intuito de identificar, por meio da análise de sensibilidade, os parâmetros mais sensíveis para o posterior processo de calibração.

Para analisar a eficiência da simulação, o índice estatístico utilizado foi o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), o qual classifica o resultado como muito bom, bom, satisfatório e insatisfatório, de acordo com intervalos de valores estabelecidos por Moriasi *et. al* (2007). De acordo com Ferrigo (2014), esse é um elemento muito importante na calibração de modelos hidrológicos, sendo a métrica utilizada pelo algoritmo de otimização para determinar a qualidade da simulação hidrológica.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados na Análise de Sensibilidade e respectivos intervalos mínimo e máximo de variação. (adaptado: Ferrigo,2014)

Parâmetro	Nome	Unidade	Intervalo possível de variação
-----------	------	---------	--------------------------------

			Mín	Máx
<b>CN2</b>	Curva Número na condição II	adim	0	100
<b>ALPHA_BF</b>	Constante de recessão do fluxo de base	adim	0	1
<b>GW_DELAY</b>	Intervalo de tempo para a recarga do aquífero	dias	0	50
<b>GWQMN</b>	Profundidade limite de água no aquífero raso necessário para o fluxo de retorno ocorrer	mm	0	5000
<b>GW_REVAP</b>	Coefficiente de ascensão de água à zona não saturada	adim	0,2	2
<b>ESCO</b>	Fator de compensação de evaporação do solo	adim	0	1
<b>SOL_AWC</b>	Capacidade de água disponível no solo	adim	0	1
<b>SOL_K</b>	Condutividade hidráulica saturada do solo	mm/h	0	100
<b>SOL_BD</b>	Densidade aparente do solo	mg/m <sup>3</sup> ou g/cm <sup>3</sup>	0,9	2,5
<b>SHALLST</b>	Profundidade inicial do aquífero raso	mm	0	1000
<b>GWHT</b>	Altura inicial da água subterrânea	m	0	25
<b>DEEPST</b>	Profundidade inicial da água do aquífero profundo	mm	0	3000
<b>REVAPMN</b>	Profundidade limite da água no solo para a ocorrência da ascensão da água à zona não saturada:	mm	0	500
<b>ANION_EXCEL</b>	Fração de porosidade (espaços vazios).	adim	0,01	1,00

\*adim: adimensional

De acordo com Moriasi *et. al* (2007), o coeficiente de Nash-Sutcliffe pode variar de  $-\infty$  a 1, incluindo o valor de 1. Quanto mais próximo de 1, mais satisfatório é considerado o resultado. Abaixo de 0,5 já é um valor insatisfatório, o que significa que os valores de comparação entre os resultados observados e simulados estão bastante discrepantes, havendo a necessidade do processo de calibração. Sua classificação está apresentada na tabela 2. A equação utilizada para a realização desta análise pode ser visualizada na equação 2.

Tabela 2 - Classificação da performance dos coeficientes para passo mensal (adaptado de Moriasi *et. al*,2007)

Classificação	NSE
Muito boa	$0,75 < NSE \leq 1,00$
Boa	$0,65 < NSE \leq 0,75$
Satisfatória	$0,50 < NSE \leq 0,65$
Insatisfatória	$NSE \leq 0,50$

Equação 2 - Coeficiente de NSE

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2}$$

Por conseguinte, foi realizada a Análise de Sensibilidade, como forma de identificar os parâmetros mais significativos para o processo de calibração. O SWAT-CUP utiliza dois meios de realizar a Análise: análise de sensibilidade global e análise de sensibilidade individual.

Pela análise de sensibilidade global, são utilizados dois testes e, por isso, são apresentados dois resultados: (1) o *t-stat*, que fornece a medida da sensibilidade, em que quanto maior for o seu valor mais sensível é o parâmetro; e (2) o *p-value* que determina a significância da sensibilidade, e um valor próximo à zero indica maior significância. Ambos os resultados foram avaliados (Ferrigo, 2014).

Já o método de análise de sensibilidade individual utiliza a sensibilidade das mudanças do parâmetro na variável em análise, enquanto todos os outros parâmetros são mantidos constantes (Ferrigo, 2014).

#### 4.2.4 – Calibração e Verificação

A partir do resultado da análise de sensibilidade, selecionaram-se seis parâmetros identificados como mais sensíveis. Nessa etapa, foi realizada a iteração com 1000 simulações com dados ainda de 2000 a 2010, tendo como função objetivo o NSE, com passo mensal.

Os parâmetros selecionados estão agrupados na tabela 3 em ordem decrescente de sensibilidade sugeridos pelo SWAT-CUP para alteração e melhora na calibração.

Tabela 3 - Parâmetros selecionados para a calibração

Parâmetro	
Nome	Extensão
SOL_K	.sol
GW_DELAY	.gw
SOL_BD	.sol
SOL_AWC	.sol
CN2	.mgt

A verificação foi realizada para os anos de 2010 a 2016 e foram avaliados os resultados.

### 4.3 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA EM DIFERENTES CENÁRIOS DE USO DO SOLO

No intuito de realizar a avaliação da influência das atividades antrópicas no balanço hídrico e na qualidade das águas da bacia hidrográfica do córrego Chapadinha/DF, após a execução da análise de sensibilidade, calibração e verificação, o modelo foi aplicado na

Bacia Hidrográfica do Córrego Chapadinha simulando com três diferentes usos do solo: o primeiro na qual a bacia possuía sua vegetação totalmente preservada, denominado de cenário preservado; o segundo no período atual, que ocorreu com a simulação inicial; e um último uso do solo antropizado, onde foi pressuposto que o ambiente estaria mais degradado pela expansão urbana e agrícola.

A simulação no SWAT com diferentes usos do solo gerou resultados pra variáveis FLOW\_OUT e EVAP. Realizou-se a comparação entre o comportamento dos parâmetros durante os anos de 2000 a 2010 nos três períodos distintos, como forma de visualizar como esses aspectos seriam afetados em caso de preservação total da bacia e em caso de ocupação agrícola e urbana total.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 - MODELAGEM COM O SWAT

#### 5.1.1 - Sub-bacias e HRU's

Com os dados de modelo digital do terreno, foi possível realizar o delineamento da Bacia Hidrográfica de estudo. Foram geradas 3 sub-bacias na Bacia Hidrográfica do Córrego Chapadinha, as quais estão demonstradas na Figura 16.

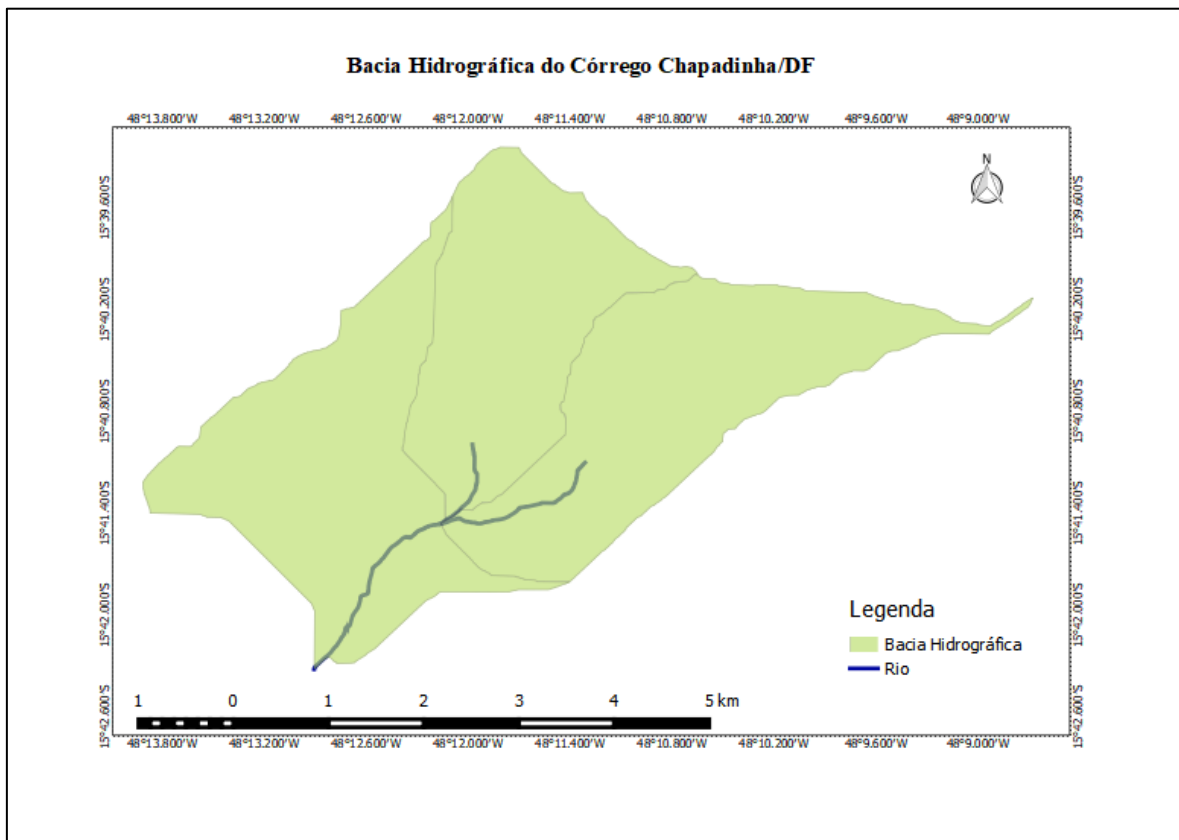


Figura 16 - Bacia Hidrográfica do Córrego Chapadinha/DF

Utilizando os dados de declividade, de mapas de solos e uso do solo, foi possível produzir as Unidades de Resposta Hidrológicas, as quais seriam utilizadas para a simulação pelo modelo, obtendo-se um total de 268 HRU's. A Figura 17 apresenta o mapa com as HRU's criadas.



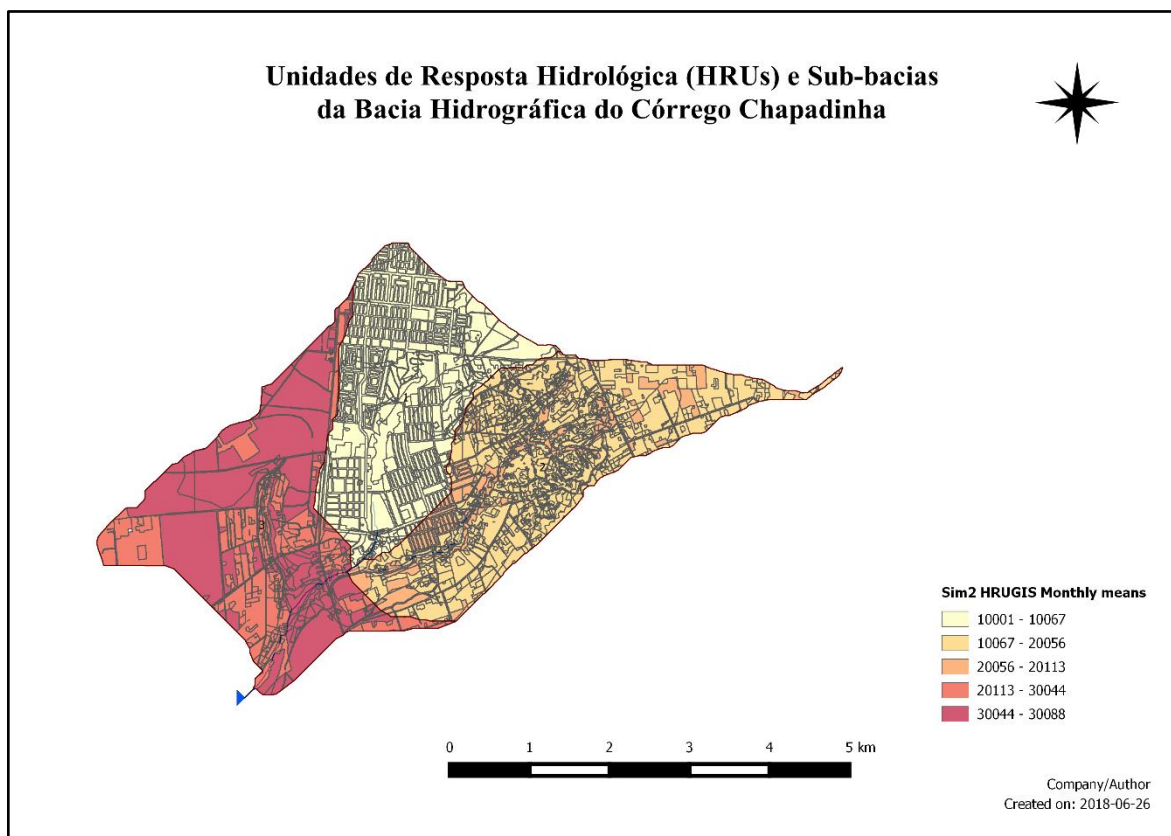


Figura 17 - HRUs e Sub-bacias da bacia hidrográfica do Córrego Chapadinha

### 5.1.2 – Simulação Inicial

Inicialmente obtiveram-se os resultados a partir da simulação sem calibração e, a partir destes, foi realizada a análise comparativa entre os dados observados e simulados. A Figura 18 mostra o hidrograma dessa etapa para os anos de 2000 a 2010.

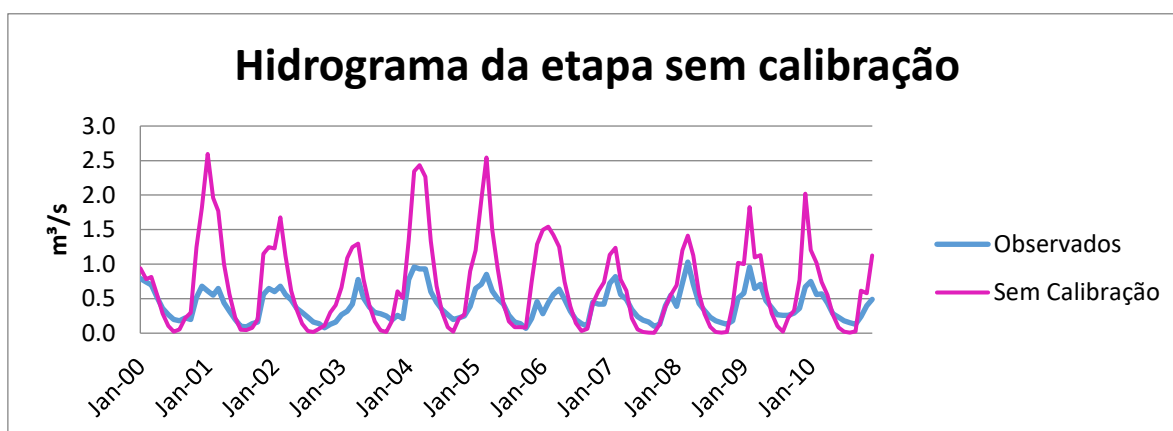


Figura 18 - Hidrograma de dados observados e simulados sem calibração da Bacia Hidrográfica do Córrego Chapadinha

O valor do coeficiente de Nash Sutcliffe (NSE) para essa simulação foi de -5,09. Esse valor é considerado insatisfatório de acordo com Moriasi *et al.* (2007). Esse resultado, em conjunto com o hidrograma apresentado, provam a importância da realização do processo de calibração para o ajuste dos dados simulados e observados de vazão. É possível observar na Figura 18 que os dados simulados estão com picos muito maiores que os observados e há a subestimação das vazões nos períodos recessão, o que mostra a dificuldade em representar de forma computacional os processos que ocorrem na realidade da bacia hidrográfica.

### 5.1.3 - Análise de sensibilidade

O processo de calibração ocorreu utilizando os parâmetros sugeridos por Ferrigo (2014) que, por sua vez, se baseou em diversos estudos relacionados à influência de cada um dos parâmetros no ciclo hidrológico. Ferrigo (2014) apresenta esses estudos em sua dissertação.

O resultado da primeira iteração pode ser visualizado na Figura 19. Foi feito o ajuste do SWAT-CUP para a realização de 600 simulações como fase teste, com o intuito de verificar se o processo estava sendo executado satisfatoriamente e para a obtenção da análise de sensibilidade, que apresentaria os 5 parâmetros mais sensíveis que seriam utilizados para simulações posteriores.

A partir da simulação inicial, o SWAT-CUP disponibilizou a análise de sensibilidade global, que serviu de base para a escolha dos parâmetros mais significativos. Frisando o que foi dito anteriormente, nessa análise, de acordo com Abbaspour (2013), o “p-value” determina a significância da sensibilidade dos parâmetros, de modo que, quanto mais próximo a zero, maior a significância do parâmetro na modelagem específica; já o “t-stat” indica o grau da sensibilidade, sendo que quanto maior seu valor absoluto, mais sensível é o parâmetro.

A Figura 19 apresenta o hidrograma do resultado da calibração 1 e a Figura 20 mostra a análise de sensibilidade global da calibração inicial, onde pode-se visualizar os parâmetros mais sensíveis, que estão dispostos na Figura em ordem crescente.

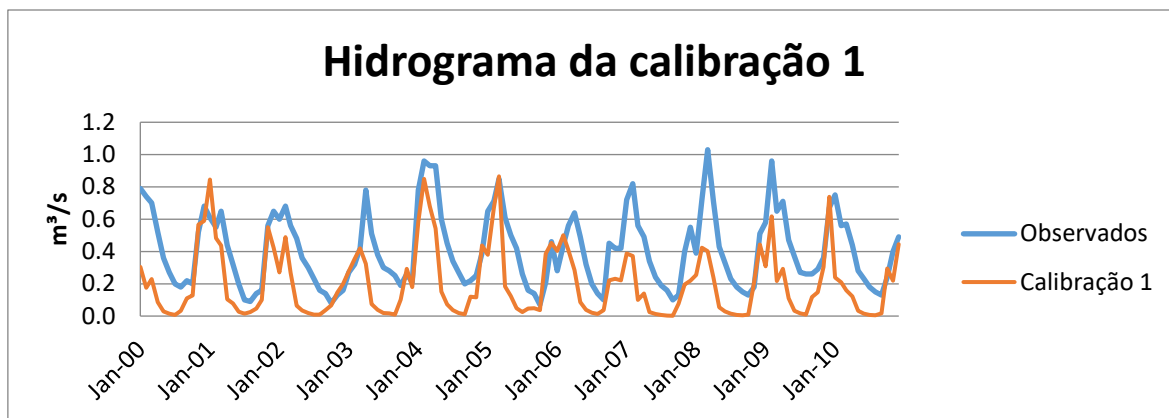


Figura 19 - Hidrograma de dados observados e simulados na calibração 1 da Bacia Hidrográfica do Córrego Chapadinha

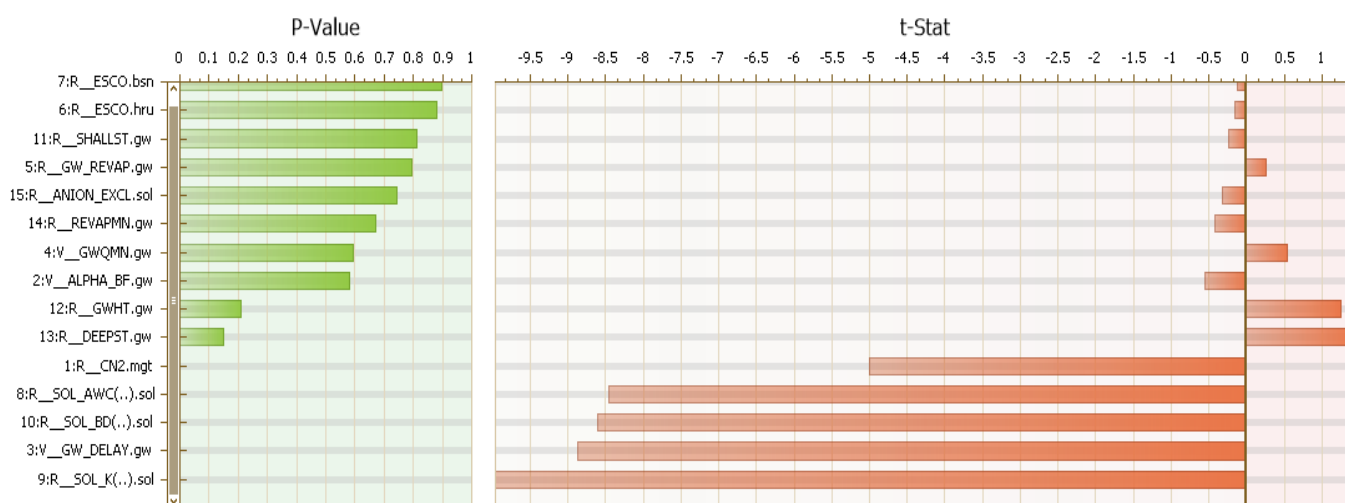


Figura 20 - Análise de sensibilidade global da calibração inicial

Em comparação com o hidrograma da simulação sem calibração, o resultado apresentado na Figura 19 mostra o quanto a calibração automática abrandou a distância entre as duas curvas. Contudo, o valor do coeficiente NS foi de -0.09, o que, de acordo com a classificação de Moriasi *et. al* (2007), é considerado insatisfatório. Por isso, torna-se necessária a calibração utilizando os valores de máximo e mínimo sugeridos pela ferramenta SWAT-Cup como forma de atenuar o máximo possível a diferença entre os dados observados e os dados gerados pelo modelo.

Com relação à análise de sensibilidade, pode-se observar que o parâmetro mais sensível foi o SOL\_K – Condutividade hidráulica saturada do solo, que, de acordo com Ferrigo (2014), é um parâmetro de grande influência na movimentação da água no solo, principalmente no processo de infiltração, pois está diretamente relacionado ao tempo de

percolação. Nesse sentido, o fato do seu nível de sensibilidade ser o maior, se deve ao seu importante papel nos processos do ciclo hidrológico, ou seja, no fator quantitativo da vazão.

O segundo parâmetro mais sensível foi o GW\_DELAY - Intervalo de tempo para a recarga do aquífero. Assim como o primeiro, este parâmetro está relacionado ao movimento da água no solo, sendo dependente do tipo de solo, pela quantidade de vazios que permite a infiltração e influencia na velocidade de movimentação da água em direção ao aquífero; bem como do uso do solo, pois caso haja impermeabilização na maior parte, o processo de entrada de água no solo é prejudicado, igualmente o fenômeno de recarregar o aquífero, diminuindo assim o tempo de recarga.

O SOL\_BD – Densidade aparente do solo, estava entre os parâmetros mais sensíveis, o qual relaciona a massa das partículas sólidas com o volume total do solo. De acordo com Ferrigo (2014), essa densidade do solo é inversamente proporcional à porosidade do solo, o que significa que quanto menor a densidade do solo, maior a porosidade e, com isso, maior é a quantidade de água possível de se movimentar, podendo influenciar positivamente na vazão.

O parâmetro SOL\_AWC - Capacidade de água disponível no solo, é de grande importância pelo fato de influenciar na saturação do solo, o que está diretamente ligado à vazão. Por este motivo, é coerente que seja considerado de alta relevância no aspecto qualitativo de vazão a partir do processo de simulação.

E, por fim, outro parâmetro de grande relevância na quantidade de vazão disponível no corpo d'água é o CN2 - Curva número na condição II. Ferrigo (2014) afirma que este é um número obtido em função do tipo de solo, do uso e da condição antecedente de umidade no solo. Ou seja, os valores de deflúvio na bacia são dependentes ao parâmetro CN.

#### **5.1.4 - Calibração e Verificação**

Após a análise e seleção dos 5 parâmetros, realizaram-se calibrações com o objetivo de aproximar o máximo possível os dados simulados dos observados, para que o modelo computacional representasse de maneira significativa os processos que ocorrem na bacia.

A primeira calibração com apenas 5 parâmetros ocorreu através de 1000 simulações, com o intuito de analisar visualmente a diferença entre a calibração inicial e a atual após a mudança dos valores de mínimo e máximo. Estes valores foram sugeridos pelo próprio

SWAT-CUP e encontram-se na tabela 4. O hidrograma obtido como resultado dessa calibração está apresentado na Figura 21.

Tabela 4 - Valores de mínimo e máximo para cada parâmetro utilizados na calibração

Parâmetro	Valor Mín	Valor Máx
<b>CN2</b>	-0.35053	0.01653
<b>GW_DELAY</b>	-162.708511	245.808517
<b>SOL_AWC</b>	-0.213831	0.595497
<b>SOL_K</b>	-48.636028	50.469364
<b>SOL_BD</b>	0.689873	1.896793
<b>DEEPST</b>	1433.519043	4301.480957

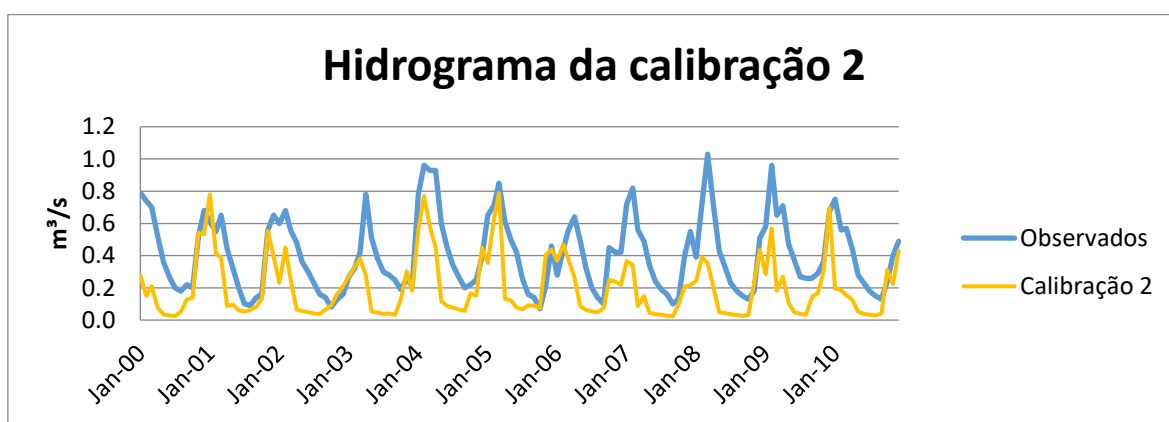


Figura 21 - Hidrograma de dados observados e simulados na calibração 2 da Bacia Hidrográfica do Córrego Chapadinha

O valor do coeficiente estatístico NSE para essa calibração foi de -0,15, o que mostra uma melhora em relação à simulação sem calibração, porém uma piora em relação à calibração 1. O hidrograma, se comparado ao anterior, não possuiu alterações significativas. Isso se deve, provavelmente, à mudança sutil dos valores utilizados para os parâmetros de entrada nessa calibração em relação à realizada anteriormente. Por este fator, achou-se necessária a realização de uma nova calibração afim de melhorar os resultados entre os anos de 2000 a 2010.

A terceira calibração foi realizada com apenas 100 simulações, pois o principal objetivo era a verificação de possível alteração significativa nos dados. Os valores de cada parâmetro utilizado estão apresentados na Tabela 5. Na Figura 22 encontra-se o hidrograma da terceira calibração.

Tabela 5 -Valores de mínimo e máximo para cada parâmetro utilizados na calibração 3

Parâmetros	Valor Mín	Valor Máx
CN2	-0.40222	-0.40479
GW_DELAY	68.12375	85.57352
SOL_AWC	-1.38874	-1.17035
SOL_K	-18.5845	2.680784
SOL_BD	1.301987	1.441569

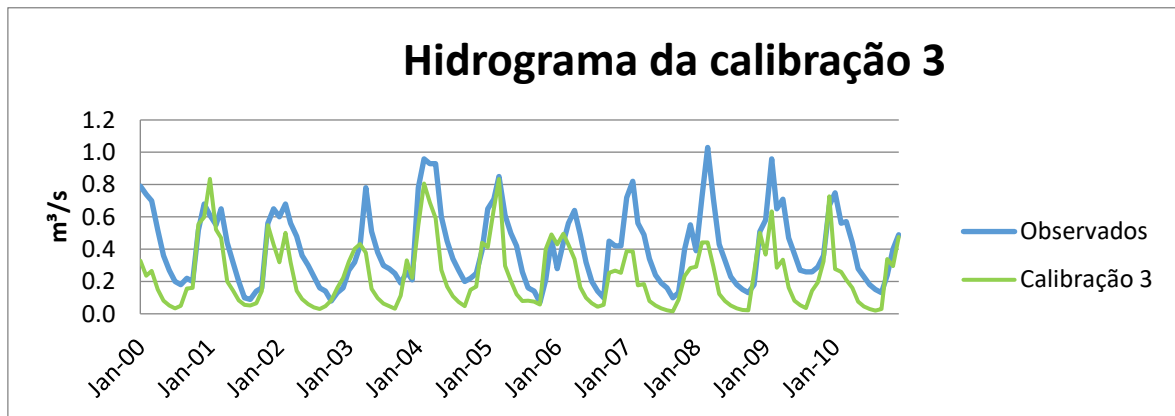


Figura 22 - Hidrograma de dados observados e simulados na calibração 3 da Bacia Hidrográfica do Córrego Chapadinha

O valor da função objetivo para essa calibração foi de  $NSE=0,20$ . Em comparação aos valores encontrados anteriormente, esse foi o melhor valor obtido, embora ainda seja classificado como insatisfatório pela classificação de Moriasi (2007). É possível observar dos três hidrogramas que na maioria dos anos a vazão simulada é subestimada. No ano de 2001 ocorre a superestimação da vazão e, em 2005, ocorre a sobreposição das vazões.

Como forma de visualizar mais claramente a mudança entre os resultados sem calibração e da melhor calibração, em comparação com os observados, se incluiu em um único gráfico os três diferentes resultados. A Figura 23 que apresenta essa comparação. É possível perceber que há uma discrepância em relação aos resultados, havendo uma melhora significativa na aderência entre as curvas.

A simulação ocorreu utilizando as variáveis já consideradas como os parâmetros que proporcionaram a maior representatividade nos processos da bacia de estudo. Os resultados indicam que os dados simulados e observados possuem padrões e magnitudes distintas, verificando que os parâmetros calibrados ainda concordam muito pouco com o regime de vazões do período de verificação.

A complexidade do processo de simulação faz com que haja erros na execução e há uma diversidade de fatores que podem ser responsáveis pelos resultados insatisfatórios na calibração. Dentre eles, está o fato de os valores de vazão terem sido obtidos diariamente, podendo haver um erro ao considerar o valor mensal como a média dos diários, que pode ter sido propagado.

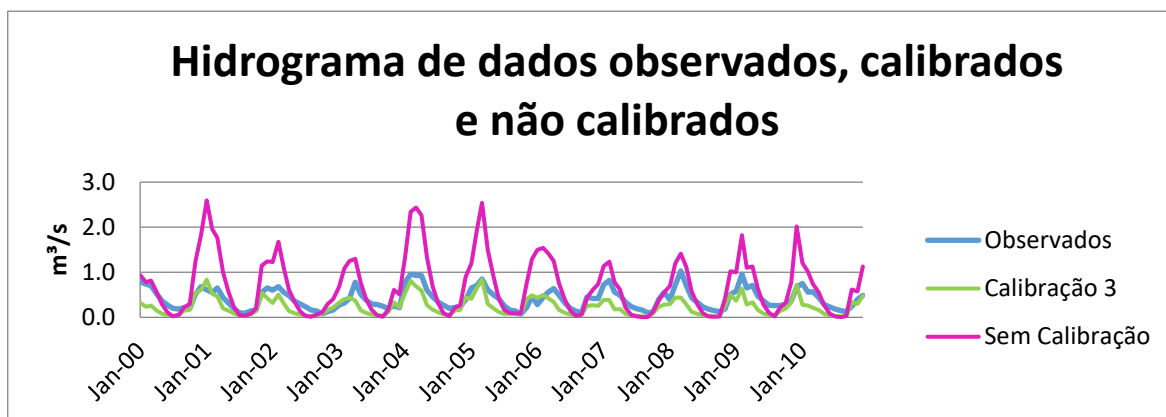


Figura 23 - Hidrograma de dados de vazão da bacia hidrográfica do Córrego Chapadinha

A etapa de verificação também foi realizada de forma automatizada por meio do SWAT-Cup. A ferramenta foi ajustada para a realização de 100 simulações para o período de 2010 a 2016. O NSE encontrado foi de  $-0.03$ , resultado considerado como insatisfatório, havendo pouca aderência entre os dados observados e simulados (Figura 24).

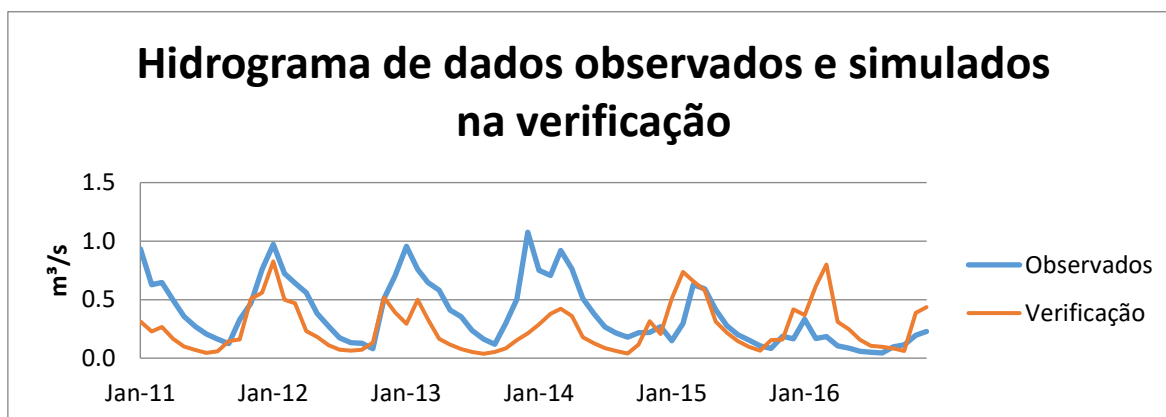


Figura 24 - Hidrograma de dados observados e simulados na etapa de verificação da Bacia Hidrográfica do Córrego Chapadinha

Foram ainda realizadas tentativas posteriores como forma de tentar melhorar os resultados obtidos da calibração, porém devido ao curto tempo para a execução da atividade e a complexidade atrelada ao processo, não foi possível encontrar um resultado de melhor performance.

### 5.1.5. Simulação hidrológica de cenários

Com o intuito de analisar o comportamento da bacia hidrográfica do Córrego Chapadinha em diferentes cenários, realizou-se a simulação hidrológica com diferentes ocupações do solo.

#### 5.1.5.1 Cenário Preservado

O cenário preservado foi simulado para um período antes do início de atividades antrópicas. Foi considerado que havia apenas área preservada (1954,62 ha), mata ciliar (104,10 ha) e rio (17,15 ha). A Figura 25 apresenta esse cenário.



Figura 25 - Bacia Hidrográfica do Córrego Chapadinha às vistas do Cenário Preservado



### 5.1.5.2 Condição atual

A condição atual aqui tratada foi considerada como a mesma encontrada no ano de 2013, ou seja, com o uso do solo apresentado a partir da base de dados utilizada. A figura 26 apresenta o mapa de ocupação do solo especificamente para a bacia hidrográfica do Córrego Chapadinha.

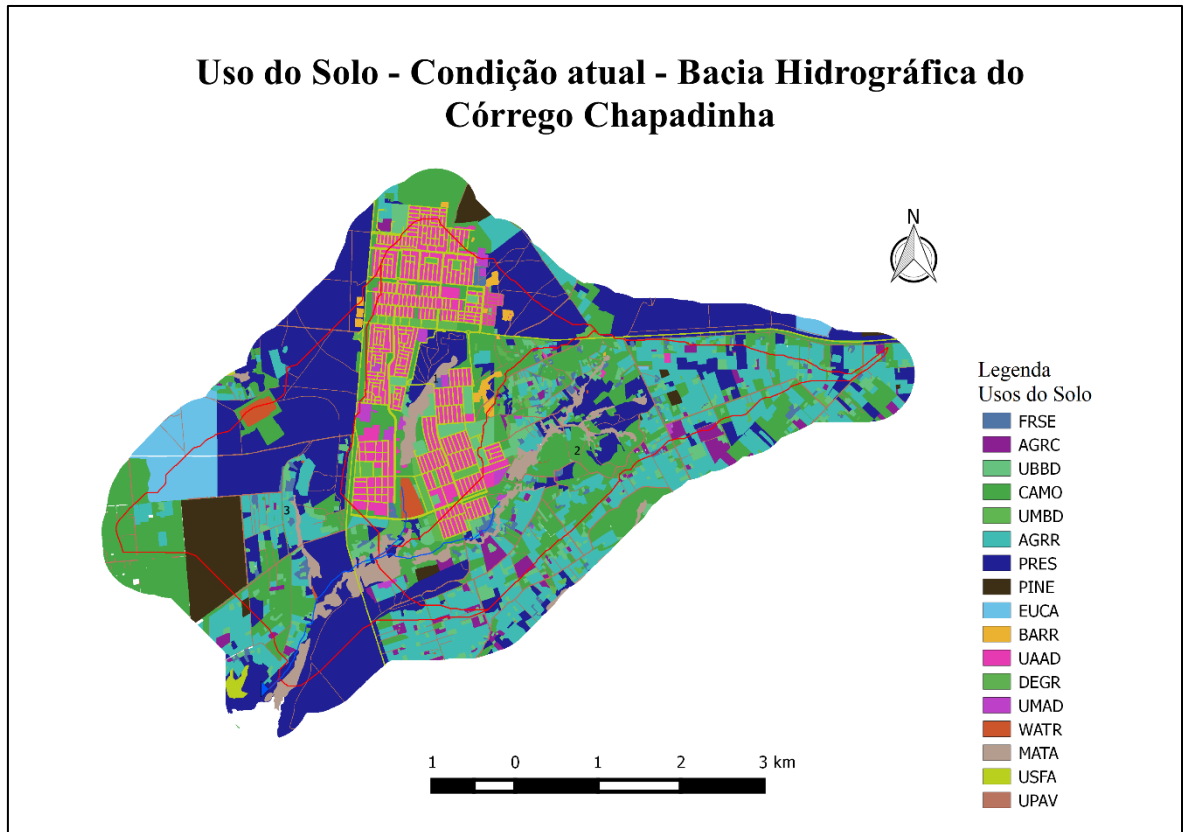


Figura 26 - Bacia do Córrego Chapadinha às vistas da Condição Atual

### 5.1.5.3 Cenário Atrópico

A Figura 26 apresenta o cenário antrópico, onde foi realizada a simulação de um possível futuro da área, em estágio avançado de ocupação, com total uso agrícola e urbano. A bacia é dividida em área agrícola (1311,26 ha), área urbana (699,56 ha) e área pavimentada (62,19 ha).



Figura 27 - Bacia Hidrográfica do Córrego Chapadinha às vistas do Cenário Antrópico

#### 5.1.5.4 Resultados dos Cenários

Como resultado obtido a partir das simulações realizadas com diferentes usos e ocupação do solo, têm-se os apresentados nas Figura 28, da variável FLOW\_OUT; e Figura 29, da variável EVAP. As duas variáveis estão representadas em  $m^3/s$ .

A variável FLOW\_OUT representa a água que sai à jusante da sub-bacia analisada, levando em consideração que a água introduzida pode sofrer processos como evaporação, infiltração, interseção pela vegetação, dentre outros; ou seja, o modelo calcula como FLOW\_OUT a água que passa pelo exutório após o balanço hídrico na área da sub-bacia.

A variável EVAP representa a evapotranspiração na região da sub-bacia analisada, complementando o processo de balanço hídrico realizado para o cálculo do parâmetro FLOW\_OUT, mencionado anteriormente.

Analisando as figuras, é possível perceber que, para as três variáveis, o cenário preservado se comportou de forma mais diferenciada se comparado as demais situações, pelo fato da bacia está sendo representada em um período de total preservação. Isso mostra que em uma situação onde o nível de vegetação nativa permanece preservada, os parâmetros do balanço hídrico estão condicionados a um comportamento natural equilibrado.

Em contrapartida, os resultados para a condição atual e para o cenário antrópico tiveram alta aderência entre si, em comparação ao cenário preservado. Isso demonstra, de acordo com a simulação, que no cenário atual a bacia hidrográfica do Córrego Chapadinha já possui alta densidade de área ocupada por urbanização e área agrícola. Porém, esse resultado não pode ser considerado representativo, já que a realidade da bacia é caracterizada por média densidade e atividade agrícola. Isso demonstra um erro na simulação, podendo ser justificado pela complexidade dos processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica.

Apesar da discrepância entre o cenário preservado dos demais no âmbito da variável e FLOW\_OUT, o resultado para a variável EVAP se mostrou bastante parecido entre as três situações de diferentes usos do solo, apresentando pouca correlação com o tipo de ocupação do terreno da bacia hidrográfica. Esse também foi um erro identificado na simulação, já que o valor da vazão para variável relacionada à evapotranspiração deve ser muito mais alto em um ambiente totalmente preservado se comparado à situações de alterações no uso do solo por atividades antrópicas.

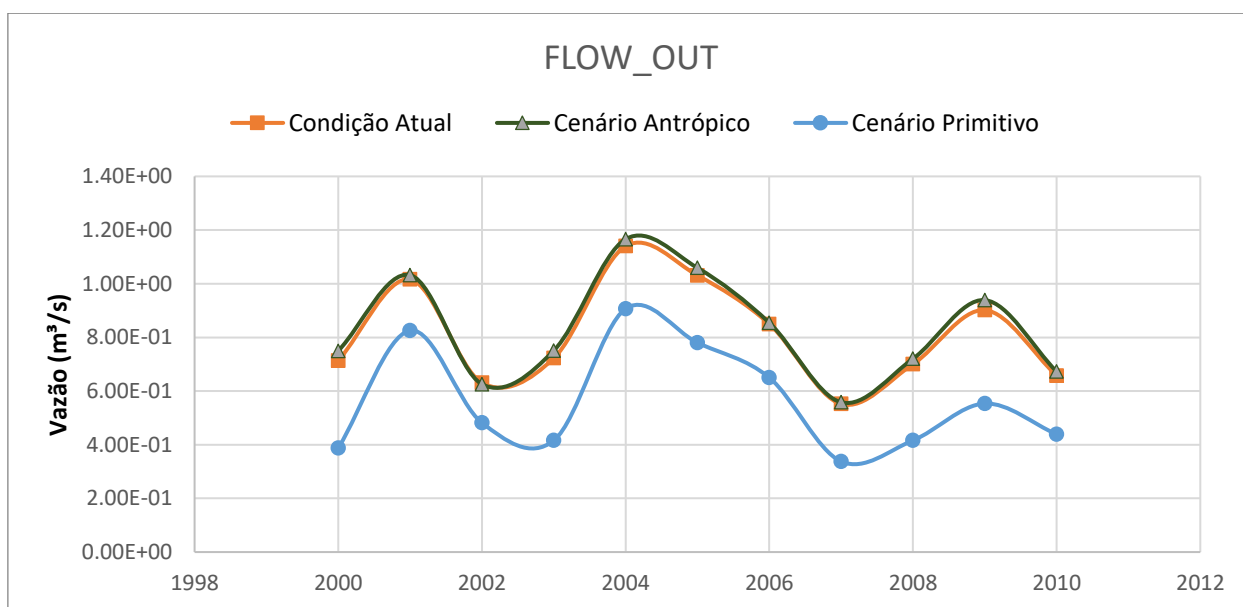


Figura 28 - Comparação dos resultados de FLOW\_OUT das três situações

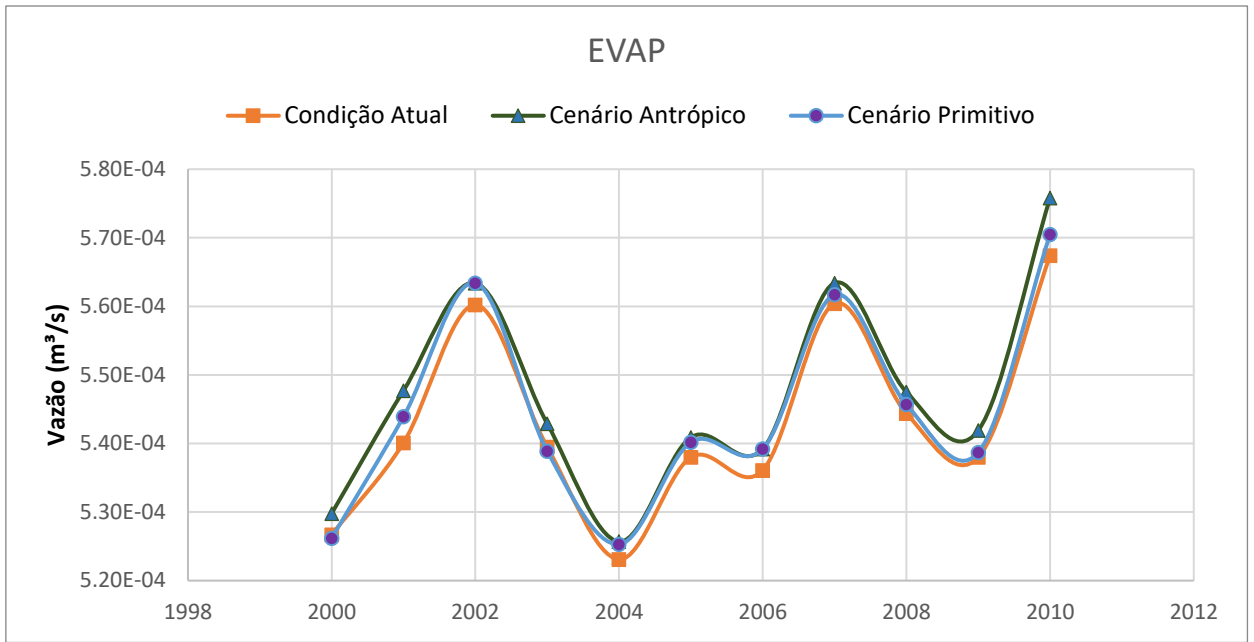


Figura 29 - Comparação dos resultados de EVAP das três situações

## 6. CONCLUSÕES

No presente trabalho procedeu-se a realização da modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Córrego Chapadinha utilizando o modelo SWAT na interface do software QGIS.

Foi possível concluir que a aplicação do modelo na interface QSWAT se mostrou bastante satisfatória no que se diz respeito à simulação e à geração de resultados, apresentando, inclusive, vantagens em relação à sua utilização no ArcSWAT. O fato do software ser disponibilizado publicamente é o ponto principal, porém, além disso, determinadas funções presentes no QGIS de forma gratuita só podem ser usufruídas no ArcGis com obtenção de licença.

A simulação inicial sem calibração gerou resultados superestimados quando comparados aos dados observados, onde os picos de vazão tiveram comportamento muito superiores aos da realidade. Além disso, os resultados nos períodos de recessão de todos os anos foram subestimados, chegando a zero unanimemente. Com isso, observou-se que é de grande importância a realização da calibração para o processo de aderência dos resultados.

Após o processo de análise de sensibilidade e calibração, utilizando o programa SWAT-Cup, o melhor valor da função objetivo encontrado ainda foi de  $NSE = 0,2$ , porém ainda é um valor considerado insatisfatório pela classificação de Moriasi (2007). Isso demonstra a importância da aplicação do processo de calibração por um maior número de vezes, para que haja uma melhora na aderência entre os resultados simulados e observados.

Em relação à análise das variáveis na geração de cenários, a variável FLOW\_OUT, no cenário preservado, apresentou resultado mais distinto dentre as três situações por ser o ambiente mais preservado, antes de haver intervenção humana. As situações de condição atual e do cenário antrópico, por serem caracterizados por média intensidade e alta intensidade de atividade antrópica, respectivamente, mostraram comportamento similar. Já em relação ao parâmetro EVAP, os três cenários apresentaram o comportamento consideravelmente igualitário.

Portanto, o presente estudo permitiu a obtenção do entendimento de que, como os processos de uso e ocupação do solo estão intimamente ligados ao balanço hídrico, é de grande importância que haja o controle da ocupação do solo para a preservação do meio,

bem como para a qualidade do abastecimento de água para consumo humano, em caso de o corpo hídrico ser utilizado para devido fim, como é o caso da bacia de estudo.

Sugere-se para pesquisas futuras a realização da simulação hidrológica incluindo parâmetros relacionados a cargas de nutrientes (N e P) na geração de cenários, com o intuito de analisar de forma mais abrangente os impactos causados pelas atividades antrópicas em uma bacia hidrográfica. Além disso, seria interessante que se fosse adquirido dados observados de décadas anteriores para serem utilizados na simulação, permitindo que se realizasse a calibração para um cenário mais preservado e, assim, apresentar a comparação dos cenários o mais próximo da realidade possível.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, K.C. (2013) **SWAT-CUP2012: 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, 103 p.

ABBASPOUR, K.C.; YANG, J.; MXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R. (2007) **Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT**. *Journal of Hydrology*, v. 333, p. 413–430.

ADRIOLO, M. V. et. al. (2008). **Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos**. Simpósio Brasileiro Sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, 6, 1-18.

AGUIAR, L.M. (2016). **Integração entre curvas de permanência de qualidade de água e modelagem hidrológica como suporte à gestão de recursos hídricos - Estudo de caso da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF**. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 69p.

ALVES SOBRINHO, T., OLIVEIRA, P. T. S. D., RODRIGUES, D. B. B., & AYRES, F. M. (2010). **Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM**.

APARECIDA LELIS, T., & Calijuri, M. L. (2010). **Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT**. *Ambiente & Água—An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 5(2).

ARNOLD, J. G. et. al. (1998). **Large area hydrologic modeling and assessment part II: model application**. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 91-101.

ARNOLD, J. G. KINITY, J. R. SRINIVASAN, R. WILLIAMS, J. R., HANEY, E.B. NEITSCH, S. L. (2012b) **Input/Output Documentation Version 2012**. Texas Water Resources Institute. p. 650.

ANA (2009). Agência Nacional de Águas. **Caderno de Recursos Hídricos 6: Implementação do enquadramento em bacias hidrográficas no Brasil**. Brasília.

ANA (2010). **Atlas de abastecimento urbano de água por estado**. vol. 2. Brasília. Agência Nacional de Águas, Engecorps/Cobrape.

ADASA (2011). **Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal. Ver. 3**. Brasília. Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal – ADASA.

ANA (2011). Agência Nacional de Águas. **CADERNOS DE CAPACITAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS**. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2012/CadernosDeCapacitacao1.pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2017.

ANA (2013). Agência Nacional de Águas. **Cunjuntura de Recursos Hídricos.**: Demanda e usos múltiplos. Disponível em:<[http://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/conjuntura/ANA\\_Conjuntura\\_Recursos\\_Hidricos\\_Brasil/ANA\\_CRHB\\_capitulo3.pdf](http://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/conjuntura/ANA_Conjuntura_Recursos_Hidricos_Brasil/ANA_CRHB_capitulo3.pdf)>. Acesso em: 26 out. 2017.

ANA (2017a). Agência Nacional de Águas. **Implementação do enquadramento em bacias hidrográficas no Brasil; Sistema nacional de informações sobre recursos hídricos.**

ANA (2017b). Agência Nacional de Águas. **AVALIAÇÃO DE QUALIDADE.** Disponível em: <<http://portalpnqa.ana.gov.br/avaliacao.aspx>>. Acesso em: 26 out. 2017.

ANA (2017c). Agência Nacional de Águas. **ENQUADRAMENTO.** Disponível em: <<http://portalpnqa.ana.gov.br/enquadramento-introducao.aspx>>. Acesso em: 26 out. 2017.

BLAINSKI, E. et. al. (2008). **Utilização do modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para estudos na microbacia hidrográfica do rio Araranguá/SC.** Taller Internacional Red Riegos–CYTED. Florianópolis SC.

BLAINSKI, E. et. al. (2010). **Aplicação do modelo hidrológico SWAT (Soil Water Assessment Tool) para a simulação da perda de solo e da disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica não instrumentada.** X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste.

BOURAOUI, F. et. al. (1997). **A distributed physical approach for surface-subsurface water transport modeling in agricultural watersheds.** Journal of Hydrology, 203(1-4), 79-92.

BRASIL. Constituição (1997). Lei nº 9433, de 08 de janeiro de 1997. **Política Nacional de Recursos Hídricos.** Acesso em: 23 de Outubro de 2017.

CAESB (2014). **SIAGUA-Sinopse do Abastecimento de Água do Distrito Federal.** Brasília-DF.

CARVALHO, Yara Maria C. et al. **A legislação brasileira de recursos hídricos com instrumentalização à gestão compartilhada.** Revista Tecnologia & Inovação Agropecuária, v. 1, n. 1, p. 112-134, 2008.

CARVALHO, Newton de Oliveira. (1994). **Hidrossedimentologia prática.** Rio de Janeiro. CPRM, 1994. 372 p. il.

CHRISTOFOLETTI, A. (1999). **Modelagem de sistemas ambientais.** Edgard Blücher. São Paulo, SP. 236 p.

CNRH. **Resolução n. 32, de 15 de outubro de 2003.** Anexo I. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2003. Acesso em: 23 de Outubro de 2017.

COSTA, G. D. A. (2015). **Conflitos socioambientais na dinâmica do uso do território na sub-Bacia do Córrego Chapadinha/Brazlândia/DF.**



DESARROLLO, B. I. (2005). **Buenas prácticas para la creación, mejoramiento y operación sostenible de organismos y organizaciones de cuenca**. Departamento de Desarrollo Sostenible División de Medio Ambiente. San José, Costa Rica.

DONADIO, N. M. M.; Galbiatti, J. A.; Paula, R. C. de. **Qualidade da água de nascentes com diferentes usos do solo na bacia hidrográfica do Córrego Rico**, São Paulo, Brasil. Engenharia Agrícola, v.25, n.1, p.115-125, 2005.

EASTER, K. William et al. (1993). **Water resources management. World Bank policy paper**. International Bank for Reconstruction and Development, Washington, DC (United States). 137p.

EMBRAPA. **Formação de Solos**. 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/solos/sibcs/formacao-do-solo>>. Acesso em: 02 jun. 2018.

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

LELIS, T. A et al. (2012). **Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 36, n. 2.

LIMA P.D., ZAKIA, M. J. B. (2000). **Hidrologia de matas ciliares**. *Edusp, Sao Paulo*, 33-44.

MACHADO, R. E., & VETTORAZZI, C. A. (2003). **Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins (SP)**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27(4).

MARINHO, G. M. F. et, al. (2013). **Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades**. *Revista de Ciências Ambientais*, 6(2), 35-47.

MINOTI, R. T. (2006) **Abordagens qualitativa e quantitativa de micro-bacias hidrográficas e áreas alagáveis de um compartimento do Médio Mogi-Superior/SP**. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). UFSCar, São Carlos, São Paulo, p. 247.

MINOTI, R. T. (2013). **Relatório do Programa Nacional de Pós-Doutorado CAPES**. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos – PTARH – Universidade de Brasília. 89 p.

MMA(a). **Águas Subterrâneas e o Ciclo Hidrológico**. 2017. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico>>. Acesso em: 25 out. 2017.

MMA(b). **Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**. 2017. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/sistema-nacional-de-gerenciamento-de-recursos-hidricos>>. Acesso em: 26 out. 2017.

MORIASI D. N; ARNOLD J. G; VAN LIEW M. W; BINGER R. L; HARMEL R. D; VEITH T. (2007) **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations**. Trans ASABE, v. 50, p. 885-900.

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). **Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009**. Texas Water Resources Institute.

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 - (Ver ainda), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 140p.

PORTO, M. F., & Porto, R. L. L. (2008). **Gestão de bacias hidrográficas**. Estudos avançados, 22(63), 43-60.

RENNÓ, C. D., & SOARES, J. V. (2007). **Conceitos básicos de modelagem hidrológica**. MEIRELLES, MSP Geomática: modelos e aplicações ambientais/Editores técnicos: Margareth Simões Penello Meirelles, Gilberto Câmara e Cláudia Maria de Almeida–Brasília: Embrapa Informação Tecnológica.

SANTANA D. P. **Manejo Integrado de Bacias Hidrográficas**. 2003. 63p. (Embrapa Milho e Sorgo.Documentos. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo.

SANTOS, L. L. (2009). **MODELOS HIDROLÓGICOS: Conceitos e Aplicações**. Revista Brasileira de Geografia Física, 2(3), 1-19.

SNIRH (2009). **Sistema Nacional de Recursos Hídricos no Brasil: arquitetura computacional e sistêmica**. Agência Nacional de Águas, Brasília, DF.

Silva, D. D.; Pruski, F. F.; Schaefer, C. E. G. R.; Amorim, R. S. S.; Paiva, K. W. N. **Efeito da cobertura nas perdas de solo em um Argissolo Vermelho-Amarelo utilizando simulador de chuva**. Engenharia Agrícola, v.25, n.2, p.409-419, 2005.

SOUZA, J. R. et. al. (2014). **A importância da qualidade da água e os seus múltiplos usos: caso Rio Almada, sul da Bahia, Brasil**. REDE-Revista Eletrônica do Prodepa, 8(01).

SRINIVASAN, R., & ARNOLD, J. G. (1994). **Integration of a basin-scale water quality model with GIS**. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 30(3), 453-462.

TEODORO, V. L. I., TEIXEIRA, D., COSTA, D. J. L., & FULLER, B. B. (2007). **O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local**. *Revista ReBraM*, 11(1), 137-156.

TIM, U. S., & Jolly, R. (1994). **Evaluating agricultural nonpoint-source pollution using integrated geographic information systems and hydrologic/water quality model**. Journal of environmental quality, 23(1), 25-35.

TUCCI, C. E. M. et al. (1993). **Modelos hidrológicos**. UFRGS.

TUCCI, C. E. M. et. al. (2005). **Modelos Hidrológicos**. UFRGS.2. ed. Porto Alegre. 678 p.

TUNDISI, J. G. (2003). **Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado**. *Ciência e Cultura*, 55(4), 31-33.

YASSUDA, E. R. (1993). **Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais**. *Revista de Administração pública*, 27(2), 5-18.

ZANETTI, S. S. **Modelagem hidrológica em microbacia hidrográfica da bacia do rio Paraíba do Sul. 2007. 135 p.** 2007. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Produção Vegetal)–Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes.