

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIBEIRÃO
DO GAMA UTILIZANDO O MODELO SWAT**

NILO MOREIRA MOTA

ORIENTADOR: SERGIO KOIDE

COORIENTADOR: SARA FERRIGO

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 DO CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

BRASÍLIA / DF: FEVEREIRO / 2015

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

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIBEIRÃO
DO GAMA UTILIZANDO O MODELO SWAT**

NILO MOREIRA MOTA

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:

PROF. SERGIO KOIDE, PhD (Universidade de Brasília)

(ORIENTADOR)

SARA FERRIGO, MSc (UnB/PTARH)

(COORIENTADOR)

PROF. RICARDO TEZINI MINOTI, Dr (Universidade de Brasília)

(EXAMINADOR INTERNO)

MARIA ELISA LEITE COSTA, MSc (UnB/PTARH)

(EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA/DF, 24 de Fevereiro de 2015.

FICHA CATALOGRÁFICA

MOTA, NILO

Modelagem Hidrológica da Bacia do Ribeirão do Gama utilizando o modelo SWAT [Distrito Federal]2014.

ix, 57 p.(ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2015)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|--------------------------|---------------------|
| 1. Modelagem hidrológica | 2. SWAT |
| 3. Calibração manual | 4. Ribeirão do Gama |

I. ENC/FT/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MOTA, N. M. (2015). Modelagem hidrológica da Bacia do Ribeirão do Gama. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 57 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Nilo Moreira Mota

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Modelagem Hidrológica da Bacia do Ribeirão do Gama utilizando o modelo SWAT.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2015

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.

Nilo Moreira Mota

nilomot@hotmail.com

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	11
2.1. OBJETIVO PRINCIPAL	11
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1. MODELOS HIDROLÓGICOS	12
3.1.1. <i>Modelos hidrológicos baseados em SIG</i>	15
3.2. Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool)	17
3.2.1. <i>Equacionamento</i>	19
3.2.2. <i>Escoamento Superficial</i>	20
3.2.2.1. <i>SCS curve number</i>	20
3.2.2.2. <i>Método de Green & Ampt</i>	21
3.2.3. <i>Evapotranspiração</i>	22
3.2.3.1. <i>Interceptação</i>	23
3.2.3.2. <i>Evapotranspiração potencial</i>	23
i. <i>Metodo Penman-Monteith</i>	24
ii. <i>Metodo Priestley-Taylor</i>	24
iii. <i>Método Hargreaves</i>	24
3.2.3.3. <i>Evapotranspiração real</i>	25
3.2.4. <i>Percolação</i>	25
3.2.5. <i>Fluxo de base</i>	26
3.2.6. <i>Fluxo lateral</i>	26
4. CARACTERIZAÇÃO DA BACIA	28
5. MATERIAIS E MÉTODOS	31
5.1. LEVANTAMENTO DE DADOS	31

5.2.	CALIBRAÇÃO	32
5.3.	CENÁRIOS	33
5.4.	PROGRAMAS COMPUTACIONAIS.....	33
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
6.1.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	34
6.1.1.	<i>Uso do solo</i>	34
6.1.2.	<i>Tipo de solo</i>	36
6.1.3.	<i>Relevo</i>	37
6.1.4.	<i>Precipitação</i>	39
6.1.5.	<i>Clima</i>	41
6.1.6.	<i>Vazão</i>	41
6.1.7.	<i>Calibração do Modelo</i>	42
6.1.7.1.	Calibração do Parâmetro CN2	44
6.1.7.2.	Calibração do Parâmetro Alpha_BF	45
6.1.8.	<i>Cenários</i>	46
6.1.8.1.	Primeiro Cenário.....	47
6.1.8.2.	Segundo Cenário.....	48
6.1.8.3.	Terceiro Cenário	50
6.1.8.4.	Quarto Cenário.....	52
7.	CONCLUSÃO.....	54
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CITADAS POR OUTROS AUTORES..	57

LISTA DE FIGURAS

Figura.1 - Combinação de informações para geração de mapas.....	16
Figura.2 - Esquema de incorporações feitas ao modelo SWAT.....	18
Figura 3 - Diferença entre infiltração real e infiltração considerada pelo modelo.....	22
Figura 4 - Representação do fluxo lateral pelo programa SWAT	27
Figura 5 – Representação da bacia do Paranoá	28
Figura 6 - Representação do uso do solo na bacia do Ribeirão do Gama nos anos de 1984,1994, 1998 e 2009.....	29
Figura 7 - Mapa de uso do solo da bacia do Ribeirão do Gama.....	34
Figura 8 - Mapa de tipo de solo da Bacia do Ribeirão do Gama.....	36
Figura 9 - Modelo Digital de Elevação da bacia do Ribeirão do Gama e entorno.....	38
Figura 10 - Curvas de nível da bacia do Ribeirão do Gama e entorno.....	38
Figura 11 - Mapa de declividade da bacia do Ribeirão do Gama.....	39
Figura 12 - Representação das estações pluviométricas na bacia.....	40
Figura 13 - Hidrograma do período utilizado no SWAT.....	41
Figura 14 - Falha do hidrograma de valores diários.....	42
Figura 15 - Comparação entre os valores de vazão simulados e medidos antes da calibração.....	43
Figura 16 - Comparação entre os valores de vazão simulados e medidos depois da calibração do CN2.....	45
Figura 17 - Comparação entre os valores de vazão simulados e medidos depois da calibração do Alpha_BF.....	46
Figura 18 - Disposição dos cenários futuros na bacia do Ribeirão do Gama.....	47
Figura 19 - Comparação entre valor de uso do solo atual e primeiro cenário.....	48
Figura 20 - Plano de ocupação para bacia do Ribeirão do Gama	49
Figura 21 - Comparação entre valor de uso do solo atual e segundo cenário.....	50
Figura 22 - Exemplo de ocupação 1.....	51

Figura 23 - Exemplo de ocupação 2.....	51
Figura 24 - Comparação entre valore de uso do solo atual e terceiro cenário.....	52
Figura 25 - Comparação entre valore de uso do solo atual e quarto cenário.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização das classes do mapa de uso do solo.....	35
Tabela 2 - Coordenadas das estações pluviométricas usadas.....	40
Tabela 3 - Tabela das etapas de calibração do CN2.....	44
Tabela 4 - Tabela das etapas de calibração do Alpha_BF.....	45

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e a busca por melhorias na qualidade de vida, têm levado a uma maior demanda de recursos. Essa busca resultou na ocupação de novas áreas, que estão profundamente associadas a mudanças no meio ambiente. O ser humano causa diversos tipos de impactos negativos às áreas que ocupa, podendo ser destacado: a remoção da mata nativa da região, as alterações da qualidade dos recursos hídricos próximos, e ainda as alterações no ciclo hidrológico da bacia.

Ao aprendermos sobre a importância desses impactos antrópicos, incorporou-se a necessidade de avaliação da interferência do ser humano e de seus projetos; pois, dependendo da sua escala, são responsáveis por uma grande variedade de problemas. Ao longo de vários anos estudando os impactos causados pelo ser humano, desenvolveram-se novas ferramentas como os modelos hidrológicos, que buscam prever o comportamento do ciclo hidrológico, podendo avaliar como as interferências do homem vão impactar o ciclo da água. Na tentativa de antever esses impactos, são feitas previsões de cenários futuros.

A modelagem hidrológica é uma ferramenta que permite estimar impactos futuros de diferentes cenários; e, dessa forma, prever o comprometimento dos recursos hídricos de uma bacia. Esse tipo de avaliação fornece subsídios para que se possa fazer um planejamento racional da ocupação da bacia e da utilização de seus recursos. Com essa finalidade e avaliando as características e problemas da bacia estudada, foi escolhido o modelo SWAT como suporte metodológico, por se tratar de um modelo com crescente uso na conjuntura internacional.

A área a ser estudada é a bacia do Ribeirão do Gama, situada a sudoeste na bacia do Paranoá. A sua escolha deve-se ao fato de que futuramente, a bacia do Paranoá, da qual a bacia do Ribeirão do Gama faz parte, se tornará fonte complementar de abastecimento público de água, evidenciando assim a sua importância para o Distrito Federal. As perspectivas de crescimento da ocupação dessa região previstas em planos, torna imperativo que sejam efetuadas tentativas de previsão da influência das atividades humanas sobre o meio ambiente. Tais previsões constituem o motivo da realização deste trabalho, que é a tentativa de previsão dos impactos gerados pelo crescimento populacional e suas consequências sobre os recursos hídricos da bacia.

Este trabalho apresenta no capítulo 2 os objetivos do trabalho, no capítulo 3 uma breve fundamentação teórica, no capítulo 4 a caracterização da bacia estudada, no capítulo 5

os materiais e métodos para o desenvolvimento do trabalho, no capítulo 6 os resultados e a discussão e no capítulo 7 a conclusão do trabalho.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar as alterações nas vazões provocadas pelos diferentes planos de ocupação da bacia do Ribeirão do Gama, utilizando o modelo SWAT como ferramenta de previsão dessas alterações.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Verificar a potencialidade do uso do modelo SWAT para a simulação de diferentes cenários de ocupação delineados para a bacia do Ribeirão do Gama, sub-bacia do lago Paranoá, em diferentes horizontes.

Quantificar os impactos dos diferentes cenários de ocupação nas vazões da bacia do Ribeirão do Gama.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. MODELOS HIDROLÓGICOS

Modelo é a representação, através de equações matemáticas, de um sistema natural; e possui uma versatilidade para que possa ser alterado para outros tipos de situações em um mesmo sistema ou até mesmo alterado para outros sistemas (Barth, 1987 apud Ferraz *et al.*, 1999).

Ao utilizar modelos nós podemos compreender melhor ou explicar fenômenos naturais, e em algumas condições, é possível fazer previsões de forma determinística ou probabilística (Haan et al., 1982).

Devido a natureza complexa dos processos de precipitação-vazão, determinados por uma alta interconectividade entre os processos da água, energia e vegetação em várias escalas espaciais, hidrólogos se baseiam em seus próprios conhecimentos sobre o sistema, ganhos com suas interações, observações e experimentos com o sistema. Esse processo é conhecido com modelagem de percepção. A percepção de um modelo hidrológico leva a uma grande variedade de formas de classificação de um modelo precipitação-vazão, de determinísticos a estocásticos, de conceituais (caixa branca) a empíricos (caixa preta) e de modelos distribuídos a concentrados (Beven, 2001 apud Sorooshian et al., 2009)

Com relação aos parâmetros de entrada, os modelos se classificam em concentrados ou distribuídos: modelos concentrados são modelos cujos parâmetros de entrada variam somente com o tempo, modelos distribuídos têm seus parâmetros relacionados à localização, variando os valores conforme varia o espaço (Ferraz *et al.*, 1999).

A diferenciação entre modelos estocásticos ou determinísticos está associada às respostas que podem ser obtidas pelo modelo, onde modelos determinísticos são aqueles que para um dado de entrada, sempre se obtém a mesma saída, modelos estocásticos possuem uma relação probabilística entre os valores de entrada e os de saída, sendo possível obter resultados diferentes para um mesmo valor de entrada (Ferraz *et al.*, 1999).

Com relação às equações utilizadas pelo modelo, é possível classificá-los em conceituais ou empíricos: modelos conceituais incluem um conjunto de leis ou princípios teóricos e um conjunto de enunciados de caráter empírico. Um modelo empírico omite o conjunto de leis e é na verdade uma representação dos dados. Essa distinção se quebra quando se considera um modelo que inclua somente algumas, mas não todas, as leis necessárias. Todos os modelos conceituais simplificam o sistema físico e, por isso, são de certa forma incorretos (Haan et al., 1982).

Como exemplo de modelos, existem modelos de precipitação-vazão que calculam as vazões de uma bacia hidrográfica a partir de uma série de dados de precipitação. São usados como complementação, na construção de hidrogramas de dimensionamento, previsões de cheias em tempo real e avaliação do solo na bacia hidrográfica. Modelos vazão-vazão, que permitem o cálculo de vazões a jusante a partir de vazões de um ponto a montante, possibilitando a extensão de séries de vazão, a avaliação de modificações ocorridas no rio e previsão de vazões (Ferraz *et al.*, 1999).

Todos os modelos de precipitação-vazão e modelos hidrológicos são uma caracterização simplificada do sistema no mundo real. Uma grande variedade de modelos precipitação-vazão são atualmente utilizados por pesquisadores e profissionais, no entanto as aplicações desses modelos são dependentes dos propósitos para o qual a modelagem é feita. Muitos modelos de precipitação-vazão são meramente utilizados para proposta de pesquisa, na tentativa de aumentar o conhecimento sobre os processos hidrológicos que governam a natureza. Outros tipos de modelos são desenvolvidos e empregados como ferramentas para simulação e predição, almejando poder dar subsídios para tomadas de decisão, de modo que se atinja a decisão mais efetiva para o planejamento e operação, levando-se em consideração as interações físicas, ecológicas, econômicas e sociais. Como exemplo de algumas implicações para o último tipo de modelos de precipitação-vazão são: previsão e aviso de inundações em tempo real, estimar a frequência de inundações, avaliação de impactos por alteração no clima ou uso do solo e gerenciamento integrado de bacias hidrográficas (Sorooshian et al., 2009).

Por volta dos anos 60, com o desenvolvimento dos computadores, foram desenvolvidos também, os primeiros modelos que representavam o comportamento de bacias hidrográficas por meio de equações empíricas. O Stanford IV (Crawford & Linsley, 1966 apud Ferraz *et al.*, 1999) foi um dos primeiros a obter sucesso e representava a

maioria dos processos da transformação de precipitação em vazão, além de poder ser utilizado tanto em bacias urbanas como rurais com diferentes tamanhos de coberturas. Segundo Ferraz (1999), James introduziu uma melhora no modelo com rotinas de otimização automática, assim como o Texas Watershed Model (Claborn & Moore, 1970 apud Ferraz *et al.*, 1999), uma modificação do Stanford IV na parte de depressão do solo, infiltração e variação da umidade.

Em 1969 foi desenvolvido um modelo determinístico de simulação digital hidrológica, transformando chuva em vazão em nível diário. O modelo simula o ciclo hidrológico através da distribuição de lâmina precipitada na bacia em vários níveis de armazenamento, simulados por reservatórios hipotéticos, que são inter-relacionados por teor de umidade do solo da bacia (Ferraz *et al.*, 1999).

Segundo Ferraz (1999), Muños e Tucci em 1974, utilizaram um algoritmo de separação do escoamento desenvolvido por Berthelot em 1970, para a criação do modelo IPH-II, modelo do tipo precipitação-vazão. O modelo foi aplicado nas bacias dos rios Capivari, Cauca e Chasqueiro, no Estado do Rio Grande do Sul. O programa representa os principais fenômenos do processo entre a precipitação e vazão, como perda por interceptação (vegetação e depressões) e evaporação, infiltração e escoamento superficial e subterrâneo.

O modelo SMAP, (Lopes, 1982 apud Ferraz *et al.*, 1990), é um modelo conceitual e possui uma estrutura simples e sua separação de escoamento é baseada nos parâmetros do U.S.Soil Conservation (Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos da América), usados na determinação de cheias de um projeto.

Atualmente existe uma geração de modelos distribuídos, sendo SHE (Jonch-Clausen, 1979 e Beven *et al.*, 1980 apud Ferraz *et al.*, 1990) e o IHDM (Morris, 1985 apud Ferraz *et al.*, 1990) dois modelos conceituais entre eles. O modelo SHE usa uma representação unidimensional da rede de canais, uma representação bidimensional do escoamento superficial, um componente vertical na zona insaturada e um representação bidimensional na zona saturada. O modelo IHDM subdivide a superfície ao longo de linhas de declive topográfico, usando uma representação unidimensional do fluxo, um componente unidimensional no encontro de canais e bidimensional na camada sub-superficial. Dessa forma, o modelo apresenta uma vantagem por simplificar os cálculos

do movimento realizado na interface entre zona saturada e insaturada, o que não acontece no modelo SHE.

O modelo Topmodel (Beven & Kirkby, 1979 apud Ferraz *et al.*, 1990) tem como função a previsão de vazões em chuvas de curta duração. É possível a utilização deste para avaliar o efeito do tamanho da grade do mapa de terreno digitalizado. O modelo prediz a umidade do solo e a vazão com base na topografia e nas propriedades do solo. Por utilizar para análise topográfica um Modelo Digital de Elevação, esse modelo foi o precursor dos modelos baseados em SIG.

3.1.1. Modelos hidrológicos baseados em SIG

Um software de Sistema de Informações Geográficas é utilizado para armazenar e manipular dados e informações espacialmente distribuídas em um computador. Ele possui módulos para realização de operações analíticas, sobreposição e cruzamento de informações. Por trabalhar com um grande banco de dados, permite a associação de atributos e a realização de consultas, possibilitando a análise e modelagem de informações georreferenciadas (Ferraz, 1996).

A modelagem hidrológica tem levado a bons resultados com simulações de fatores temporais, mas nos quais a desagregação espacial da área de estudo é relativamente simples, ou mesmo considerando as propriedades espaciais uniformes. O uso de modelos hidrológicos espacialmente distribuídos torna possível o aumento do número das unidades espaciais e seu detalhamento, permitindo modelagens em nível regional e até continental (Maidment, 1993).

Os softwares de SIG têm se destacado mundialmente em aplicações de modelagem hidrológica, em que seu objetivo é a determinação de parâmetros hidrológicos a partir da análise da topografia do terreno, a partir do Modelo Digital de Elevações e das características da cobertura do solo. Alguns modelos podem ser executados totalmente dentro de um SIG, em casos em que a variabilidade temporal não seja necessária ou sejam consideradas médias anuais.

O SIG proporciona a integração, em uma única base de dados, de informações espaciais provenientes de dados cartográficos, censitários, cadastrais, fotografias aéreas, imagens de satélite, redes e Modelo Digital de Elevações. Por meio de algoritmos, o SIG é capaz de combinar essas informações para consultar, recuperar e visualizar o conteúdo da base de dados e gerar mapas temáticos como mostra a figura 1.

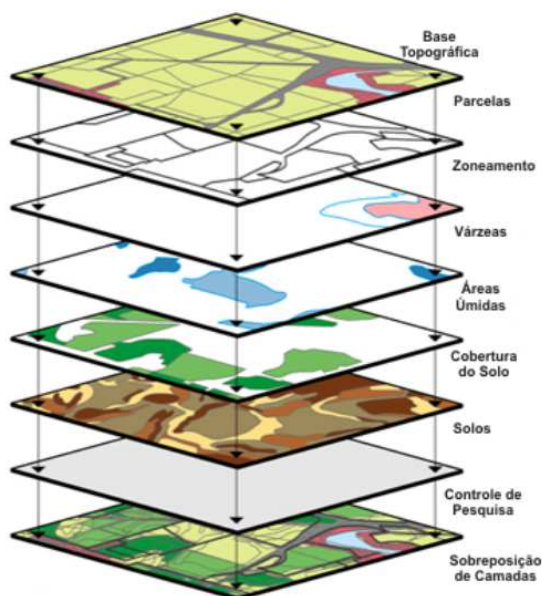


Figura 1 - Combinação de informações para geração de mapas (<<http://www2.transportes.gov.br/bit/01-inicial/sig.html>> Acesso em:14/07/2014)

Existem duas formas de representar elementos espaciais no SIG, uma vetorial e a outra matricial. Na representação vetorial, os limites da figura são definidos por uma série de pontos de contorno referenciados, que juntos formam vetores que a representam graficamente. A cada figura é atribuído um número identificador que pode ser associado a seus atributos. No formato matricial, a área em estudo é subdividida em uma rede de células nas quais são gravadas as características da superfície específica naquele ponto. A cada célula é atribuído um valor numérico, que pode representar o identificador de uma característica, podendo ser um atributo quantitativo como qualitativo (Ferraz *et al.*, 1999).

Uma ferramenta de um software SIG é o Modelo Digital de Elevações (MDE), que é uma representação da distribuição espacial das cotas altimétricas do terreno estudado. A sua geração é feita a partir da interpolação de pontos topográficos ou curvas de nível do terreno, utilizando-se para isso rotinas computacionais apropriadas do SIG.

A partir dos MDE pode-se calcular volumes, áreas, desenhar perfis e seções transversais, gerar imagens sombreadas ou em níveis de cinza, gerar mapas de declividade e exposição, gerar fatiamentos em intervalos desejados e perspectivas tridimensionais.

O SIG proporciona ainda a visualização da imagem sombreada em projeção, através da projeção dos dados em três dimensões com a possibilidade de alteração da posição do observador, definindo o efeito de elevação da superfície e a imagem de cobertura, que pode ser uma imagem de satélite (Ferraz *et al.*, 1999).

Outra possibilidade é a geração de uma imagem de declividades, que é a inclinação da superfície do terreno em relação ao plano horizontal.

Considerando um MDE de dados altimétricos extraídos de uma carta topográfica e traçando um plano tangente a essa superfície num determinado ponto p, a declividade nesse ponto corresponde à inclinação desse plano em relação ao plano horizontal.

Uma imagem de declividades pode ser posteriormente reclassificada, gerando imagens de classes de declividades, de acordo com a conveniência do estudo a ser realizado (Ferraz *et al.*, 1999).

3.2. Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

O SWAT é um modelo matemático baseado nos processos físicos, em que a bacia é dividida em unidades de respostas hidrológicas semelhantes. Essas unidades são classificadas de acordo com o tipo de solo, o uso do solo e a sua declividade. Os grandes componentes do modelo são a hidrologia, o clima, a erosão do solo, os nutrientes, a temperatura do solo, o crescimento vegetal, o gerenciamento de pesticidas agrícolas e o comportamento do corpo hídrico (Betrie *et al.*, 2011).

O modelo é uma continuação do trabalho feito pelo USDA-ARS e que ao longo do tempo teve a incorporação de diversos modelos como mostra a figura 2 (Arnold *et al.*, 2012).

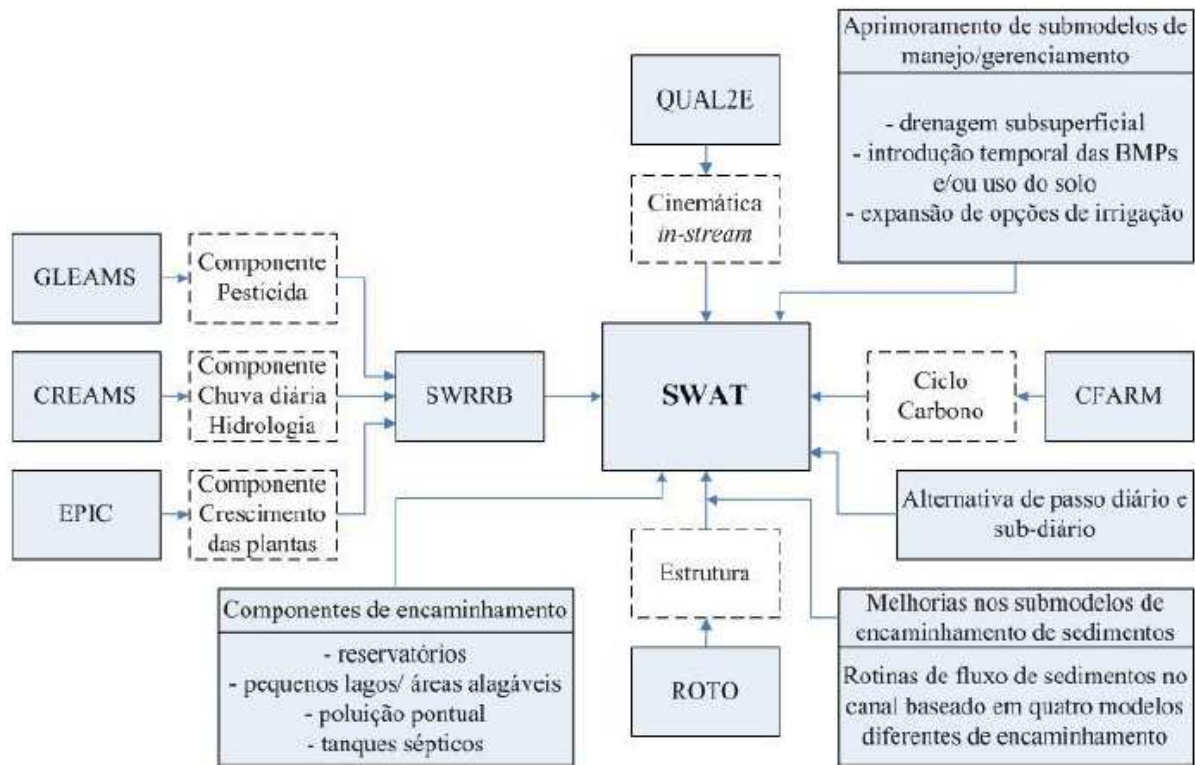


Figura.2 - Esquema de incorporações feitas ao modelo SWAT (Gassman et al.,2007, Arnold et al.,2012 apud Ferrigo 2014)

O modelo opera em escala diária e tem como função a previsão dos impactos gerados pela forma de utilização do solo de uma bacia. O balanço hídrico tem uma enorme importância no modelo, pois seus resultados impactam diretamente no crescimento da vegetação, e na movimentação de sedimentos, nutrientes, pesticidas e patógenos. O ciclo hidrológico é influenciado pelos dados climáticos em que são inseridos precipitação diária, temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. O SWAT é capaz de ler esses dados diretamente de arquivos específicos ou pode gerar dados a partir de estatísticas mensais. Os processos hidrológicos do SWAT abrangem reserva superficial, escoamento superficial, infiltração, evapotranspiração, fluxo lateral, drenagem subsuperficial, redistribuição de água no perfil do solo, consumo de água por bombeamento, fluxo de retorno e recarga de lençóis a partir de corpos hídricos (Arnold et al.,2012).

O SWAT usa apenas um modelo de simulação de crescimento de vegetação para todos os tipos de vegetação, onde se diferencia entre plantas perenes ou anuais. Esse modelo é utilizado para calcular o consumo de água e nutrientes na zona subsuperficial atingida

pelas raízes de plantas, a geração de biomassa e a transpiração proveniente da vegetação.

O modelo utiliza a equação universal de perda de solo modificada (Williams e Berndt, 1977 apud Arnold *et al.*, 2012) como forma de previsão de sedimentos gerados pelo uso de solo da bacia.

O SWAT também prevê a movimentação e transformação das diferentes espécies de nitrogênio, fósforo, pesticidas e sedimentos na bacia (Arnold *et al.*, 2012).

Após obter as cargas de água, sedimentos, nutrientes e pesticidas, provenientes da fase terrestre que chegam ao canal principal, as cargas são propagadas através dos canais e reservatórios dentro da bacia. O balanço hídrico dos reservatórios inclui vazão de entrada, vazão de saída, precipitação na superfície, evaporação e infiltração pelo fundo do reservatório e possíveis desvios (Arnold *et al.*, 2012).

3.2.1. Equacionamento

O ciclo hidrológico simulado pelo SWAT é baseado na equação de balanço hídrico:

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

Em que SW_t é o conteúdo final de água no solo (mm), SW_0 é o conteúdo inicial de água no dia i (mm), t é o tempo (dias), R_{day} é a quantidade de precipitação no dia i (mm), Q_{surf} é a quantidade de escoamento superficial no dia i (mm), E_a é a quantidade de evapotranspiração no dia i (mm), w_{seep} é a quantidade de água entrando na zona vadosa pela superfície do solo no dia i (mm), e Q_{gw} é quantidade de água infiltrada que retorna ao escoamento superficial (mm).

A subdivisão da bacia permite que o modelo utilize diferentes evapotranspirações para diferentes tipos de vegetações e solos. O escoamento superficial é obtido separadamente para cada unidade de resposta hidrológica e é propagado para obter o escoamento superficial total da bacia, dessa forma aumentando a precisão e levando a uma melhor descrição física do balanço hídrico (Neitsch *et al.*, 2009).

3.2.2. Escoamento Superficial

Em situações de solo seco a taxa de infiltração é muito alta, mas a medida que o solo vai ganhando umidade a taxa de infiltração diminui. O escoamento superficial ocorre quando a altura precipitada supera a taxa de infiltração no solo.

Segundo Arnold (2012), existem dois métodos de estimativa de escoamento superficial no SWAT, o SCS *curve number procedure* (SCS, 1972) e o Green & Ampt *infiltration method* (1911).

3.2.2.1. SCS *curve number*

A equação de escoamento superficial SCS é um modelo empírico que foi desenvolvido para realizar estimativas confiáveis de escoamento superficial para diferentes tipos de uso do solo e diferentes tipos de solo (Rallison e Miller, 1981 apud Arnold *et al.*, 2012).

A equação principal do método SCS é (SCS, 1972):

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (2)$$

em que Q_{surf} é o escoamento superficial acumulado (mm), R_{day} é a altura de precipitação do dia (mm), I_a é a abstração inicial devido ao armazenamento na superfície, interceptação e a infiltração em preferência do escoamento (mm), e S é o parâmetro de retenção (mm).

O parâmetro de retenção (S) varia de acordo com o tipo de solo, uso do solo, a forma de gerenciamento do solo, declividade e temporariamente devido a mudanças na quantidade de água no solo. O parâmetro de retenção é definido pela equação:

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

em que CN é o número da curva para o dia. O número da curva é regido em função da permeabilidade, do uso do solo e das condições anteriores de água no solo. Existem três tipos de condições antecedentes de umidade no solo, a primeira seca, a segunda umidade média, e a terceira molhada, cada uma regida pelo seu respectivo número da curva alterado a partir do valor de CN para umidade média:

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20(100 - CN_2)}{(100 - CN_2 + \exp[2,533 - 0,0636(100 - CN_2)])} \quad (4)$$

$$CN_3 = CN_2 \cdot \exp [0,00673(100 - CN_2)] \quad (5)$$

3.2.2.2. Método de Green & Ampt

O método de Green e Ampt foi desenvolvido para prever a infiltração assumindo excesso de água na superfície (Green & Ampt, 1911 apud Arnold *et al.*, 2012). A equação assume que o perfil do solo é homogêneo e que os antecedentes de umidade são distribuídos no perfil do solo uniformemente. A medida que a água infiltra, o modelo assume que o solo por onde já houve infiltração está totalmente saturado. É possível ver a diferença entre a infiltração real e a infiltração segundo o programa na figura 3.

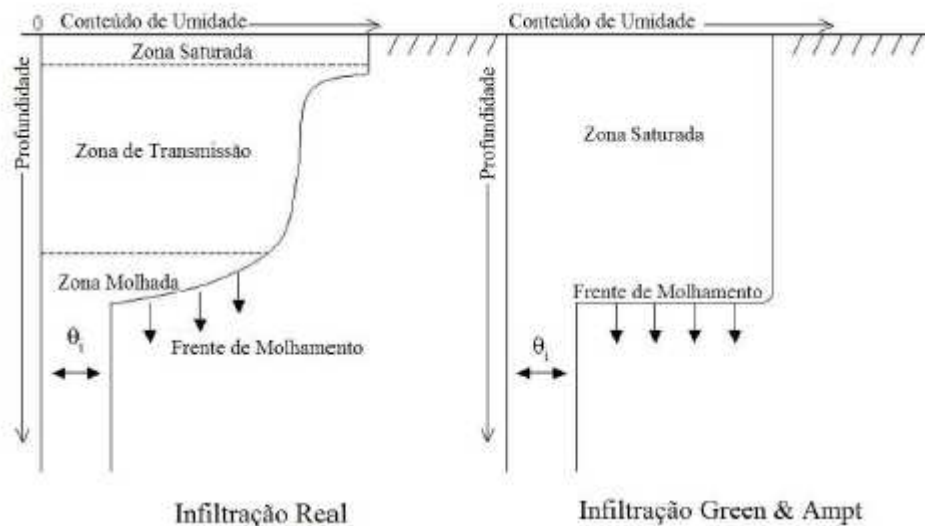


Figura 3 - Diferença entre infiltração real e infiltração considerada pelo modelo (Adaptado de Neitsch et al., 2009 apud Ferigo 2014)

Em 1973 Mein e Larson desenvolveram uma metodologia para determinar o tempo de infiltração de reservatórios com o auxílio da equação de Green e Ampt, obtendo a taxa de infiltração Green-Ampt e Mein-Larson, definida como:

$$f_{inf,t} = K_e \times \left(\frac{\psi_{wf} \times \Delta\theta_v}{F_{inf,t}} \right) \quad (6)$$

em que $f_{inf,t}$ é a taxa de infiltração no tempo t (mm/hora), K_e é a condutividade hidráulica efetiva (mm/hora), ψ_{wf} é o potencial matricial da frente de molhamento, $\Delta\theta_v$ é a variação volumétrica no conteúdo de umidade na frente de molhamento (mm/mm), e $F_{inf,t}$ é a infiltração acumulada no tempo t (mm).

3.2.3. Evapotranspiração

A evapotranspiração é a união de todos os processos na superfície terrestre da transformação da água no estado líquido em vapor, o que inclui evaporação do topo das plantas, transpiração, sublimação e evaporação do solo.

A diferença entre a precipitação e a evapotranspiração nos dá a quantidade de água disponível para o uso e gestão do ser humano. É muito importante uma estimativa precisa da evapotranspiração (Arnold *et al.*, 2012).

3.2.3.1. Interceptação

A cobertura das plantas tem uma importância significativa no ciclo da água. À medida que chove, as folhas interceptam as gotas de chuva diminuindo sua energia e consequentemente seu potencial erosivo, além de deter uma porção da precipitação. A influência das plantas nesses processos está diretamente relacionada à densidade da cobertura vegetal e à morfologia de cada espécie (Arnold *et al.*, 2012).

O SWAT permite que a quantidade máxima de água retida pelas plantas varie de dia pra dia em função do índice de área foliar:

$$can_{day} = can_{max} \times \frac{LAI}{LAI_{max}} \quad (7)$$

Onde can_{day} é a quantidade máxima de água armazenada pela vegetação em um dado dia (mm), can_{max} é a quantidade de água armazenada pela vegetação quando a vegetação esta totalmente desenvolvida (mm), LAI é o índice de área foliar em um dado dia, e LAI_{max} é o índice máximo da área foliar da planta.

Em momentos de chuva, o modelo funciona de modo que o armazenamento de água pela vegetação é totalmente preenchido antes que a água possa atingir o solo (Arnold *et al.*, 2012).

3.2.3.2. Evapotranspiração potencial

Segundo Arnold 2012, existem três métodos de determinação da evapotranspiração potencial no SWAT: o método Penman-Monteith, o método Priestley-Taylor e o método de Hargreaves.

i. Método Penman-Monteith

A equação de Penman-Monteith é :

$$\lambda E = \frac{\Delta \times (H_{net} - G) + \rho_{air} \times c_p \times [e_z^0 - e_z]/r_a}{\Delta + \gamma \times (1 + \frac{r_c}{r_a})} \quad (8)$$

em que λE é a densidade de fluxo do calor latente (MJ/m².d), E é a taxa de evaporação (mm/d), Δ é a declividade da curva pressão-temperatura de saturação de vapor de água, H_{net} é a taxa de radiação líquida (MJ/m².d), G é a densidade do fluxo de calor omitido pelo solo (MJ/m².d), ρ_{air} é a densidade do ar (kg/m³), c_p é o calor específico da água à pressão constante (MJ/kg.°C), e_z^0 é a pressão de saturação do vapor de água a uma altura z (kPa), e_z é a pressão de vapor de água em uma altura z (kPa), γ é a constante psicrométrica (kPa/°C), r_c é a resistência estrutural das plantas (s/m), e r_a é a resistência aerodinâmica (s/m) (Arnold *et al.*, 2012).

ii. Método Priestley-Taylor

A equação de Priestley-Taylor é uma simplificação para situações onde a área da superfície se encontra úmida, a equação é:

$$\lambda E_0 = \alpha_{pet} \times \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times (H_{net} - G) \quad (9)$$

onde λ é o calor latente de vaporização (MJ/kg), E_0 é a evapotranspiração potencial (mm/d), α_{pet} é um coeficiente ($\alpha_{pet} = 1,28$) (Arnold *et al.*, 2012).

iii. Método Hargreaves

A equação do método de Hargreaves é:

$$\lambda E_0 = 0,0023 \times H_0 \times (T_{max} - T_{min})^{0,5} \times (T_{av} + 17,8) \quad (10)$$

em que λ é o calor latente de vaporização (MJ/kg), E_0 é a evapotranspiração potencial (mm/d), H_0 é a taxa de radiação extraterrestre (MJ/m².d), T_{max} é a temperatura máxima do ar em um dado dia (°C), T_{min} é a temperatura mínima em um dado dia (°C), e T_{av} é média da temperatura do ar em um dado dia (°C) (Arnold *et al.*, 2012).

3.2.3.3. Evapotranspiração real

Uma vez calculada a evapotranspiração potencial, a evapotranspiração real é estimada. O SWAT calcula primeiramente a evaporação da água interceptada pela vegetação, e posteriormente a quantidade máxima de transpiração e a quantidade máxima de sublimação/evaporação do solo. Então é calculada a sublimação/evaporação do solo real, tornando possível obter a evapotranspiração real. Se houver neve na unidade resposta hidrológica, então a sublimação vai ocorrer, se não houver neve, então haverá evaporação do solo (Arnold *et al.*, 2012).

3.2.4. Percolação

A percolação é calculada para todas as camadas do perfil do solo. A água percola quando a quantidade de água na camada excede sua capacidade de campo e a camada abaixo não esteja saturada. Quando a camada está congelada, não é calculado fluxo para fora da camada (Arnold *et al.*, 2012).

A quantidade de água que se move de uma camada para a camada abaixo é calculada pela equação 11:

$$w_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \times \left(1 - \exp\left[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}}\right]\right) \quad (11)$$

onde $w_{perc,ly}$ é a quantidade de água que percola para a camada abaixo em um dado dia (mm), $SW_{ly,excess}$ é a quantidade drenável de água na camada em um dado dia (mm), Δt é o passo de tempo (horas), e TT_{perc} é o tempo de viagem da percolação (horas).

3.2.5. Fluxo de base

O aquífero superficial contribui para o fluxo de base que abastece o corpo hídrico, fluxo de base só abastece os canais se a água armazenada no aquífero raso supere o limiar mínimo (Arnold *et al.*, 2012).

Assumindo que fluxo subterrâneo varia linearmente de acordo com a taxa de variação da altura do nível de água no solo é possível chegar a equação 12:

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \cdot \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t] + w_{rchrg,sh} \cdot (1 - \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t]) \quad (12)$$

em que $Q_{gw,i}$ é o fluxo de base para o canal (mm), $Q_{gw,i-1}$ é o fluxo de base para o canal no dia anterior (mm), α_{gw} é a constante de recessão do fluxo de base, Δt é o comprimento do passo de tempo (dias), $w_{rchrg,sh}$ é a quantidade de recarga entrando no aquífero no dia i (mm) (Arnold *et al.*, 2012).

3.2.6. Fluxo lateral

O fluxo lateral vai ser significativo para áreas com solo com alta condutividade hidráulica na camada superficial do solo, mas com uma camada semipermeável ou impermeável subjacente. Nesses sistemas a água vai percolar até encontrar a camada com pouca permeabilidade. A água então se acumula em cima dessa camada formando uma zona saturada, essa zona saturada se torna então fonte para o fluxo lateral subsuperficial (Arnold *et al.*, 2012).

A equação que fornece o volume drenável da água armazenada na zona saturada é:

$$SW_{ly,excess} = \frac{1000 \times H_0 \times \phi_d \times L_{nil}}{2} \quad (13)$$

em que $SW_{ly,excess}$ é o volume drenável de água armazenada na zona saturada por unidade de área (mm), H_0 é a fração saturada da camada perpendicular a declividade na saída da camada (mm/mm), ϕ_a é a fração drenável porosidade do solo (mm/mm); L_{hill} é o comprimento da declividade (m), e 1000 é um fator necessário para a conversão de metros para milímetros (Arnold *et al.*, 2012). A figura 4 mostra os parâmetros:

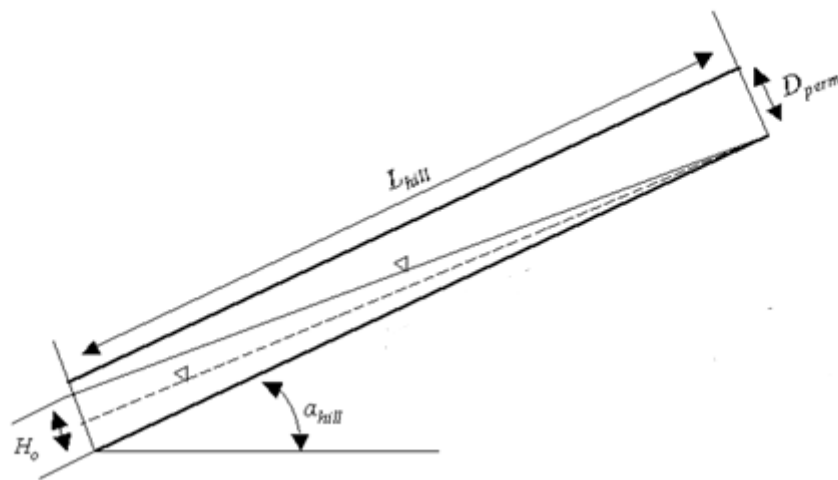


Figura 4 - Representação do fluxo lateral pelo programa SWAT (adaptado de Neitsch *et al.*, 2009)

4. CARACTERIZAÇÃO DA BACIA

A região do Distrito Federal e entorno divide-se em sete bacias hidrográficas: rio Corumbá, rio Descoberto, rio Paranoá, rio São Bartolomeu, rio São Marcos, rio Preto e rio Maranhão. As cinco primeiras pertencem à bacia hidrográfica do Paraná, a penúltima à bacia hidrográfica do São Francisco e a última à bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia.

A bacia do lago Paranoá está localizada na região central do Distrito Federal e apresenta a maior densidade demográfica dentre as bacias da região, cerca de 35% da bacia está coberta por área urbana. É a única bacia totalmente inserida no Distrito Federal e se divide em cinco unidades hidrográficas. Seus principais afluentes são o Riacho Fundo, ribeirão do Gama, ribeirão do Torto, ribeirão do Bananal, e ribeirão Cabeça de Veado (PGIRH).



Figura 5 – Representação da bacia do Paranoá (<http://www.cbhparanoa.df.gov.br/bacia_paranoa.asp> Acesso em:21/06/2014)

A microbacia do ribeirão do Gama possui uma área de 137 km² e está localizada na região sudoeste do Distrito Federal. Caracteriza-se por ser uma região com diversos usos de solo como área de preservação, áreas urbanizadas, áreas agrícolas e áreas de relevante interesse ecológico (ARIE). (Carvalho et al., 2001). Seu principal curso d'água mede aproximadamente 14 km e seus principais afluentes são os córregos Mato Seco, Cedro, Capetinga e Taquara (Ferrante et al., 2001, apud Dias 2011). A evolução do uso e ocupação do solo ao longo do tempo pode ser vista na figura 6.

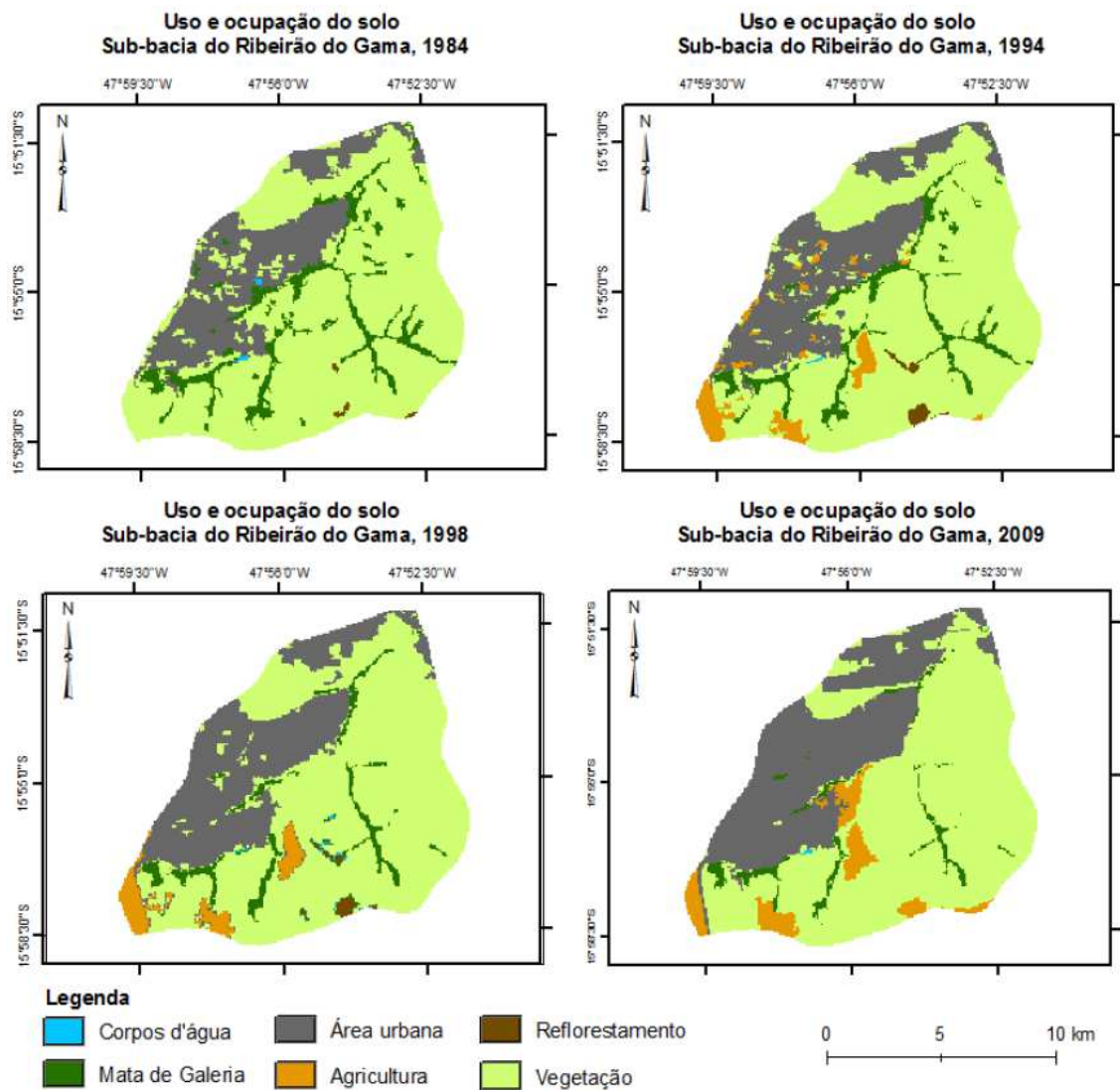


Figura 6 - Representação do uso do solo na bacia do Ribeirão do Gama nos anos de 1984, 1994, 1998 e 2009 (Dias 2011)

Como é possível observar na figura 6, a bacia vêm sofrendo ao longo do tempo um aumento das áreas urbanizadas. O processo de ocupação urbana continua até hoje, sendo

afetado por atividades humanas e, continuando a tendência, existem alguns cenários futuros de ocupação que são preocupantes.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Primeiramente é necessário o levantamento dos dados de entrada para a utilização do modelo SWAT, dados como mapa de uso do solo, mapa de tipo de solo da bacia e os dados climáticos da região. Após a obtenção dos dados e da preparação destes, foi feita a calibração do programa, onde foram selecionados os parâmetros a serem calibrados e depois a obtenção dos melhores valores, não foi realizado a validação da calibração. Finalmente foi possível a utilização do programa para simular cenários, foram desenvolvidos quatro cenários, e avaliadas as mudanças geradas nos dados de vazão para cada cenário.

5.1. LEVANTAMENTO DE DADOS

Para modelagem com o SWAT são necessários dados relacionados às características de uso do solo, tipo de solo, dados de clima, relevo e as características hidrológicas da bacia.

As informações hidrológicas foram obtidas dos bancos de dados da Caesb. Existe no ribeirão do Gama, próximo ao encontro com o lago Paranoá, a estação fluviométrica 60478500 – Gama Base Aérea, que cobre uma área de drenagem de 136 km² e existem dados que abrangem o período de janeiro de 1971 a dezembro de 2013.

Na bacia existem 3 estações pluviométricas com diferentes períodos de medição e a influência de cada estação na bacia foi determinada pelo método de polígonos de Thiessen. Foram utilizados no trabalho, os dados de precipitação começando em outubro de 2004 até dezembro de 2013, os dados utilizados iniciam em outubro pois foi considerado o início do ano hidrológico, após um longo período de seca, e não o início do ano segundo o calendário.

A base de dados utilizada no modelo foi proveniente do estudo de Ferrigo (2014), onde estão inseridas as informações associadas a cada tipo de uso do solo.

Outras informações climatológicas foram obtidas para a estação meteorológica 83377 – Brasília, sendo que os dados diários de radiação solar podem ser gerados pelo modelo SWAT a partir dos dados mensais provenientes da estação, uma vez que o modelo opera

em escala diária. Em relação aos solos da região, foram utilizadas as informações disponibilizadas pela EMBRAPA dos tipos de solo de todo o Distrito Federal, selecionando no ArcMap 10.2.2 a região de interesse para o trabalho. O uso do solo na região se caracteriza por um contínuo processo de urbanização ao longo do tempo, para o desenvolvimento do mapa de uso de solo atual, foram utilizadas fotos aéreas de 2013, fornecidas pela TERRACAP, com resolução de 24 centímetros, o mapa de uso do solo foi feito com o auxílio do programa ArcMap 10.2.2, em uma resolução de 1:10000

5.2. CALIBRAÇÃO

As simulações inicialmente foram feitas com os parâmetros gerados pelo modelo SWAT a partir dos dados de entrada, a calibração foi feita manualmente no programa SWAT e todas simulações foram feitas com um ano de aquecimento, de modo que os dados utilizados para análise da calibração são de outubro de 2005 à agosto de 2014.

Os parâmetros calibrados foram selecionados por um aglomerado de resultados feito por Lima (2014) que revela os parâmetros mais sensíveis para o bioma cerrado em vários trabalhos diferentes que são: Alpha_BF, CN2, Sol_K, Surlag, GWQMN, Sol_AWC, SHALLST, e ANION_EXC.

Os parâmetros calibrados foram Alpha_BF e CN2. Cada parâmetro foi trabalhado separadamente, de modo que foram feitas pequenas alterações em seus valores a partir dos valores iniciais, avaliando o comportamento dessas mudanças até serem atingidos os melhores valores dos parâmetros, tendo como referência de qualidade da simulação, o indicador de eficiência Nash-Sutcliffe.

Foi escolhido para iniciar a calibração, dentre os parâmetros acima, o parâmetro CN2 para calibração. O parâmetro CN2 (número da curva) determina o escoamento superficial e é influenciado pelo uso do solo, tipo do solo e a umidade antecedente no solo, por esse motivo existem diferentes valores de CN2 para as diferentes combinações de uso e tipo de solo, por isso que a forma de calibração é a multiplicação, para manter a proporção dos diferentes valores de CN2 da bacia.

Após a calibração do parâmetro CN2 foi escolhido o parâmetro Alpha_BF. O parâmetro Alpha_BF é a constante de recessão do fluxo de base, determinando a relação entre a recarga do aquífero e o fluxo de base.

5.3. CENÁRIOS

Após a calibração foi feita a análise dos cenários futuros com os melhores valores obtidos para os parâmetros. Foram simulados quatro cenários distintos representantes de tendências e projetos para a bacia do Ribeirão do Gama, onde o último se caracteriza pela união dos três primeiros. Nas simulações dos cenários foram alterados somente o mapa de uso do solo. A comparação entre os valores gerados foi feita analisando os 8 anos e 10 meses de dados de vazão que são gerados. Os cenários são demonstrados mais detalhadamente em resultados e discussão.

5.4. PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

Para a elaboração dos mapas necessários para a simulação do modelo, foi utilizado o programa *ArcGIS 10.2.2 for desktop Advanced* e suas extensões que são, *ArcGIS 3D Analyst*, *ArcGIS Geostatistical Analyst*, *ArcGIS Network Analyst*, *ArcGIS Publisher*, *ArcGIS Schematics*, *ArcGIS Spatial Analyst*, *ArcGIS Tracking Analyst*, *ArcGIS Data Interoperability*, *ArcGIS Data Reviewer* e *ArcGIS Workflow Manager*, desenvolvidos pela *Environmental Systems Research Institute (ESRI)*, Redlands, Califórnia, EUA.

Na simulação do SWAT foi utilizado a versão compatível com o ArcGIS 10.2.2 que é o *ArcSWAT 2012.10.2.16*, desenvolvido pela *Blackland Research Center Texas Agricultural Experiment Station e Agricultural Research Service*.

A análise da área de influência das estações pluviométricas nos dados de precipitação foram feitos com o auxílio do programa *AutoCAD 2014*, desenvolvido pela *Autodesk*.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

6.1.1. *Uso do solo*

O mapa de uso do solo foi feito a partir de ortofotos da região datadas de 2013, o mapa foi feito com o auxílio do *ArcMap 10.2.2* e suas diferentes extensões. Foram utilizadas imagens de 24 centímetros de resolução, e a separação do uso do solo em diferentes classes, foi feita manualmente utilizando uma escala de 1:10000 para diferenciação dos usos do solo na imagem. Como resultado foi obtida a figura 7.

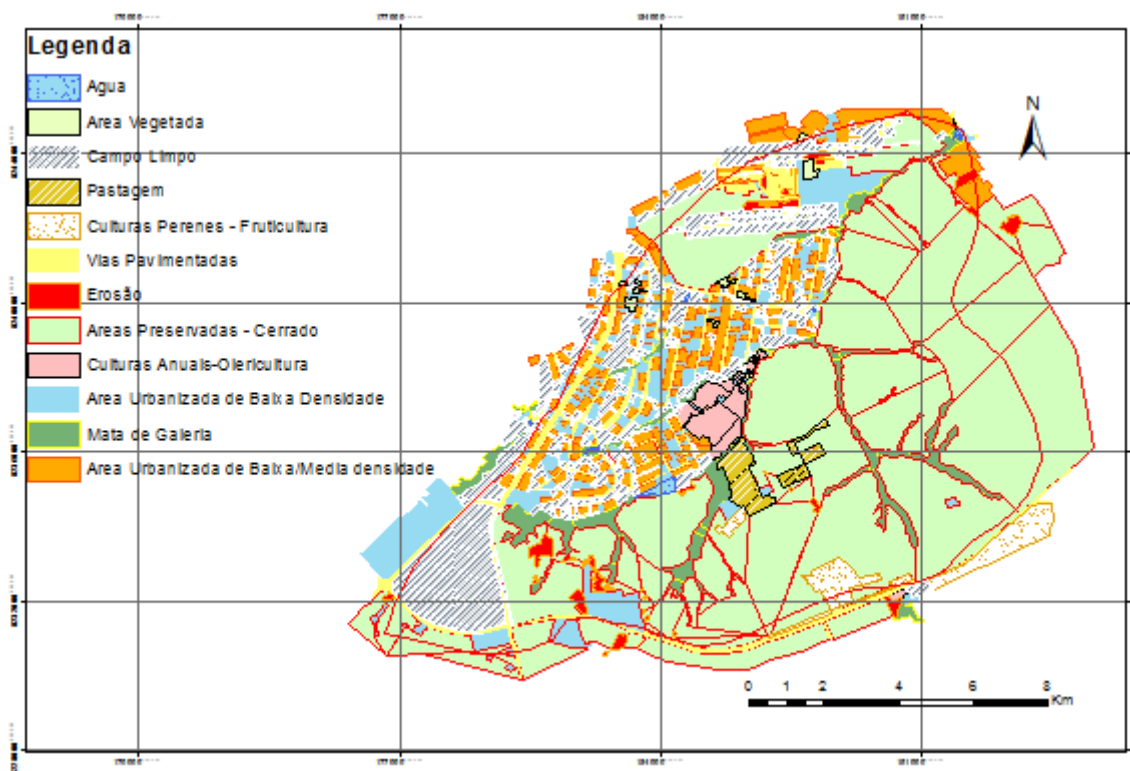


Figura 7 - Mapa de uso do solo da bacia do Ribeirão do Gama.

Foram utilizadas 12 classes referentes aos usos de solo na bacia do Ribeirão do Gama, conforme detalhadas na tabela 1.

Classe	Descrição
Água	Áreas que se encontram constantemente alagadas, sejam artificiais ou naturais.
Área Vegetada	Áreas com alta densidade de vegetação de médio e grande porte.
Campo Limpo	Áreas com predominância de gramíneas e herbáceas de pequeno porte.
Pastagem	Áreas de vegetação herbácea de pequeno porte com árvores espaçadas de criação antrópica.
Culturas Perenes	Áreas de criação de culturas agrícolas perenes ao longo dos anos.
Vias Pavimentadas	Vias urbanas impermeáveis com pavimento de asfalto ou concreto.
Erosão	Áreas de solo exposto da bacia com alta suscetibilidade a erosão
Áreas Preservadas	Áreas de vegetação nativa do Cerrado com espécies arbustivas e árvores de médio porte.
Culturas Anuais	Área de criação de culturas temporárias de ciclo anual.
Áreas Urbanizadas de Baixa Densidade	Áreas domiciliares com área impermeável menor que 30%.
Mata de Galeria	Áreas de vegetação de médio e alto porte associadas ao caminho da drenagem.
Áreas Urbanizadas de Baixa/Média Densidade	Áreas domiciliares com área impermeável entre 30% e 50%.

Tabela 1 - Caracterização das classes do mapa de uso do solo (adaptado de Ferrigo 2014)

As áreas do uso do solo são: Cerrado têm 105,728 km² (54,7%), Campo Limpo têm 22,874 km² (11,8%), Áreas urbanizadas de Baixa/Média Densidade têm 17,135 km² (8,8%), Áreas Urbanizadas de Baixa Densidade têm 15,525 km² (8%), Vias Pavimentadas têm 10,403 km² (5,4%), Mata de Galeria têm 10,327 km² (5,3%), Culturas Perenes têm 3,782 km² (1,9%), Culturas Anuais têm 2,749 km² (1,4%), Erosão têm 2,215 km² (1,1%), Pastagem têm 2,108 km² (1%), Área Vegetada têm 0,544 km² (0,2%) e Água têm 0,287 km² (0,1%).

É possível observar, a partir das imagens de satélite, uma possível tendência de urbanização da bacia. A área possui vários terrenos de chácaras que se enquadram na classe de Áreas Urbanizadas de Baixa Densidade, mas está ocorrendo um processo de loteamento dessas chácaras que estão se transformando em pequenos condomínios de seis a oito terrenos, passando essas áreas para a classe de Áreas Urbanizadas de Baixa/Média Densidade, aumentando a impermeabilização do solo da bacia.

6.1.2. Tipo de solo

Os dados foram obtidos da Embrapa que foi fornecido o mapa do tipo de solo do Distrito Federal, de onde foi selecionada apenas a área de interesse referente a bacia do Ribeirão do Gama. O resultado obtido é mostrado na figura 8.

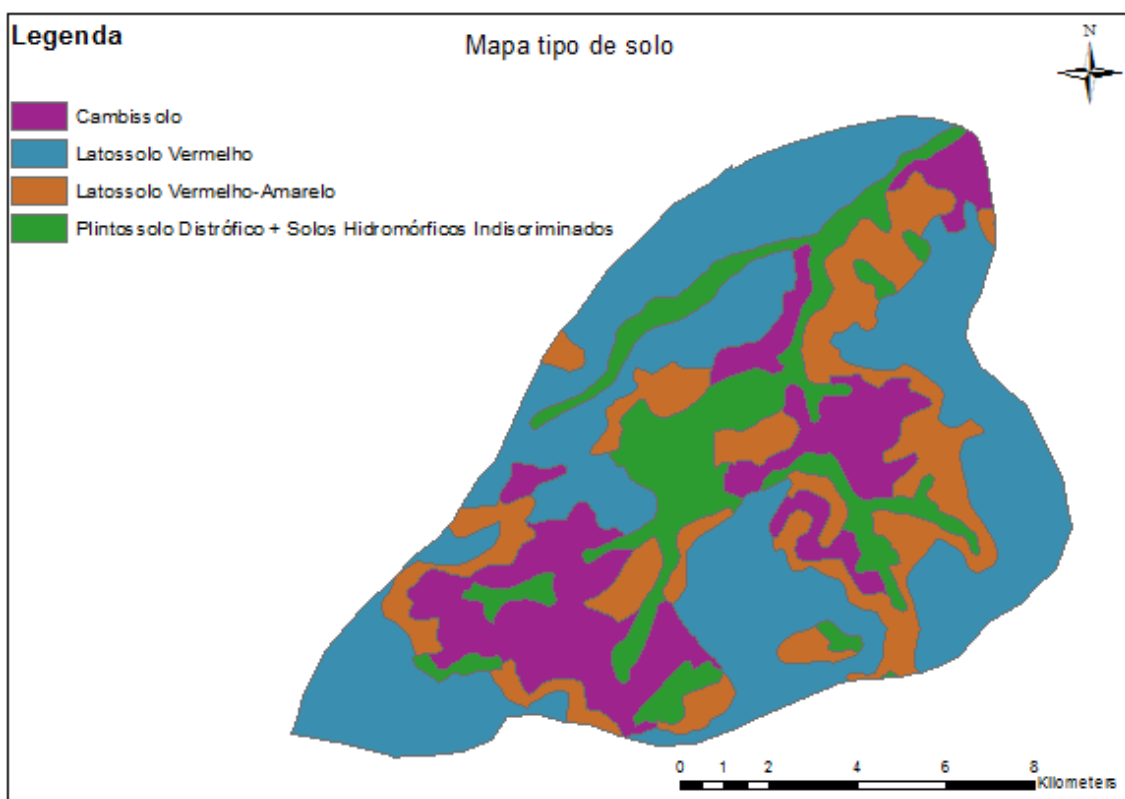


Figura 8 - Mapa de tipo de solo da Bacia do Ribeirão do Gama (adaptado EMBRAPA)

São encontrados na bacia, os solos: Latossolo Vermelho (47,85%), Latossolo Vermelho Amarelo (18,85%), Cambissolo Háplico (18,23%) e Plintossolo Háplico mais Solos Hidromórficos Indiscriminados (15,07%).

Os latossolos representam 54,5% dos solos do Distrito Federal e se caracterizam por serem altamente intemperizados e são residuais de regiões com superfícies planas denominadas chapadas, são caracterizados também por apresentarem óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio como a hematita. Os cambissolos se caracterizam por possuir um horizonte subsuperficial com poucas alterações física e química, portanto apresentam minerais primários, corresponde a 30,98% da área do Distrito Federal. Plintossolo são solos de difícil percolação de água e são típicos de regiões quentes úmidas com estação seca bem definida, possuem horizonte subsuperficial com manchas avermelhadas provenientes de diferentes concentrações de ferro, denominado horizonte plíntico. Os solos hidromórficos indiscriminados são encontrados normalmente em depressões sujeitas a alagamentos, são caracterizados por possuírem uma drenagem ruim, e também apresentam um alta carga de matéria orgânica que lhe confere um aspecto escuro. (Reatto 2004)

6.1.3. Relevo

Os dados de relevo foram obtidos a partir das curvas de nível do Distrito Federal. As curvas de nível apresentam uma definição de cinco metros, foi selecionada apenas a área da bacia e seu entorno. Com o auxílio do ArcMap 10.2.2, um modelo digital de elevação da bacia foi gerado, para melhor visualização é possível observar nas figuras 9 e 10.

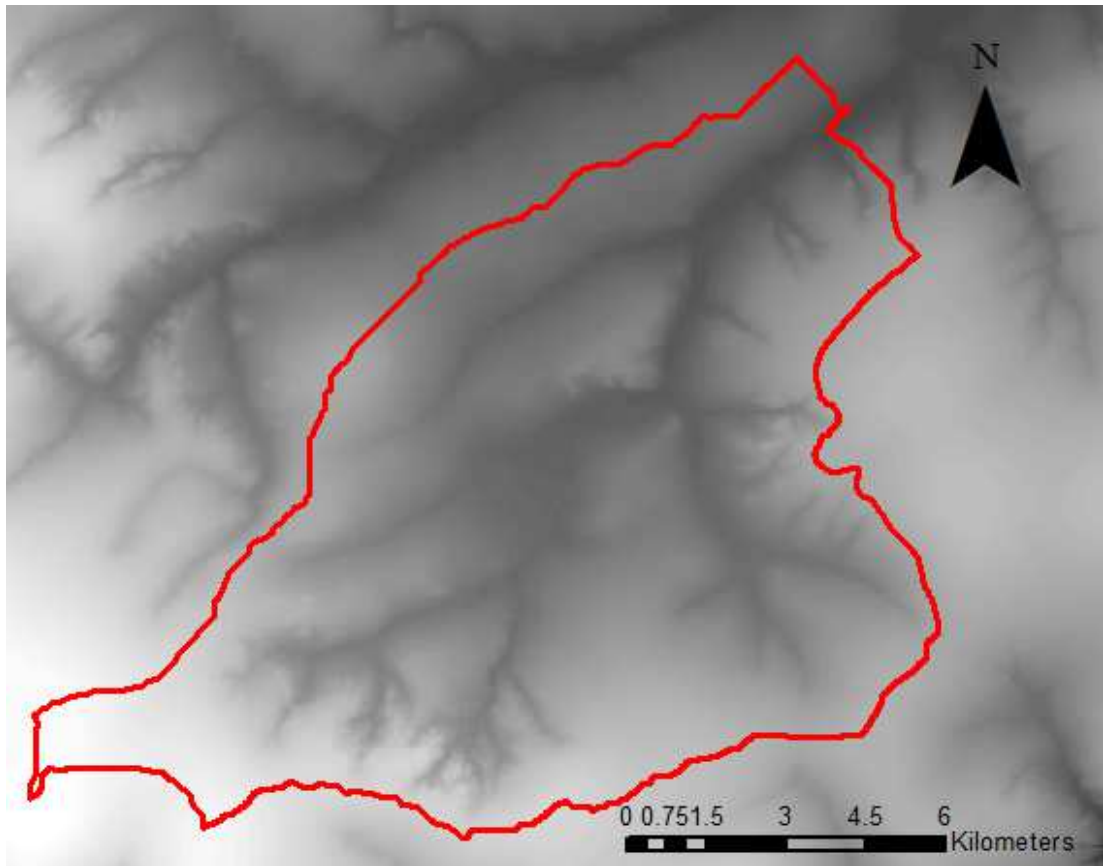


Figura 9 - Modelo Digital de Elevação da bacia do Ribeirão do Gama e entorno

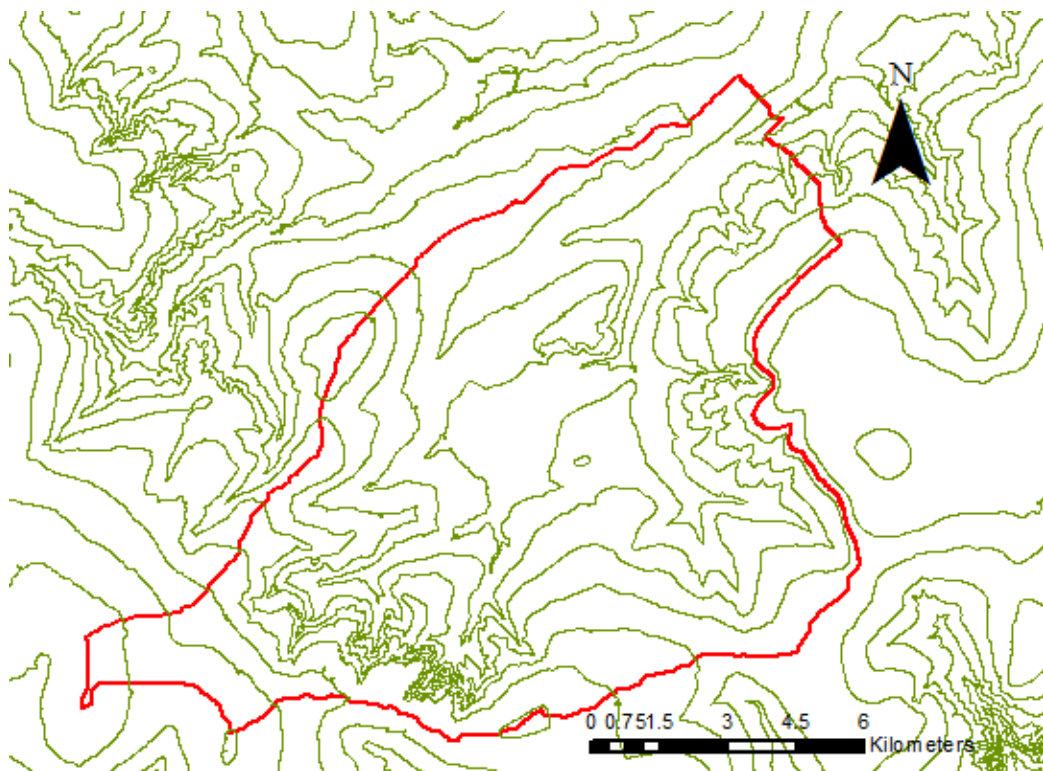


Figura 10 - Curvas de nível da bacia do Ribeirão do Gama e entorno

O exutório da bacia é o último ponto que não tem influência do remanso provocado pela barragem do lago Paranoá e nesse ponto se encontra a estação fluviométrica Gama Base Aérea, da onde foram retirados os dados de vazão da bacia. A partir do modelo digital de elevação foi criado o mapa de declividade da bacia e foram utilizados os mesmos intervalos de declividade de outros estudos com o programa Soil and Water Assessment Tool para outras bacias do Distrito Federal. A bacia foi dividida em três intervalos de declividades: o primeiro de 0% a 8%, o segundo e 8% a 20%, e o terceiro de 20% a 99,99%. O resultado obtido é apresentado na figura 10:

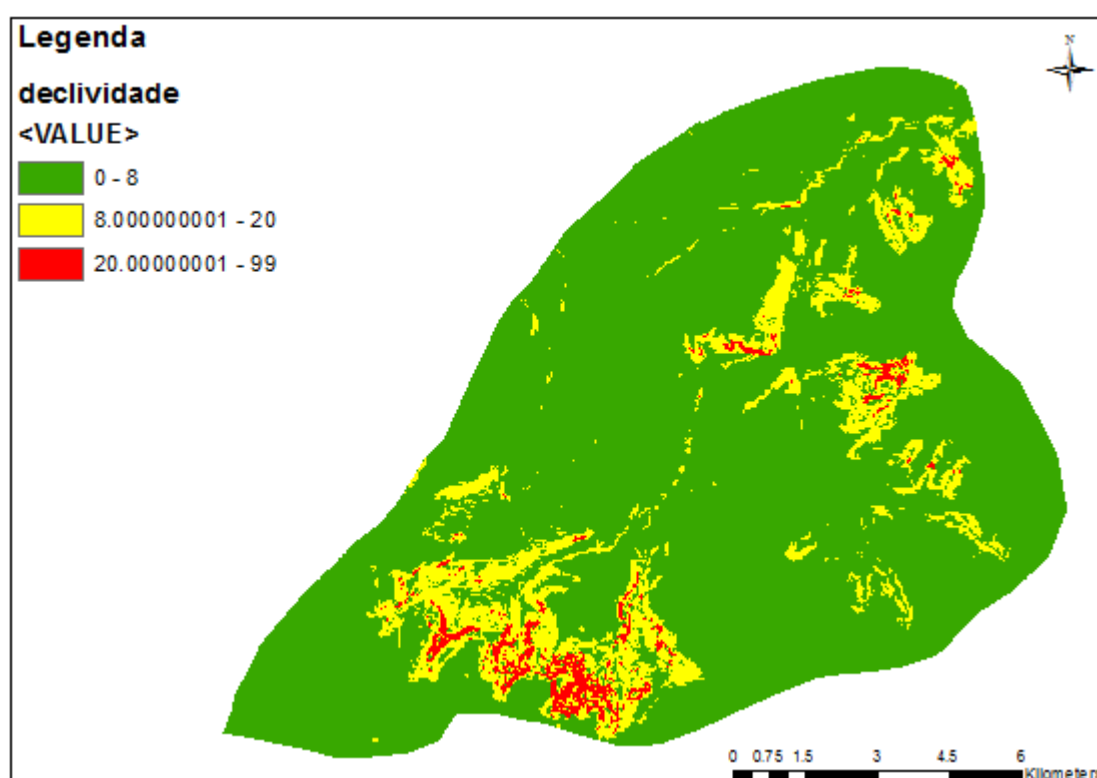


Figura 11 - Mapa de declividade da bacia do Ribeirão do Gama

Como é possível observar, a bacia apresenta, em sua maior parte, um relevo predominante de baixa declividade e os pontos de maior declividade estão associados as linhas de drenagem da bacia.

6.1.4. Precipitação

Os dados de precipitação foram obtidos do banco de dados da CAESB. Próximo a bacia do Ribeirão do Gama existem três estações pluviométricas da CAESB, a estação ETE Sul, a estação Área Alfa e a estação Cabeça de Veado. Suas coordenadas geográficas são apresentadas na tabela 4:

ETE Sul	LATITUDE: 15° 50' 39" sul
	LONGITUDE: 47° 54' 40" oeste
Área Alfa	LATITUDE: 15° 58' 45" sul
	LONGITUDE: 47° 58' 30" oeste
Cabeça de Veado	LATITUDE: 15° 53' 27" sul
	LONGITUDE: 47° 50' 44" oeste

Tabela 2 - Coordenadas das estações pluviométricas usadas

Foram utilizados os dados de precipitação das três estações, a partir do mês de outubro de 2004 até dezembro de 2013, como mencionado na metodologia, os dados utilizados iniciam em outubro pois foi considerado o início do ano hidrológico, após um longo período de seca, e não o início do ano segundo o calendário. Para a estimativa da precipitação na bacia a partir das três estações, foi utilizado para o cálculo da chuva média o método de polígonos de Thiessen como é possível observar na figura 12.

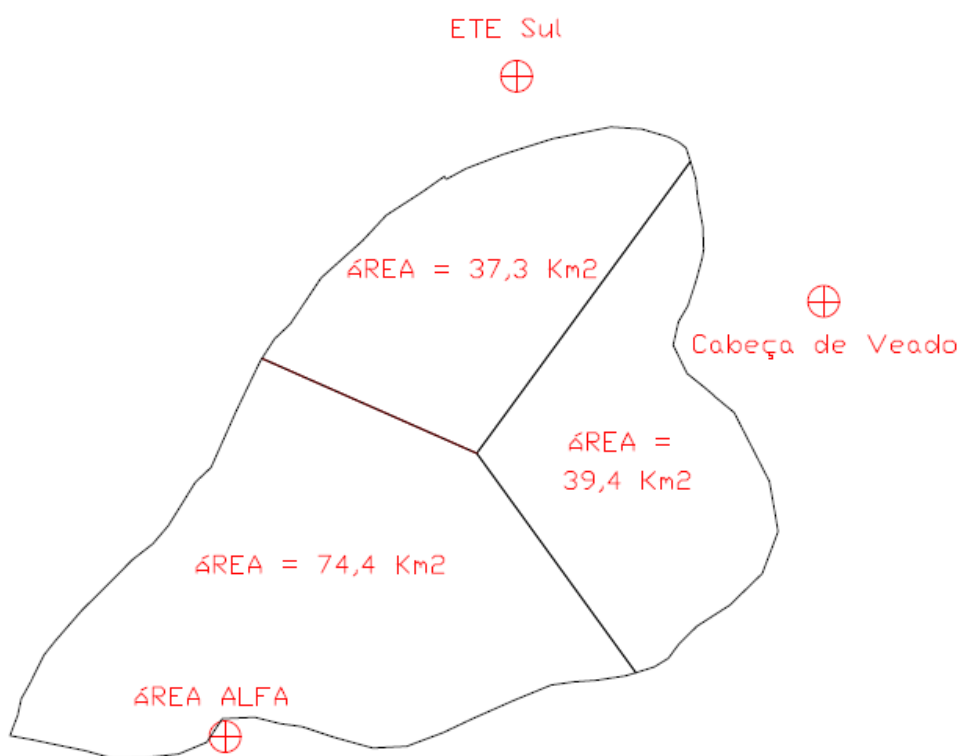


Figura 12 - Representação das estações pluviométricas na bacia

A área de influencia da estação Área Alfa corresponde a 49,2% da bacia, da estação ETE Sul 24,7% e da estação Cabeça de Veado 26,1%.

6.1.5. Clima

Os dados de clima utilizados foram coletados na estação meteorológica do INMET. Foram utilizados os dados de radiação solar, umidade relativa, velocidade dos ventos e temperatura do período estipulado.

6.1.6. Vazão

Os dados de vazão utilizados são os da estação fluviométrica Gama Base Aérea, de propriedade da CAESB. Foram utilizados os dados de outubro de 2004 à agosto de 2013, e um ano foi utilizado para aquecimento do programa. Os dados apresentavam falhas nas medições diárias de 2 de junho de 2008 à 20 de julho de 2008, não apresentando assim, os valores de média mensal para os meses de junho e julho de 2008. Para correção das falhas foi analisado o comportamento do hidrograma de valores diários mostrado na figura 12:

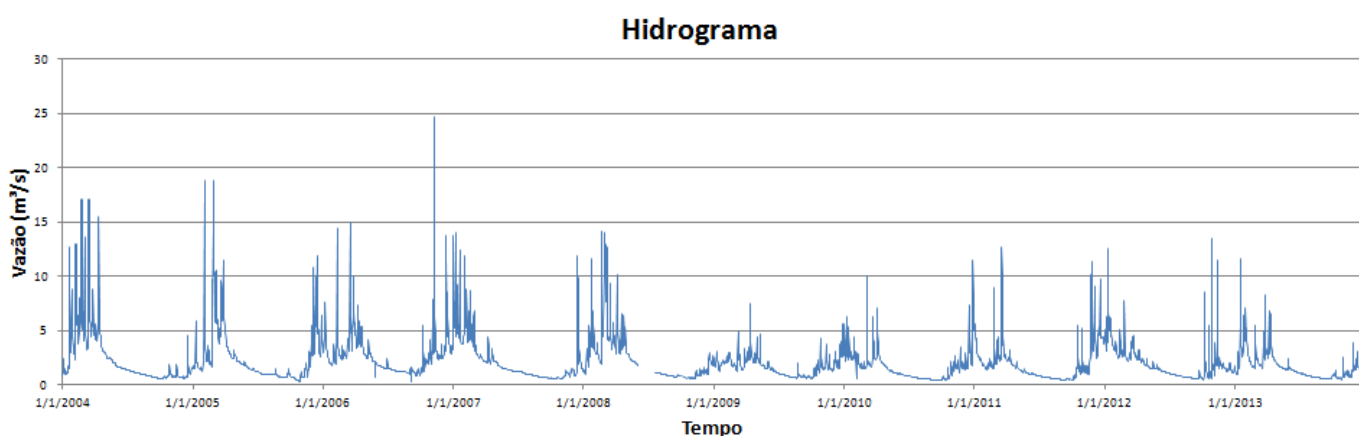


Figura 13 - Hidrograma do período utilizado no SWAT

Para melhor visualização do comportamento foi ampliado o período da falha, mostrado na figura 13:

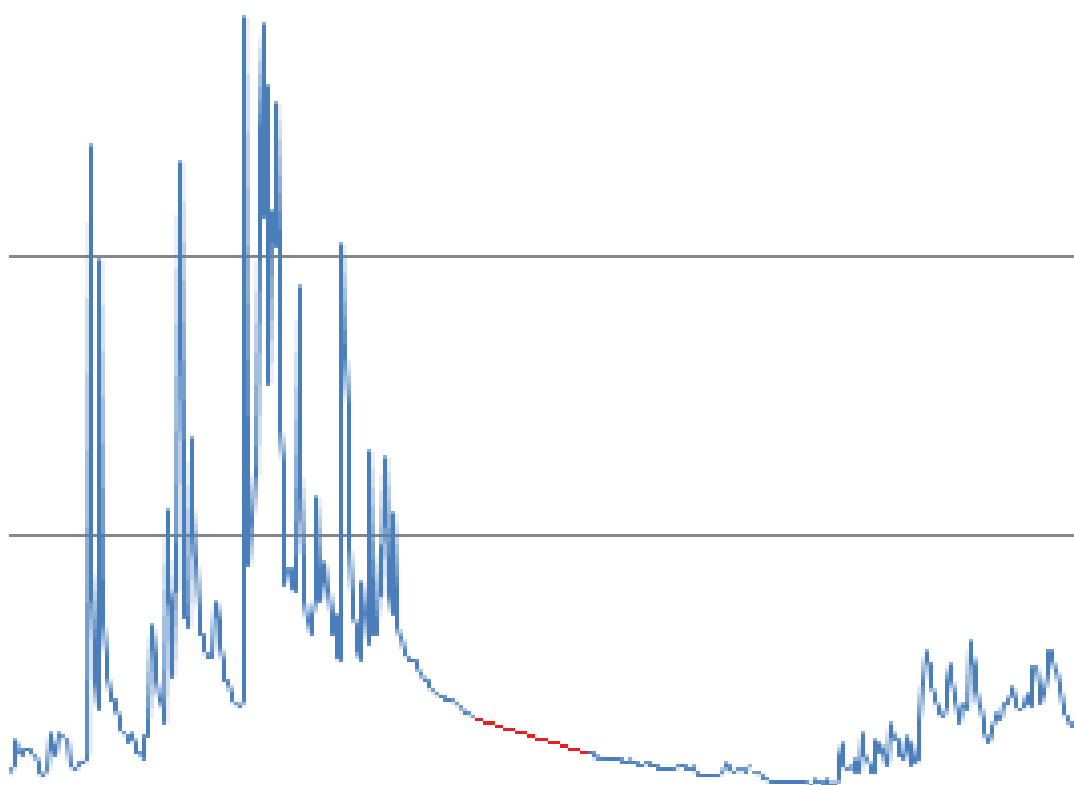


Figura 14 - Falha do hidrograma de valores diários

Os dados de precipitação na bacia são nulos antes, durante e depois da falhas apresentadas no hidrograma acima, de forma que a fonte dos dados de vazão nesse período são provenientes do escoamento de base, foi então por esses motivos, considerada satisfatória a correção dessas falhas por uma reta que liga o ultimo valor antes da falha ao primeiro valor após a falha como é demonstrado na figura 14 pela reta vermelha.

6.1.7. Calibração do Modelo

Conforme descrito em materiais e métodos a calibração foi realizada manualmente e foram ajustados os parâmetros CN2 e Alpha_BF.

Após a entrada dos dados necessários para a simulação do SWAT, os primeiros resultados de vazões foram obtidos. Esses valores foram gerados pelo programa apenas

a partir dos dados de entrada. A figura 15 mostra os valores de vazão mensal simulados pelo programa comparados com os dados de vazão mensal observados na bacia:

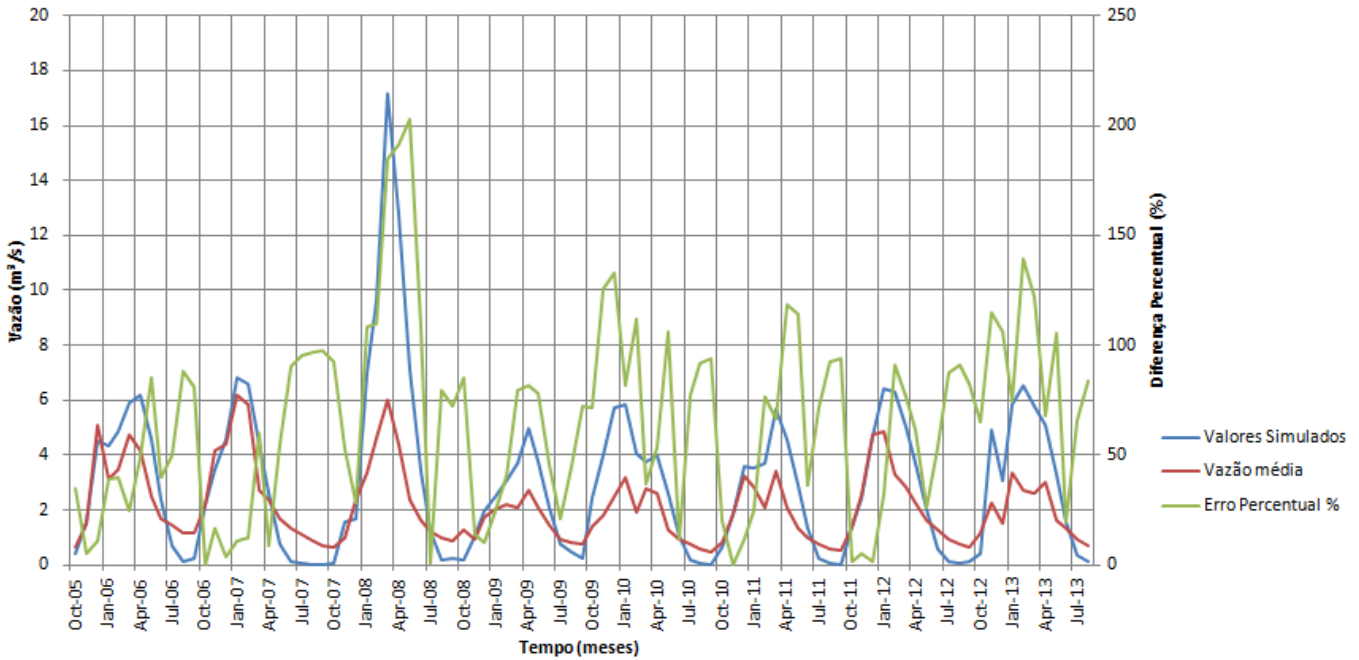


Figura 15 - Comparação entre os valores de vazão simulados e medidos antes da calibração

Utilizou-se para a avaliação dos resultados obtidos o indicador de eficiência Nash-Sutcliffe, foi obtido um valor de -1,408 que pode ser considerado um resultado ruim, evidenciando a necessidade de calibração do programa. Para melhor interpretação dos resultados foi utilizado o erro percentual. O erro percentual é representado pela fórmula 14:

$$E(\%) = \left(\frac{|Q_{sim} - Q_{obs}|}{Q_{obs}} \right) \cdot 100 \quad (14)$$

em que E(%) é o erro percentual, Q_{sim} é a vazão simulada e Q_{obs} é a vazão observada.

O erro percentual apresentou como valor médio $E = 65,51\%$, chegando a atingir o valor máximo de $E = 203,23\%$, ou seja, a diferença média entre os valores simulados e observados são maiores do que os próprios valores observados. Analisando a diferença entre as vazões, é possível observar que as vazões simuladas são, em sua maioria, maior do que as vazões observadas, onde são em média, $0,88 \text{ m}^3/\text{s}$ maior que o valor observado.

6.1.7.1. Calibração do Parâmetro CN2

O valor médio inicial do parâmetro CN2 é 47,73, com um Nash-Sutcliffe de -1,408. Os valores obtidos na calibração do CN2 são:

Forma de Calibração	Valor da Multiplicação	CN2 Médio	Nash-Sutcliffe
multiplicação	0.1	40.17	-1.4798
multiplicação	0.2	40.17	-1.4798
multiplicação	0.3	40.17	-1.4798
multiplicação	0.4	40.17	-1.4798
multiplicação	0.5	40.52	-1.4789
multiplicação	0.6	41.34	-1.4722
multiplicação	0.7	42.31	-1.4615
multiplicação	1	47.73	-1.408
multiplicação	1.2	52.89	-1.3919
multiplicação	1.4	59.32	-1.4842
multiplicação	1.3	56.21	-1.4293
multiplicação	1.1	50.07	-1.3881
multiplicação	1.15	51.3	-1.3798
multiplicação	1.175	52.02	-1.3835
multiplicação	1.125	50.66	-1.3836
multiplicação	1.16	51.56	-1.3808
multiplicação	1.14	51.04	-1.3778

Tabela 3 - Tabela das etapas de calibração do CN2

O melhor valor obtido foi de CN2 médio igual a 51.04, obtido por uma multiplicação por 1,14. Após a calibração do parâmetro foram obtidos os resultados:

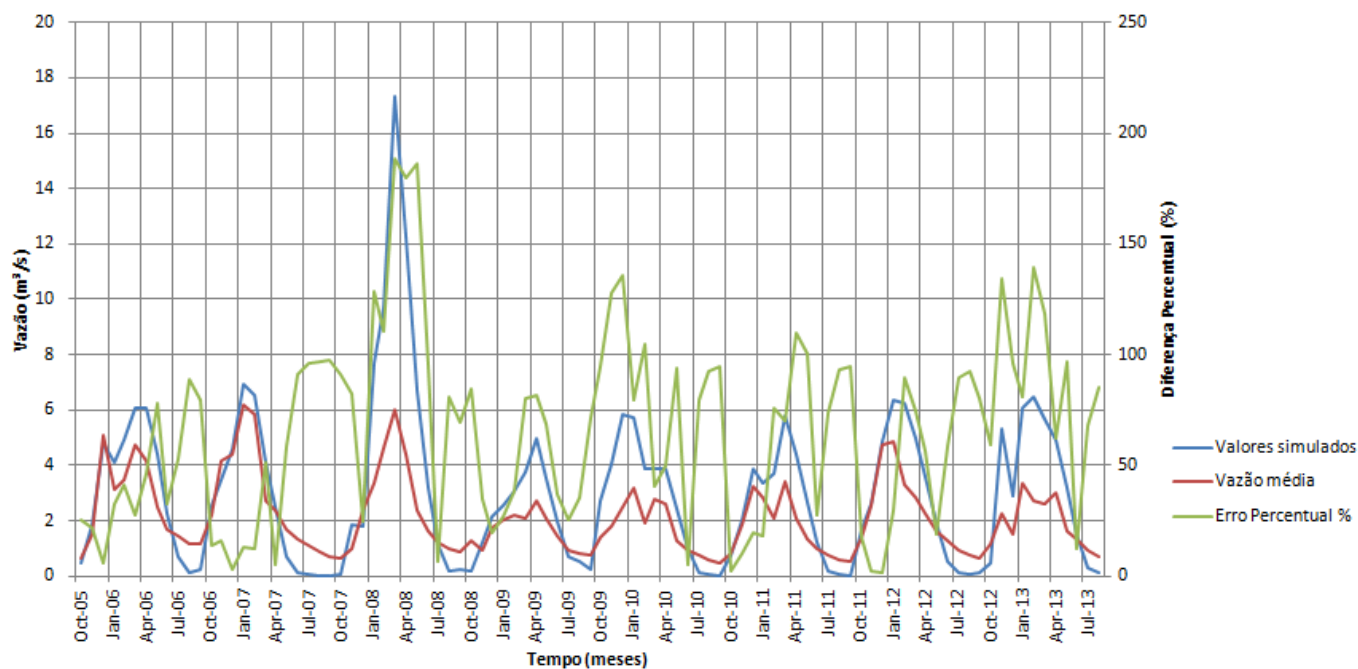


Figura 16 - Comparação entre os valores de vazão simulados e medidos depois da calibração do CN2

Como pode ser observado na tabela, o erro percentual médio foi de 65,19%, chegando a apresentar um valor máximo de 188,18%. Avaliando os valores de vazão, os valores simulados são em média 0,88 m³/s maiores que os valores observados.

6.1.7.2. Calibração do Parâmetro Alpha_BF

Por experiência na calibração desse parâmetro na bacia do Ribeirão do Gama o primeiro valor inserido já foi muito próximo do melhor resultado. As iterações são mostradas a seguir:

Forma de Calibração	Valor Alpha_BF	Nash-Sutcliffe
alteração do valor	0.0004	0.2868
alteração do valor	0.0003	0.2923
alteração do valor	0.0002	0.2585

Tabela 4 - Tabela das etapas de calibração do Alpha_BF

Como indicador de eficiência de calibração só foi utilizado o Nash-Sutcliffe, como valor final de calibração foi escolhido Alpha_BF = 0,0003, com um Nash-Sutcliffe positivo igual a 0,2923. O gráfico gerado por esse valor pode ser visto na figura 17.

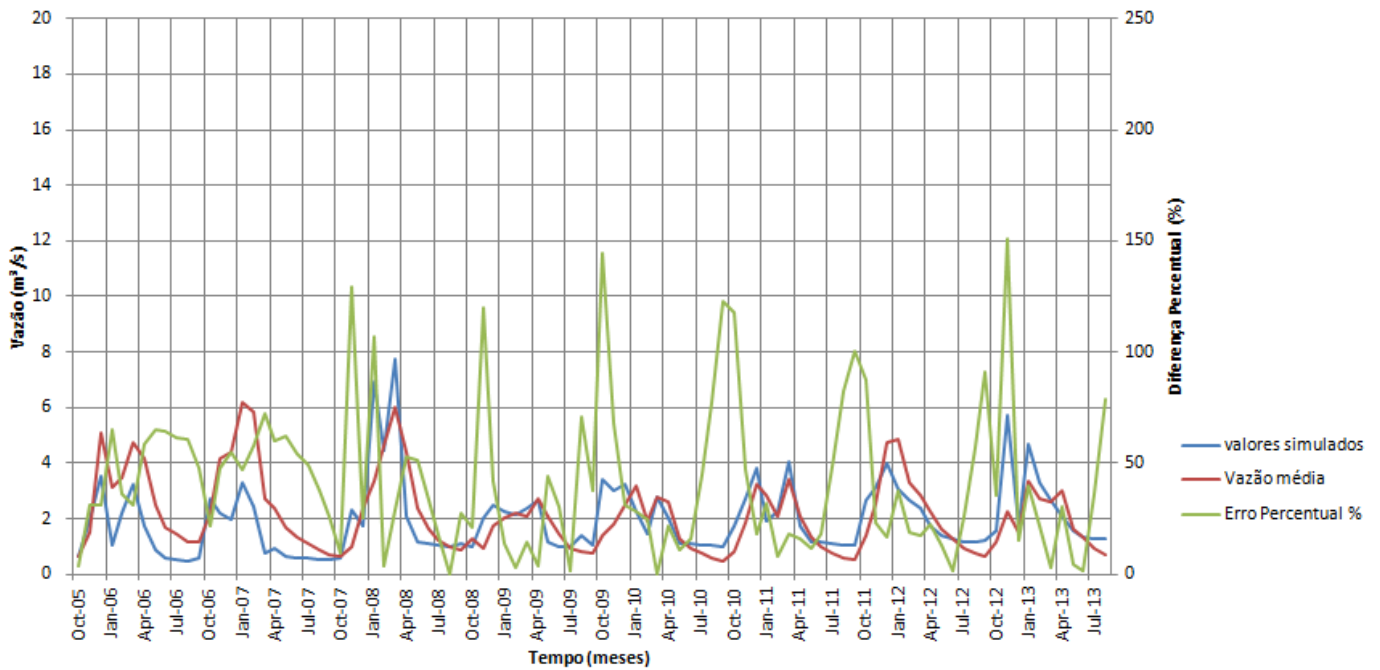


Figura 17 - Comparação entre os valores de vazão simulados e medidos depois da calibração do Alpha_BF

Como pode ser observado na tabela, o erro percentual médio foi de 41,82%, chegando a apresentar um valor máximo de 151,14%. Avaliando os valores de vazão, os valores simulados são em média 0,15 m³/s menores que os valores observados.

6.1.8. Cenários

Foram criados quatro cenários para as simulações com o programa SWAT, os três primeiros são em áreas distintas e o quarto consiste na junção dos três primeiros, para melhor visualização é possível observar os cenários na figura 17.

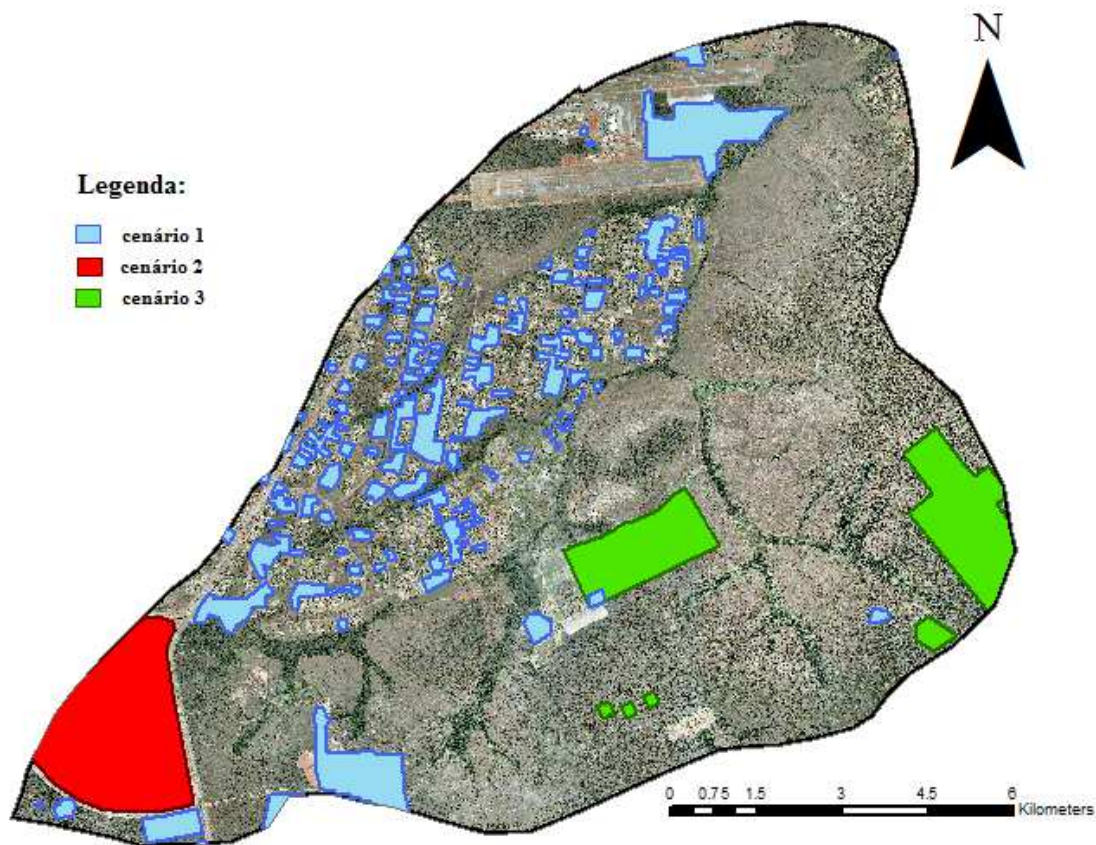


Figura 18 - Disposição dos cenários futuros na bacia do Ribeirão do Gama

6.1.8.1. Primeiro Cenário

O primeiro cenário consiste em uma tendência da área residencial da bacia do Ribeirão do Gama, onde está ocorrendo o loteamento das chácaras que estão se transformando em condomínios. As chácaras se enquadravam em uma região com impermeabilização do solo menor que 30%, entrando na classe de área urbanizada de baixa densidade, com o loteamento da região, essa área passa para uma impermeabilização entre 30% a 50% do solo, mudando para a classe de área urbanizada de baixa/média densidade. A área de baixa densidade transformada nesse cenário é de 15,52 km² (11,61% da bacia). Para avaliar como o modo de ocupação no uso do solo alteraria a relação entre chuva e vazão na bacia, foram comparados os valores gerados pelo programa após a calibração com o uso de solo atual e os valores gerados pelo programa com uso do solo imaginado nesse cenário. Os resultados são mostrados na figura 19.

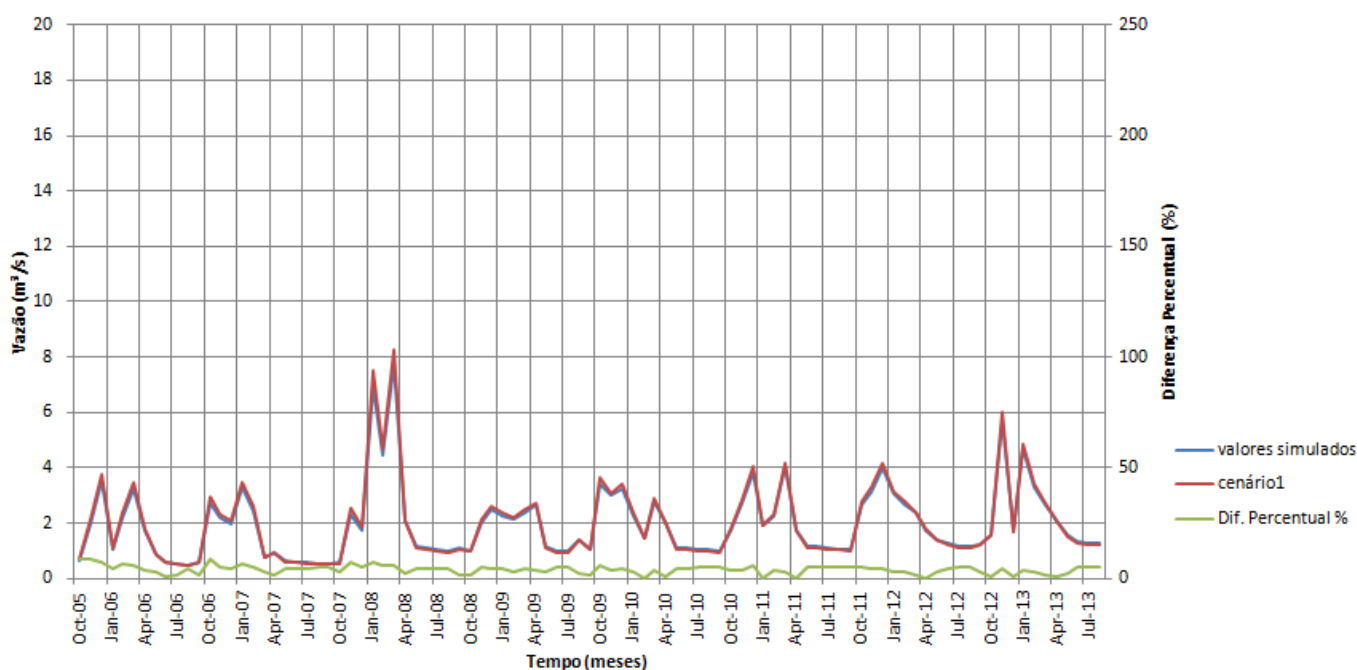


Figura 19 - Comparação entre valor de uso do solo atual e primeiro cenário

A diferença percentual é igual ao erro percentual, mas que neste caso não se trata mais de um erro, e sim a diferença entre os cenários envolvidos. Os resultados mostram que os valores de vazão gerados no primeiro cenário estão levemente acima nos valores de picos, e levemente abaixo nos valores de escoamento de base. Apesar de ser difícil avaliar essas mudanças visualmente, a diferença percentual nos dá uma melhor avaliação das mudanças ocorridas. Em média a diferença percentual foi de 4,05%, chegando a atingir o valor máximo de 8,72%. Avaliando as diferenças entre as vazões, foi possível perceber que a vazão do cenário 1 foi em média 0,055 m³/s maior que a vazão de calibração, gerando uma variação no volume de água de 15 x 10⁶ m³ no período, uma variação de 0,14 x 10⁶ m³/mês. Houve um aumento da vazão gerado pela mudança no uso do solo. Considerando que a vazão média da bacia para os valores de calibração é de 2,027 m³/s para o período acima, gerando um volume de 564 x 10⁶ m³ de água no período. Houve um acréscimo de 2,65% no volume total que sai da bacia. Esse aumento se deve ao aumento da impermeabilização do solo, aumentando consequentemente o escoamento superficial.

6.1.8.2. Segundo Cenário

O segundo cenário consiste nos planos de ocupação que são evidenciados no Plano Diretor de Ordenamento Territorial para a bacia do Ribeirão do Gama. Atualmente a área em questão tem 6,67 km² (4,99% da bacia) e tem como uso de solo a classe de campo limpo. Existe como plano de ocupação, a transformação dessa área em um polo multifuncional, como projeto, existe a proposta de criação de um condomínio de baixa/média densidade denominado de Setor Habitacional Catetinho.

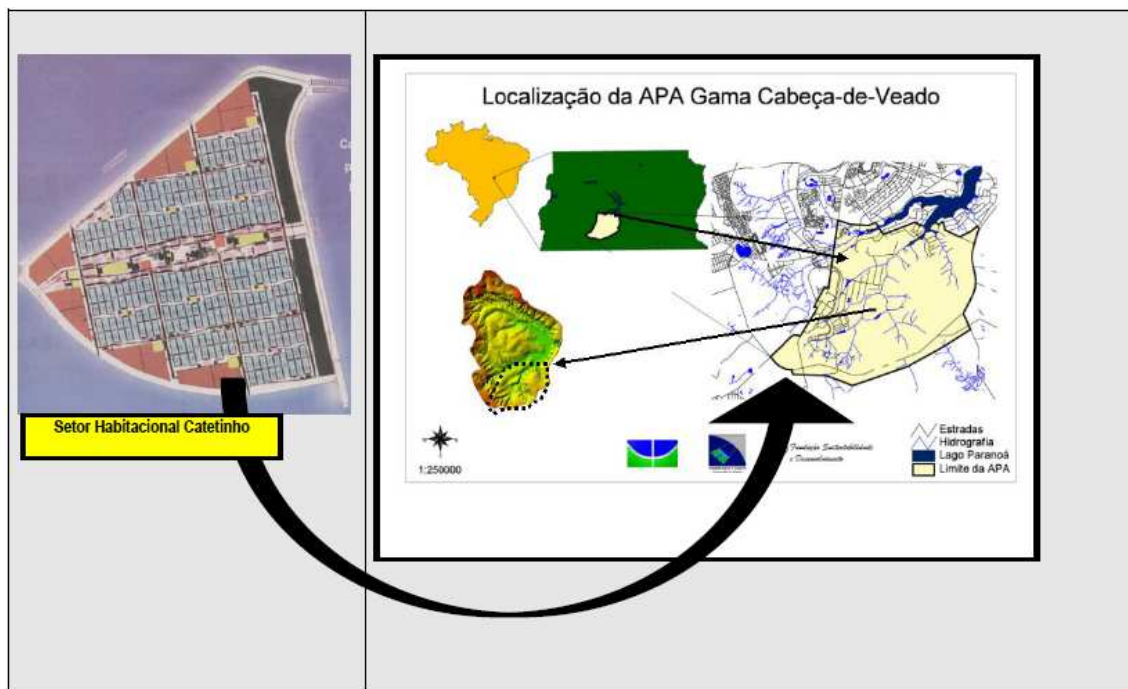


Figura 20 - Plano de ocupação para bacia do Ribeirão do Gama (Veríssimo2012)

Para avaliar as alterações na vazão foi comparado novamente aos valores obtidos pela calibração com o uso do solo atual. Os resultados são apresentados na figura 21.

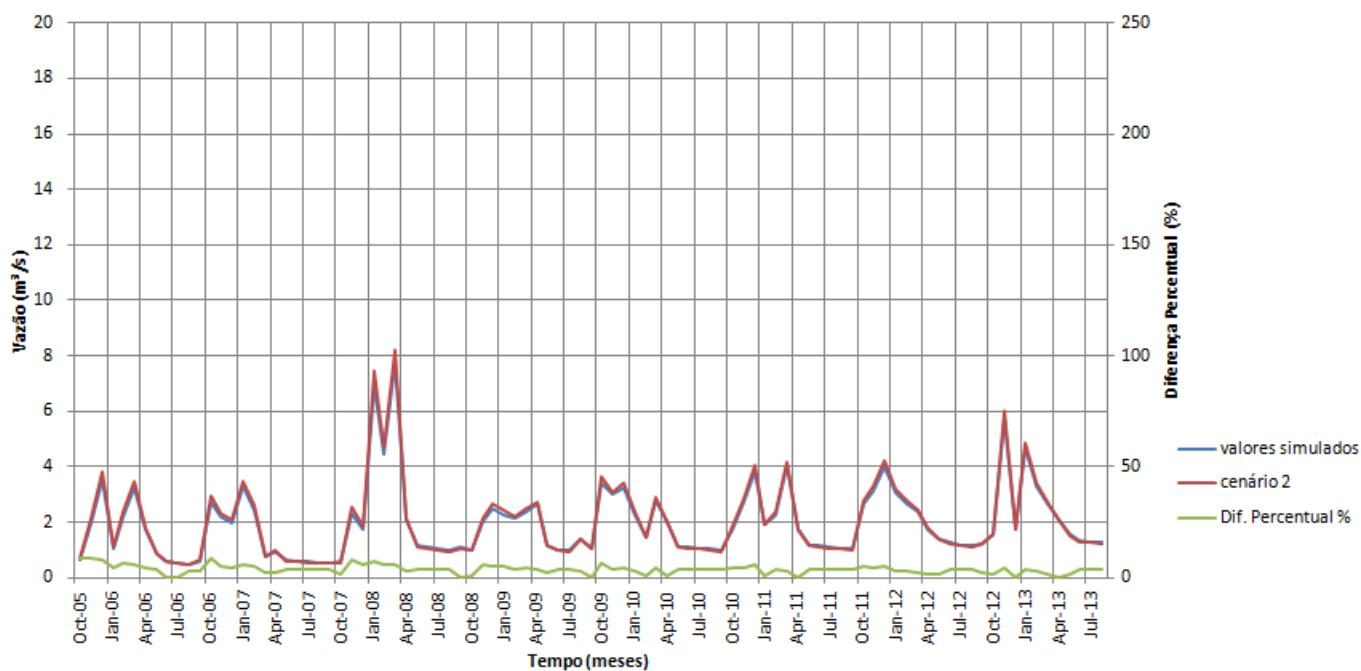


Figura 21 - Comparação entre valore de uso do solo atual e segundo cenário

Os resultados mostram a mesma tendência do primeiro cenário, como não é possível evidenciar visualmente, é preciso avaliar novamente a diferença percentual, a diferença média é de 3,76%, e com valor máximo de 8,79%. Avaliando os valores de vazão, o segundo cenário possui em média uma vazão 0,063 m³/s maior que a vazão de calibração, o que equivale a uma diferença de 17 x 10⁶ m³ no período, 0,16 x 10⁶ m³/mês. Existe então um aumento de 3,01% na vazão mensal devido a impermeabilização do solo pelo Setor Habitacional Catetinho. É possível evidenciar que as alterações do primeiro cenário são menores que as do segundo, isso se deve ao fato de que a área do segundo cenário ser concentrada.

6.1.8.3. Terceiro Cenário

O terceiro cenário abrange futuras áreas de ocupação da bacia do Ribeirão do Gama, são novas áreas onde já é possível observar a divisão do terreno em lotes. Essas áreas se encontram em áreas preservadas de cerrado, são pequenas áreas que se encontram normalmente próximas a vias de acesso de grande porte e foram encontradas cinco áreas com essas características na bacia. Somando as áreas desses loteamentos foi obtido uma área de 6,76 km² (5,06% da bacia). Para melhor compreensão dessas áreas são mostradas nas figuras 22 e 23.



Figura 22 - Exemplo de ocupação 1



Figura 23 - Exemplo de ocupação 2

Para a simulação do cenário foi considerado uma forma de ocupação de baixa/média densidade como nos outros cenários, os resultados são mostrados na figura 24.

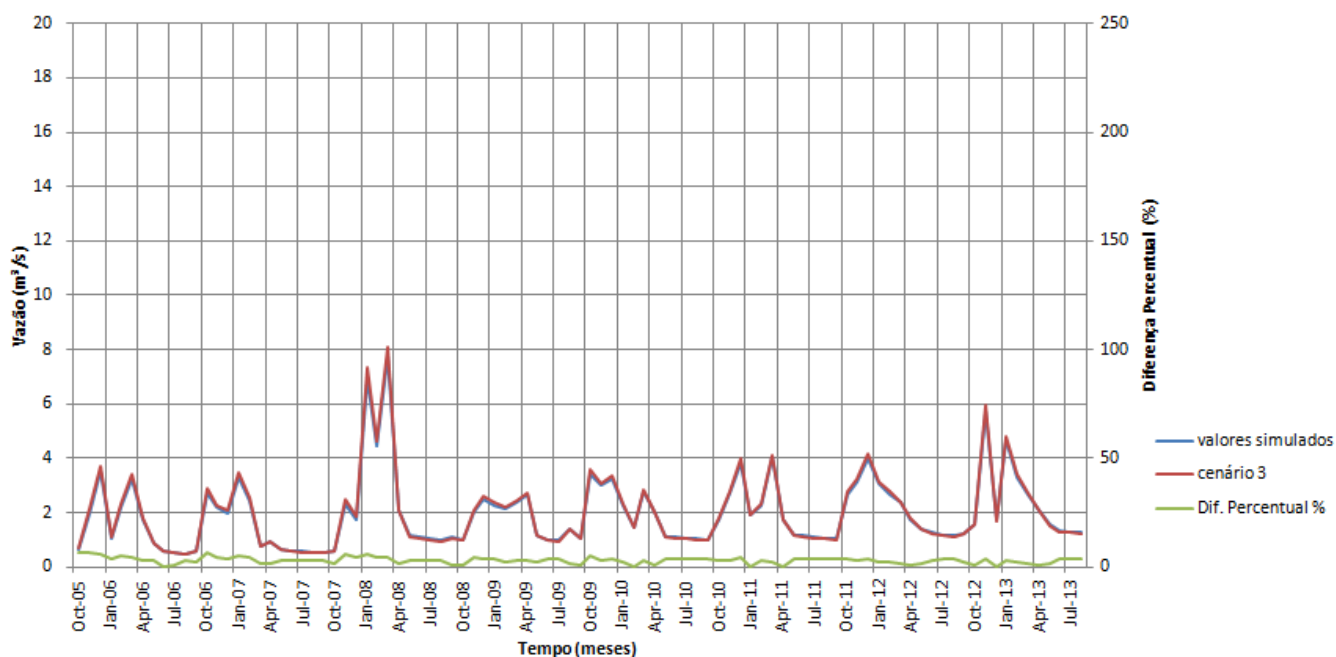


Figura 24 - Comparação entre valore de uso do solo atual e terceiro cenário

A diferença percentual média foi de 3,08%, com um valor máximo de 6,95%, menor que os outros dois cenários apesar de não ser a menor área alterada, possivelmente por serem áreas mais espalhadas pela bacia. Os resultados seguem as tendências de impermeabilização da bacia, com uma vazão média do cenário 0,045m³/s maior que a vazão de calibração, essa diferença gera uma alteração no volume de água de 12×10^6 m³ no período, uma alteração de $0,11 \times 10^6$ m³/mês. Esses resultados representam um aumento de 2,12% na vazão mensal.

6.1.8.4. Quarto Cenário

O quarto cenário consiste na fusão dos três primeiros, avaliando a influência dos três cenários anteriormente descritos ao mesmo tempo, somando um total de 28,96 km² (21,66% da bacia). Os resultados são mostrados na figura 25.

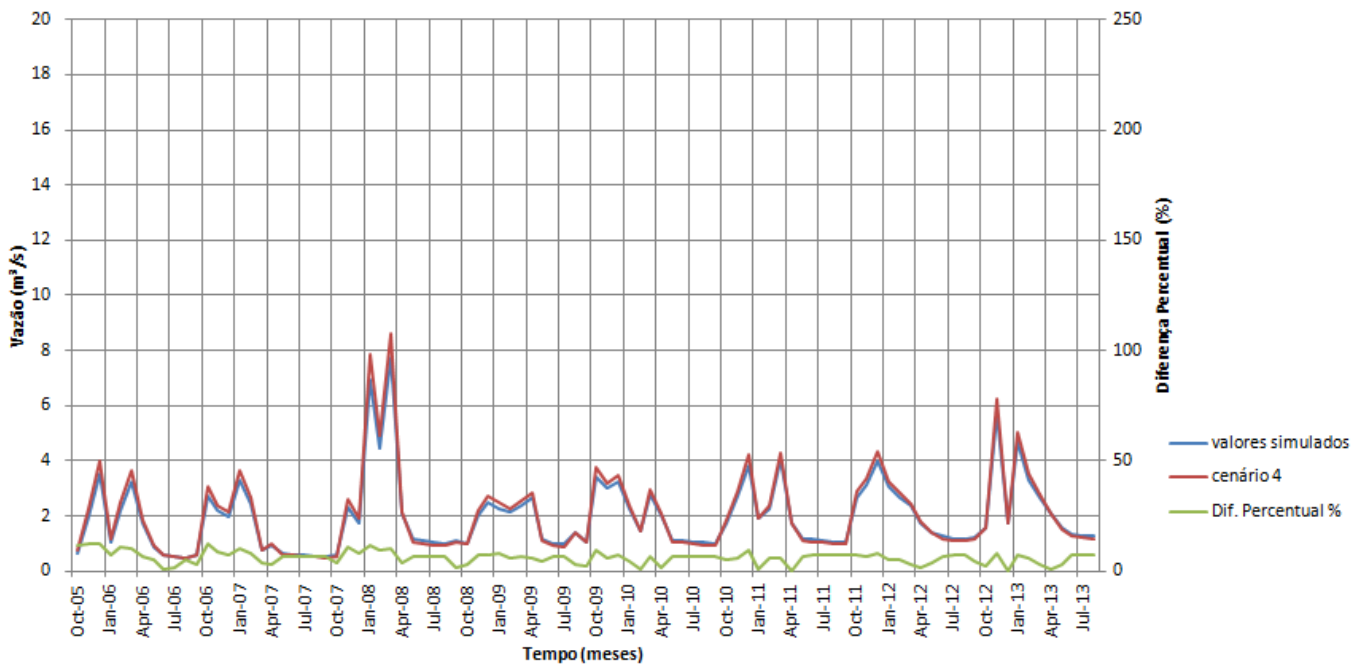


Figura 25 - Comparação entre valor de uso do solo atual e quarto cenário

Esse resultado apresentou a maior diferença quando comparado ao cenário atual, obviamente mantendo a tendência dos outros três cenários, de picos mais altos e vales mais baixos. A diferença percentual média é de 6,11%, com valor máximo de 12,55%. Os valores de vazão do cenário são em média 0,099 m³/s maior que os valores de vazão da calibração. Essa diferença gera uma alteração de 27 x 10⁶ m³ no período, 0,24 x 10⁶ m³/mês, um aumento de 4,78% na vazão mensal. Essa é a influência conjunta de todas as tendências de urbanização da bacia, uma avaliação do que pode acontecer a essa bacia se suas tendências se mantiverem.

7. CONCLUSÃO

O trabalho consistiu na avaliação de cenários futuros para a bacia do Ribeirão do Gama, para isso, foi utilizado o modelo SWAT como ferramenta de previsão da influência dos cenários futuros nas vazões da bacia. O modelo foi calibrado manualmente e depois foi feita a simulação de quatro cenários de ocupação urbana na bacia e avaliados suas influências nas vazões do Ribeirão do Gama.

Avaliando os resultados obtidos com a simulação de cenários futuros com aumento da ocupação urbana, é possível observar nos resultados que o aumento de impermeabilização de uma bacia, levou a um aumento das vazões de pico por diminuir a área de infiltração possível da bacia, e a queda no escoamento de base entre os períodos de chuva, provocado também pela queda na infiltração de água no solo.

Não foi possível observar mudanças no tempo de resposta da bacia, pois os picos dos cenários gerados são temporalmente coincidentes com os picos do cenário atual, mudanças que talvez sejam perceptíveis em uma avaliação dos dados em outra escala, como, por exemplo, escala diária.

É possível observar pelos resultados obtidos, que as alterações no uso de solo geraram alterações significativas nas vazões simuladas dos cenários, em que quanto maior o grau de impermeabilização da bacia, maiores os valores médios de vazão, mostrando que os planos de ocupação para a bacia do Ribeirão do Gama estão associados a alterações significativas no ciclo hidrológico da bacia, tornando-se assim necessário avaliar os planos de ocupação da bacia e as consequências na alteração do ciclo hidrológico.

Em um cenário em que 21,66% da área sofreu adensamento, os picos de vazão aumentaram em 9,9% e o escoamento de base sofre uma redução de 4,78%, o que pode ter, no conjunto da bacia do Paranoá, consequências em termos de utilização de suas águas, visto que o volume do reservatório já é bastante comprometido devido as restrições impostas pelos usos múltiplos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; VAN GRIENSVEN, A.; VAN LIEW, M. W.; KANNAN, N.; JHA, M. K. (2012) SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. American Society of Agricultural and Biological Engineers, Transactions of the ASABE , v. 55(4), p. 1491-1508.
- BETRIE, G. D.; MOHAMED, Y. A.; VAN GRIENSVEN, A.; SRINIVASAN, R. (2011). Sediment management modelling in the Blue Nile Basin using SWAT model. Hydrology and Earth System Sciences, USA.
- CARVALHO, A. P. F.; CARVALHO JR., O. A. C.; LEITE, L. L.; GUIMARÃES, R. F.; MARTINS, E. S. (2001). Desenvolvimento de Metodologia em SIG para Zoneamento Ecológico: Estudo de caso da Bacia do Ribeirão do Gama – DF. EMBRAPA, Brasília, DF, Brasil.
- DIAS, L. T. (2011). Modelagem dinâmica espacial do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do lago Paranoá – DF: 1998 – 2020. Dissertação de Mestrado em Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- 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.
- FERRAZ, F.F.B. (1996) Aplicação de sistema de informações geográficas em estudo de área urbana de Piracicaba sujeita à inundação. [Tese de mestrado, CENA/USP]
- FERRAZ, F. F. B.; MILDE, L. C. E.; MORTATTI, J. (1999). Modelos Hidrológicos Acoplados a Sistemas de Informações Geográficas: um Estudo de Caso. Revista de ciência e tecnologia. Volume 7. Piracicaba, São Paulo, Brasil.
- GASSMAN, P. W., M. REYES, C. H. GREEN, J. G. ARNOLD. (2007). *The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future directions*. Trans. ASABE 50(4): 1211-1250.
- HAAN, C. T.; JOHNSON, H. P.; BRAKENSIEK, D. L. Hydrologic Modeling of Small Watersheds. American Society of Agricultural Engineers, 1982. pp 3-16.
- LIMA, J. E.; MONTENEGRO, S. M.; MONTENEGRO, A.; KOIDE, S.; (2014) Hidrologia Comparativa: Relações entre Características Físicas, Comportamento Hidrológico e

Resultados do Modelo SWAT em Diferentes Regiões do Brasil – EMBRAPA – DF, Brasília – Distrito Federal, pp. 10.

LOPES, J.E.; BRAGA, B.P.F.; CONEJO, J.G.L. (1982). *SMAP – A simplified hydrological model*. In: SINGH, V.P. (ed.). *Applied Modeling in Catchment Hydrology*. Littleton: Water Resources Publication.

MAIDMENT, D.R. (1993). GIS and hydrology modeling. In: GOODCHILD, M.F.; PARKS, B.O. & STEYAERT, L.T. (eds.). *Environmental Modeling with GIS*. New York: Oxford University Press, pp. 147-167.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. (2009) *Soil and water assessment tool - Theoretical documentation version 2009*. Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 654p.

PGIRH – Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal Caderno Distrital de Recursos Hídricos. (2005). Elaborado para: Secretaria de Infra-Estrutura e Obras – SEINFRA – DF, Brasília – Distrito Federal, 101 p.

PDOT – Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal. (2011). Elaborado para: Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente – SEDUMA – DF, Brasília – Distrito Federal, 287 p.

REATTO, A.; MARTINS, E.; FARIAS, M.; SILVA, A.; CARVALHO, O. (2004). Mapa Pedológico Digital – SIG Atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo – EMBRAPA – DF, Brasília – Distrito Federal, pp. 12-27.

SOROOSHIAN, S.; HSUO, K.; COPPOLA, E.; TOMASSETTI, B.; VERDECCHIA, M.; VISCONTI G. (2009). *Hydrological Modelling and the Water Cycle: Coupling the Atmospheric and Hydrological Models - Water Science and Technology Library*, 1p.

VERÍSSIMO, M. (2012). Setor Habitacional Catetinho: Considerações Legais, Ambientais e Urbanas, Fundação SD – Sustentabilidade e Desenvolvimento – DF, Brasília – Distrito Federal, 2 p.

WILLIAMS, J. R.; J. G. ARNOLD; J. R. KINIRY; P. W. GASSMAN; C. H. GREEN. (2008). History of model development at Temple, Texas. *Hydrol. Sci.* 53(5): pp. 948-960.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CITADAS POR OUTROS

AUTORES

- BARTH, F. T.; POMPEU, C.T.; FILL, H.D.; TUCCI, C.E.M.; KELMAN, J. & BRAGA Jr., B.P.F. Modelo para Gerenciamento de Recursos Hídricos. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, 21. São Paulo: NOBEL/ABRH, 1987.
- BERTHELOT, R. Hidrológica Sintética. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 1970.
- BEVEN, M.; KIRKBY, M.J. A physically based, variable contributing and model of basin hydrology. Hydrological Sciences Bulletin, 24: 43-69, 1979.
- BEVEN, K.J.; WARREN, R. & ZAOUJ, J. "SHE": towards a methodology for physically-based distributed forecasting in hydrology. In: ANDERSON, M.G; BURT, T.P., ed. Hydrological Forecasting. IAHS Publication, 129. Chichester: Wiley, 1980, pp. 133-137.
- BEVEN, K. J. Rainfall-runoff modeling: the primer. New York: John Wiley & Sons, 2001. 360 p.
- CLABORN, B. J. & MOORE, W. Numerical Simulation in Watershed Hydrology. Austin: University of Texas, Hydraulic Engineer Laboratory, 1970. [Technical Report IIYD14-7.001]
- CRAWFORD, M.; LINSLEY. Digital Simulation in ydrology Stanford Watershed Model IV. Department of Civil Engineer, 1966. [Technical Report nº 39]
- JONCH-CLAUSEN, T. Système Hydrologique Européen: a short description. Horsholm, Denmark: Danish Hydraulics Institute, 1979. (SHE. Report I).
- LOPES, J.E.; BRAGA, B.P.F. & CONEJO, J.G.L. SMAP – A simplified hydrological model. In: SINGH, V.P. (ed.). Applied Modeling in Catchment Hydrology. Littleton: Water Resources Publication, 1982.
- MORRIS, E. M. Forecasting flood flow in grassy and forested basins using a deterministic distributed mathematical model. In: ANDERSON, M.G. & BURT, T.P. (ed.). Hydrological Forecasting. IAHS Publication, 129. Chichester: Wiley, 1985, pp. 247-255.
- MUÑOS, R.H. & TUCCI, C. Modelo Matemático do Arroio Chasqueiro. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 1974.