



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO USO DO SOLO COM SWAT – *SOIL
AND WATER ASSESSMENT TOOL***

Patricia Mendes Marinho

MONOGRAFIA

BRASÍLIA, DF

2018



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL

Patricia Mendes Marinho

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO USO DO SOLO COM SWAT – *SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL*

Monografia de especialização em Geoprocessamento Ambiental apresentada a banca examinadora do Instituto de Geociências como exigência para a obtenção do título de especialista em Geoprocessamento

Aprovada em __/__/__

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Henrique Llacer Roig (orientador)

Prof.

Prof^ª.

RESUMO

Ferramentas de SIG – Sistemas de Informações Geográficas em conjunto com técnicas de geoprocessamento vem sendo cada vez mais utilizados para dar suporte às modelagens hidrológicas.

Dessa forma, o modelo SWAT - *Soil and Water Assessment Tool* com a extensão *ArcSWAT* do *Arcgis*, foi usado para estimar a vazão e o balanço hídrico na Sub Bacia do Riacho Fundo, analisando diferentes cenários de uso e ocupação do solo na região, e utilizando dados adaptados para o bioma Cerrado sempre que possível. A região foi escolhida devido ao intenso processo de urbanização nas últimas décadas, o que contribuiu diretamente para a alteração nos processos hidrológicos na bacia e no aumento do transporte de sedimentos e poluentes para o Lago Paranoá.

Dentre os resultados foi possível identificar o crescente aumento no escoamento superficial devido ao aumento das áreas urbanizadas.

Palavras-chave: SWAT; Cenários de Uso do Solo; Modelagem Hidrológica.

ABSTRACT

GIS tools - Geographic Information Systems together with geoprocessing techniques have been increasingly used to support hydrological modeling.

Thus, the SWAT - Soil and Water Assessment Tool with the Arcgis extension ArcSWAT was used to estimate flow and water balance in the Riacho Fundo Subbasin, analyzing different scenarios of land use in the region, and using data adapted to the Cerrado biome whenever possible. The region was chosen due to the intense urbanization process in the last decades, which contributed directly to changes in the hydrological processes in the basin and the increase of sediment transport and pollutants to Lake Paranoá.

Among the results it was possible to identify the increase in surface runoff due to the growth in urbanized areas.

Keywords: SWAT; Landuse Scenarios; Hydrological Modeling.

Marinho, Patricia Mendes

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO USO DO SOLO COM SWAT – SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL / Patricia Mendes Marinho - Brasília, 2018. 27 p.

Monografia (Especialização - Geoprocessamento Ambiental) - Universidade de Brasília, 2018.

1. SWAT. 2. Cenários de Uso e Ocupação do Solo. 3. Modelagem Hidrológica.
I. Llacer Roig, Dr. Henrique, orient. II. ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO USO DO SOLO COM SWAT – SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL, Título.

1. Introdução

A substituição da cobertura vegetal por áreas de agricultura e pastagem ou áreas urbanas pode ser considerado um dos principais fatores para o aumento do escoamento superficial, o que causa, dentre outros, o aumento dos processos erosivos e o transporte de sedimentos, nutrientes e poluentes para a rede de drenagem nas proximidades. Além do escoamento superficial, outras variáveis do ciclo hidrológico que também podem ser alteradas incluem o aumento do volume das vazões e as diminuições do escoamento subterrâneo e da evapotranspiração.

Além das alterações no uso, outros fatores que impactam no processo hidrológico incluem as alterações climáticas tais como as variações de temperatura, intensidade e duração de períodos de seca e chuva, alterações antrópicas tais como as barragens e reservatórios, retiradas de água para irrigação e consumo urbano e industrial e os sistemas de drenagens [Zhang 2012], [Baker 2013], [Gassman 2015].

No Brasil estudos de diferentes cenários de uso e ocupação do solo pelo SWAT foram realizados por [Blainski 2017], [Menezes 2010] e [Baldissera 2005]. Os autores citaram como desafios para a uma modelagem satisfatória que a série de vazões seja suficientemente representativa em períodos secos e úmidos, a adequação da escala dos dados de entrada para o mapa de uso do solo e a adaptação dos parâmetros dos perfis de solo condizentes com a área de estudo.

2. Materiais e Métodos

2.1 Área de Estudo

A sub bacia do Riacho Fundo está situada na Bacia Hidrográfica do Lago Paranoá, com uma área aproximada de 200 km², pertence ao bioma Cerrado e possui clima de savana tropical.

A estação chuvosa se inicia em outubro e termina em abril, representando cerca de 90% do total precipitado no ano. O trimestre mais chuvoso é o de novembro a janeiro. A estação seca vai de maio a setembro, sendo o trimestre de junho a agosto o mais seco, responsável por somente cerca de 2% do total anual precipitado.

Localização da Sub Bacia do Riacho Fundo

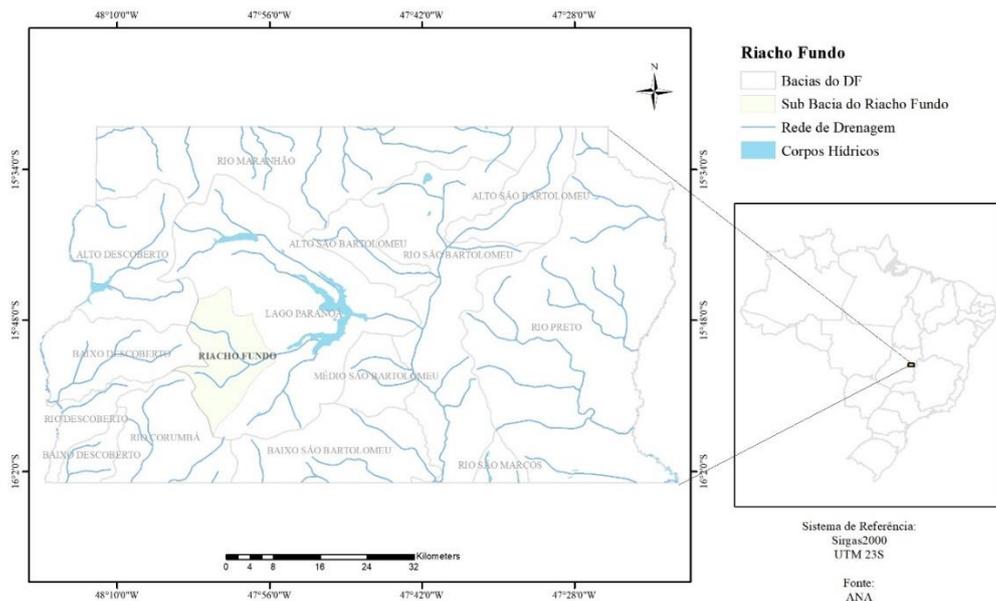


Figura 1 – Localização da Sub Bacia do Riacho Fundo

A região sofreu intensas alterações no uso do solo nas últimas décadas, o que impactou diretamente nos processos hidrológicos da bacia e na quantidade de sedimentos e poluentes transportados para o Lago Paranoá, contribuindo para o seu assoreamento [Echeverria 2007], [Menezes 2010], [Aguiar 2015] e [Dias 2017].

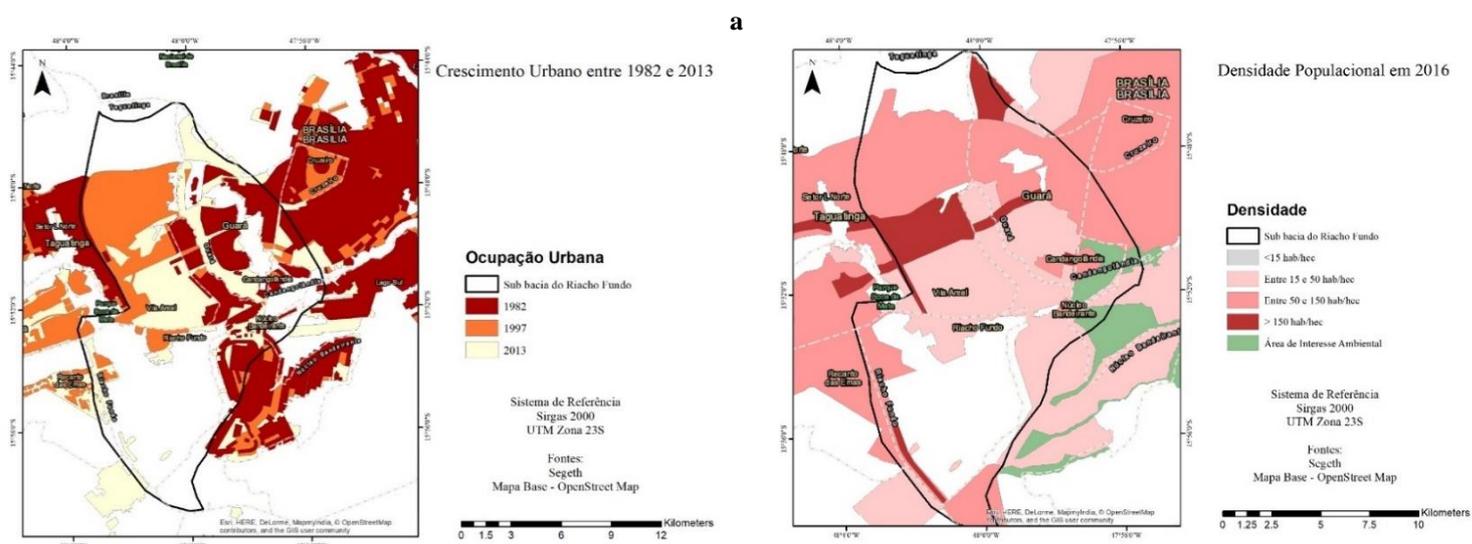


Figura 2 – Processo de Urbanização entre 1982 e 2013 (a) e Densidade Populacional (b). Fonte: Segeth – Secretaria de Estado de Gestão do Território e Habitação.

O mapa da Figura 2 (a) apresenta a variação das áreas urbanas nos anos de 1982, 1997 e 2013 na área de estudo e proximidades. É possível observar uma grande expansão urbana nas regiões entre Taguatinga e Vicente Pires na década de 90. A Figura 2 (b) apresenta a variação da densidade urbana na região e proximidades em habitantes por hectares, sendo o local de maior adensamento populacional entre Taguatinga e Guará.

Ano	Área (Km²)	% por Área
1982	36.675	18.3
1997	72.67	36.3
2013	119.75	60.0
Total	200	100

Tabela 1 – Áreas Urbanas na Sub Bacia do Riacho Fundo

Densidade	Habitantes/ Hectares	Área (Km²)	% por Área
Baixa	< 15	0	0
Baixa	> 15 e < 50	61.15	30.5
Média	> 50 e < 150	69.3	34.6
Alta	> 150	18.5	9.2
Interesse Ambiental	-	6.62	3.3
Outras Áreas	-	44.43	22.4
Total		200	100

Tabela 2 – Densidade Urbana na Sub Bacia do Riacho Fundo em 2016

Alguns dos problemas ambientais e socioeconômicos relacionados com a ocupação desordenada do espaço abrangem: a expansão irregular sobre as áreas de mananciais de abastecimento, comprometendo a sustentabilidade hídrica das cidades; a ocupação em áreas de risco de encostas e de inundações devido à falta de planejamento e fiscalização; o aumento da densidade habitacional, com conseqüente aumento da demanda de água e da carga de poluentes sem tratamentos lançados nos rios próximos às cidades [Tucci 2008].

De acordo com o Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal [PDDU-DF 2008] dentre os efeitos do aumento desordenado da urbanização no Distrito Federal se destacam, dentre outros, a impermeabilização do solo e implantação de redes de drenagem urbanas deficientes ou sobrecargas das redes existentes. Como exemplo de impermeabilização de grandes áreas se destaca a região de Vicente Pires, sendo originalmente prevista como zona de chácaras rurais, tornou-se uma das áreas com maior concentração de condomínios do DF sem que tenham sido tomadas medidas de adaptação da rede de drenagem pluvial por métodos tradicionais ou de ampliação da mesma.

O relatório também cita que a falta ou deficiência do sistema de drenagem de águas pluviais pode causar, dentre outros, pontos de alagamento, erosão superficial e laminar nas áreas urbanas e seu entorno, além de o escoamento pluvial inapropriado poder proporcionar a erosão dos leitos e margens dos mananciais. Dentre as causas da deficiência do sistema estão o dimensionamento hidráulico inadequado da rede e a sua obstrução pelo acúmulo de resíduos sólidos.

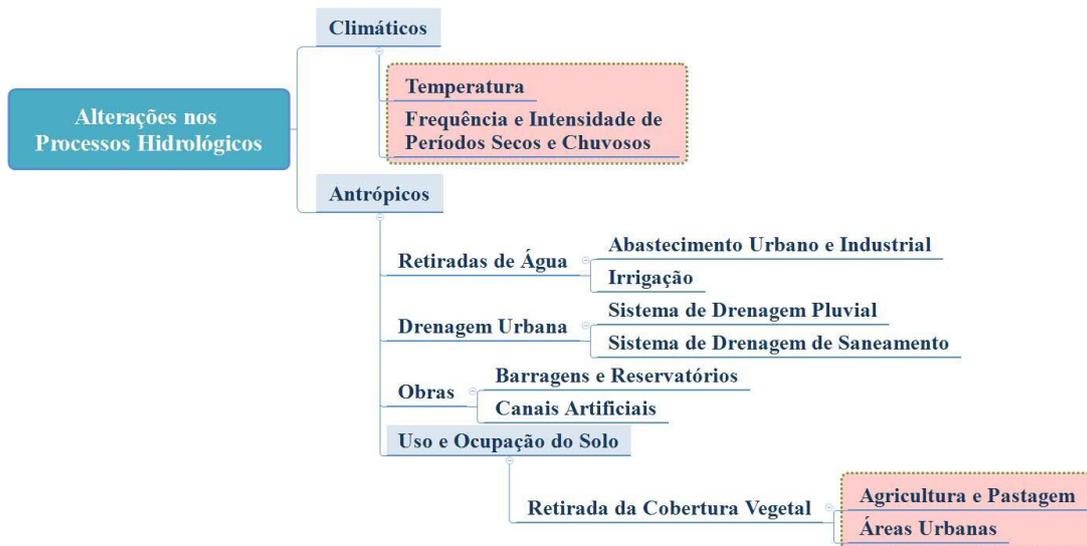


Figura 3 – Causas das Alterações nos Processos Hidrológicos em Áreas Urbanas e Proximidades.



Figura 4 – Relações Entre Causas e Efeitos da Urbanização no Ciclo Hidrológico. Fonte [PDDU-DF 2008] adaptado.

O aumento da impermeabilização, por um lado, diminui a evapotranspiração [Uda 2013], a infiltração e recarga dos aquíferos, com a agravante de também diminuir a disponibilidade de água no tempo seco, enquanto aumenta consideravelmente (em até sete vezes) o volume e vazões de pico do escoamento superficial. [Tucci 2002]

Estima-se que o grau de impermeabilidade para áreas urbanas é de até 40% para áreas de baixa densidade populacional, entre 40% e 70% para as médias e acima de 70% em áreas de alta densidade. Em vias pavimentadas pode chegar a quase 100%. [Arnold 2012]

2.2 Dados de Entrada

Para a realização do estudo, foi feito um levantamento dos dados de entrada a serem processados pelo modelo SWAT a saber: o Modelo Digital de Terreno MDT, o mapa de classes de solo, os mapas de uso e cobertura da Terra, séries históricas de dados climáticos e de vazões.

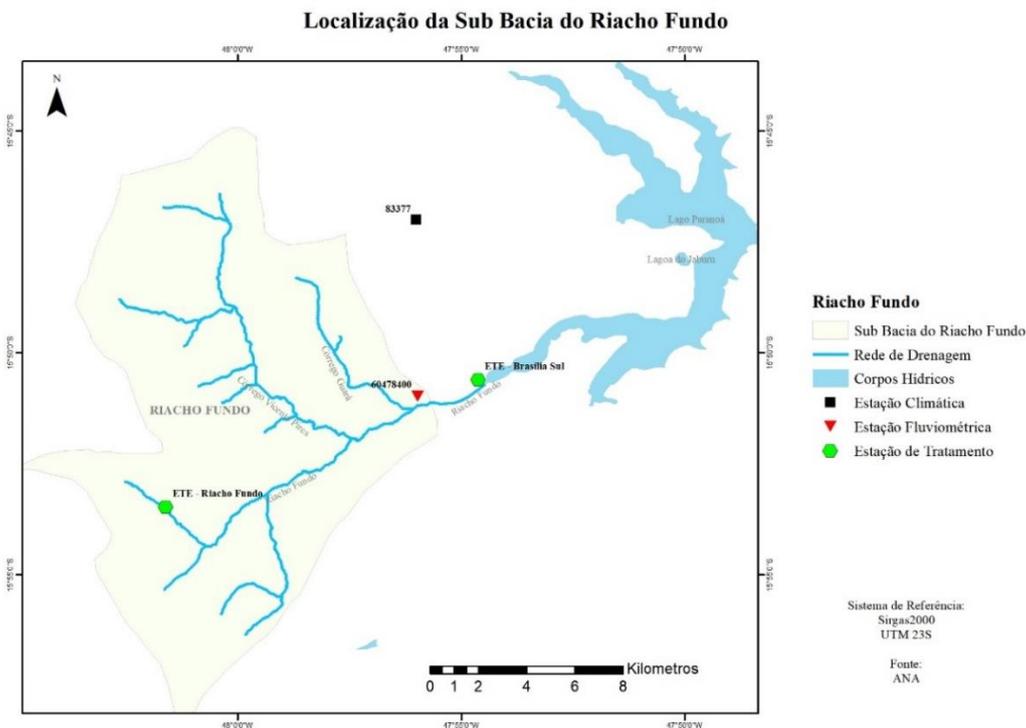


Figura 5 – Localização da Sub Bacia do Riacho Fundo

Na Figura 5 estão a localização dos principais cursos d'água e das estações de interesse na região e proximidades a serem utilizados como dados de entrada na ferramenta. Na rede de drenagem se destacam os córregos Guará e Vicente Pires e o Riacho Fundo com extensão aproximada de 13 km e vazão média de deságue no lago de $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo este um dos principais tributários do Lago Paranoá.

O MDT foi gerado a partir dos dados altimétricos da Terracap na escala de 1:10.000 com a função *TopoToRaster* do *Arcgis*. A partir dele foi gerada a declividade do terreno com a reclassificação de acordo com o especificado na Embrapa.

Declividade (%)	Relevo
0 – 3	Plano
3 – 8	Suave-ondulado
8 – 20	Ondulado
20 – 45	Forte-ondulado
> 45	Montanhoso

Tabela 3 – Reclassificação das Declividades

O mapa de solos foi obtido pela Embrapa e atualizado por [Reatto 2004] na escala de 1:100.000. Para a reclassificação de solos no SWAT, a base de dados da ferramenta foi atualizada com os perfis de solos adaptados ao bioma Cerrado de acordo com [Ferrigo 2014].

	SWAT Adaptado	Classes de Solo	Grupo Hidrológico
LV	Latossolo Vermelho	Área urbana	A
AR	Argissolo Vermelho	Argissolo Vermelho	C
CX	Cambissolo	Cambissolo	C
LV	Latossolo Vermelho	Latossolo Vermelho	A
LVA	Latossolo Vermelho-Amarelo	Latossolo Vermelho-Amarelo	A
FX	Plintossolo	Plintossolo	D
GX	Gleissolo	Solos Hidromórficos	D

Tabela 4 – Reclassificação dos Solos

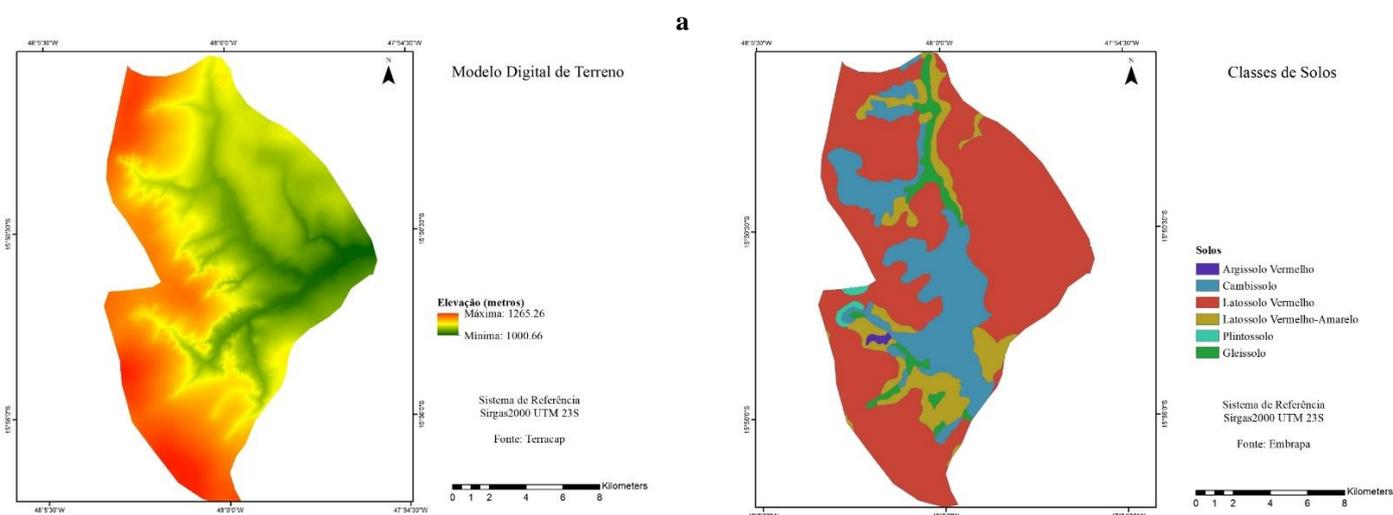


Figura 6 – Modelo Digital de Terreno (a) e Mapa de Solos (b).

Na região predominam os solos Latossolo Vermelho com maior grau de infiltração do grupo hidrológico A, seguido do Cambissolo com baixa taxa de infiltração no grupo C.

Os mapas de uso do solo foram obtidos por [Meneses 2010] para o ano de 2009 e nos levantamentos feitos em colaboração com a Unesco para

os anos de 1998 e 1984, sendo todos na escala de 1:100.000 [Unesco 2002].

Para os mapas de 1984 e 1998 originalmente foi feita a classificação supervisionada com o *MaxVer* a partir de imagens *Landsat*. O autor georreferenciou os mapas com a base cartográfica da Codeplan no sistema de projeção Sicad na escala de 1:10.000, para posteriormente validar com imagens do *Landsat 5* (TM) com resolução de 30 metros. Para a geração do mapa de 2009, utilizou-se imagem do *Alos* (AVNIR-2) com resolução de 10 metros, para a atualização e validação do mapa de 1998.

Para a reclassificação dos usos dos solos no SWAT também foram necessárias adaptações na base de dados condizentes com o bioma Cerrado. As novas classes foram inseridas de acordo com [Ferrigo 2014]:

	SWAT adaptado	Classes de Uso	Tipo
AGRL	Agricultural Land Generic	Agricultura	CROP
AGRL	Agricultural Land Generic	Agricultura extensiva	CROP
AGRR	Agricultural Land Low Crops	Agricultura irrigada	CROP
PRES	Cerrado/Área Preservada	Área verde	CROP
CAMP	Campo	Campo - Formações Savânicas	CROP
CERR	Cerrado	Cerrado - Formações Savânicas	CROP
MATA	Mata Galeria	Mata - Formações Florestais	CROP
EUCA	Eucalyptus	Vegetação alterada	CROP
PAST	Pasture	Pastagem	CROP
DEGR	Área Degradada	Solo exposto	CROP
WATR	Water	Corpos d'água	CROP
UBBD	Residencial Baixa Densidade/Chácaras	Chácaras – Loteamento	URBAN
UMBD	Residencial Média/Baixa Densidade	Residencial - Baixa densidade	URBAN
UMAD	Residencial Média/Alta Densidade	Residencial - Média densidade	URBAN
UAAD	Residencial Alta Densidade	Residencial - Alta densidade	URBAN
URBN	Urban	Pólo de transporte	URBAN
URBN	Urban	Comercial-Industrial-Público	URBAN
URBN	Urban	Equipamento Público	URBAN
ASFA	Vias Pavimentadas/Asfalto	Estrada pavimentada	URBAN

Tabela 5 – Reclassificação do Uso do Solo

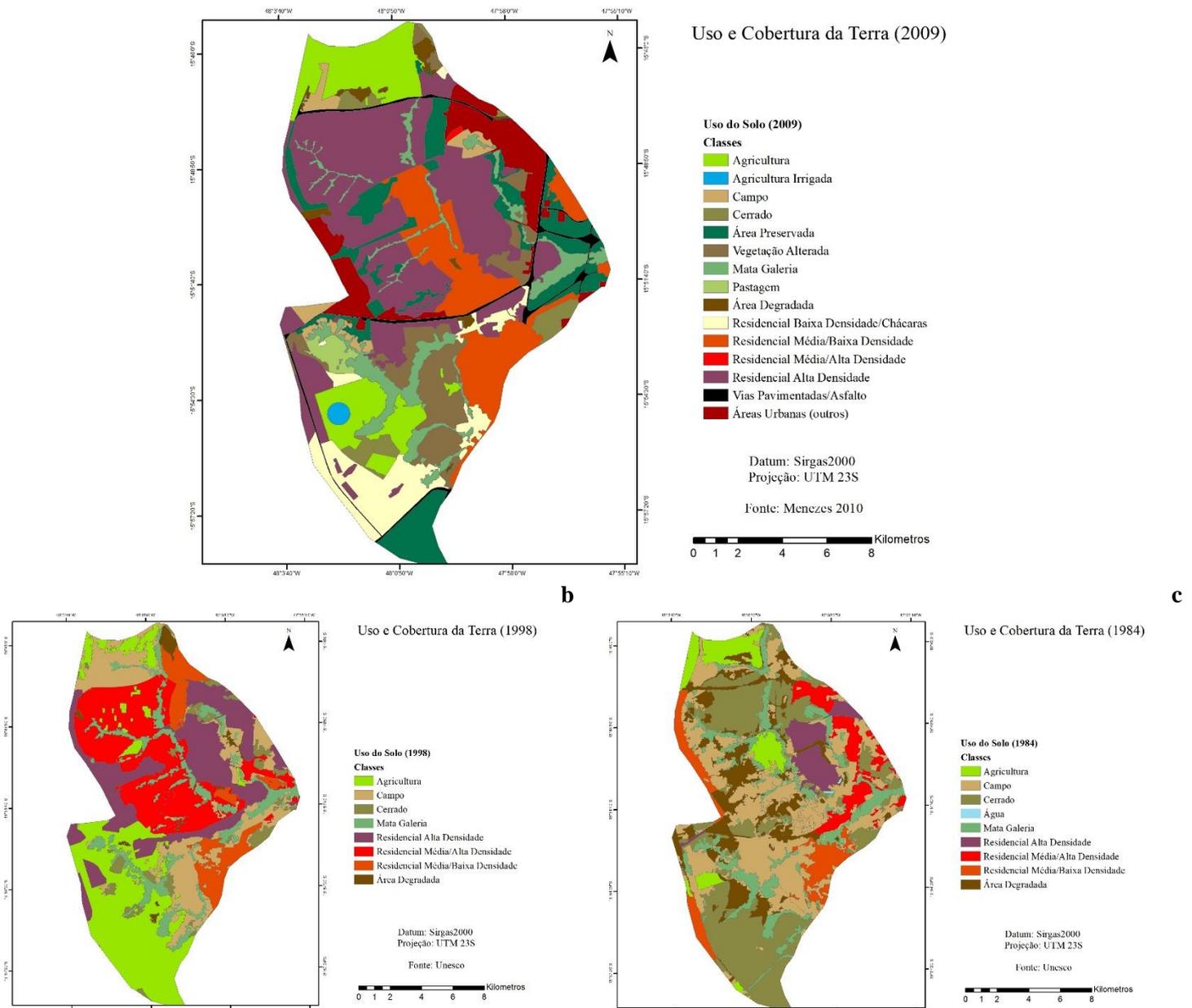


Figura 7 – Mapa de Uso e Cobertura da Terra após Reclassificação em 2009 (a), 1998 (b) e 1984 (c)

Classes de Uso do Solo	1984		1998		2009	
	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%
Água	0.117	0.05	-	-	-	-
Agricultura	12.992	5.99	50.468	23.26	22.887	10.51
Agricultura Irrigada	-	-	-	-	0.822	0.38
Área Degradada	26.681	12.30	2.608	1.20	2.666	1.22
Área Preservada	-	-	-	-	24.313	11.16
Áreas Urbanas (outros)	-	-	-	-	15.765	7.24
Campo	61.915	28.53	33.489	15.43	4.815	2.21
Cerrado	56.460	26.02	8.216	3.79	5.333	2.45
Mata Galeria	23.814	10.97	20.117	9.27	14.838	6.81

Pastagem	-	-	-	-	2.323	1.07
Residencial Alta Densidade	10.655	4.91	40.666	18.74	60.508	27.77
Residencial Baixa Densidade/Chácaras	-	-	-	-	15.573	7.15
Residencial Média/Alta Densidade	11.873	5.47	47.317	21.81	0.230	0.11
Residencial Média/Baixa Densidade	13.372	6.16	15.831	7.30	25.992	11.93
Vegetação Alterada	-	-	-	-	17.087	7.84
Vias Pavimentadas/Asfalto	-	-	-	-	4.704	2.16

Tabela 6 – Alterações nas Áreas de Classes de Uso

De acordo com os mapas de uso do solo na Figura 7 e com a Tabela 6, as classes referentes ao uso total de áreas urbanas representam cerca de 60% da ocupação em 2009, caracterizando a expansão dessas áreas assim como um maior adensamento populacional na região.

A série histórica dos dados climáticos foi obtida na estação meteorológica convencional OMM – 83377, operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, com frequência diária para o período entre Janeiro de 1989 a Dezembro de 2016, incluindo a precipitação (mm), temperaturas máxima e mínima (°C), umidade relativa do ar (%), radiação solar (horas) e velocidade do vento (mps). Dados ausentes da série foram gerados pelo Weather Generator do SWAT para que as médias mensais fossem calculadas nas simulações.

Na estação fluviométrica 60478400 – Ponte Aeroporto EPAR002, operada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal – Caesb, localizada nas proximidades do exutório da sub bacia do Riacho Fundo, foi obtida a série histórica da vazão (m³/s) com frequência mensal para o período entre Janeiro de 1989 a Dezembro de 2016, usada para a calibração e validação do modelo.

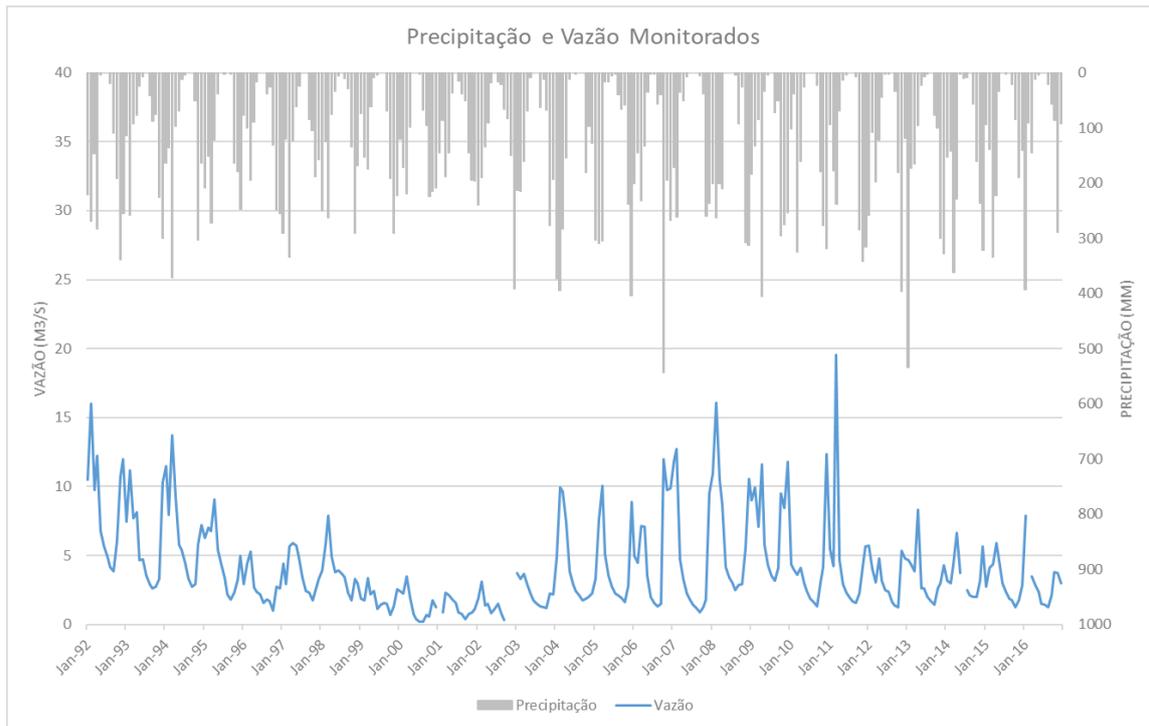


Figura 8 – Médias Mensais da Vazão e Precipitação Monitorada entre 1992 e 2016

2.3 Modelo SWAT

O SWAT é um modelo semi-distribuído e contínuo no tempo, que permite a simulação de processos hidrológicos, de sedimentos e qualidade da água para bacias de médio e grande porte [Arnold 2012].

O modelo hidrológico é separado nas fases de terreno e de propagação do fluxo d'água. A fase de terreno é simulada com base na equação do balanço hídrico:

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

sendo SW_t a quantidade final de água no solo (mm); SW_0 a quantidade inicial de água no solo no dia i (mm); t o tempo (dias); R_{day} a quantidade de chuva precipitada no dia i (mm); Q_{surf} a quantidade de escoamento superficial no dia i (mm); E_a a evapotranspiração total no dia i (mm); W_{seep} o volume de água percolada entre a camada simulada para a camada inferior no dia i (mm); e Q_{gw} a quantidade de água que retorna ao curso de água no dia i por meio do escoamento sub-superficial.

Para o cálculo do escoamento, a ferramenta utiliza o método Curva Número CN desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo – SCS, atual Serviço de Conservação de Recursos Naturais – SCRN, do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos – USDA. O método

permite estimar o escoamento superficial a partir de informações do tipo de solo, do uso e ocupação e da condição de umidade antecedente do solo por meio do cálculo do parâmetro adimensional CN que varia de 0 a 100.

Para áreas urbanas o valor do CN tende a ser alto para todos os grupos hidrológicos de solo. Em estudo realizado na bacia do Lago Paranoá, [Menezes 2010] estimou o valor do CN médio ponderado em 72 para a sub bacia do Riacho Fundo. Em [PDDU-DF 2008] foi realizada uma estimativa na região do Plano Piloto e proximidades de acordo com a densidade populacional na Figura 9:

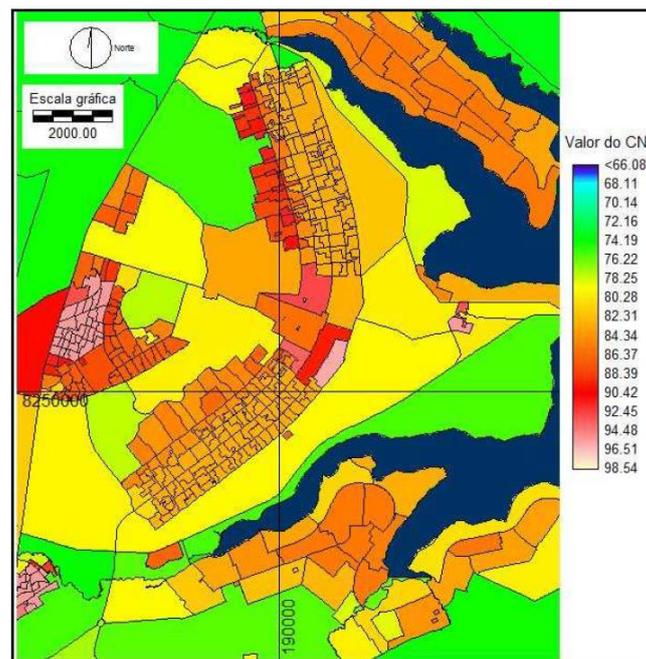


Figura 9 – Valor Médio do CN de Acordo com a Densidade Populacional. Fonte [PDDU-DF 2008]

Para o desenvolvimento do trabalho foi usada a extensão *ArcSWAT* do *Arcgis* e foram seguidos os passos do fluxograma:

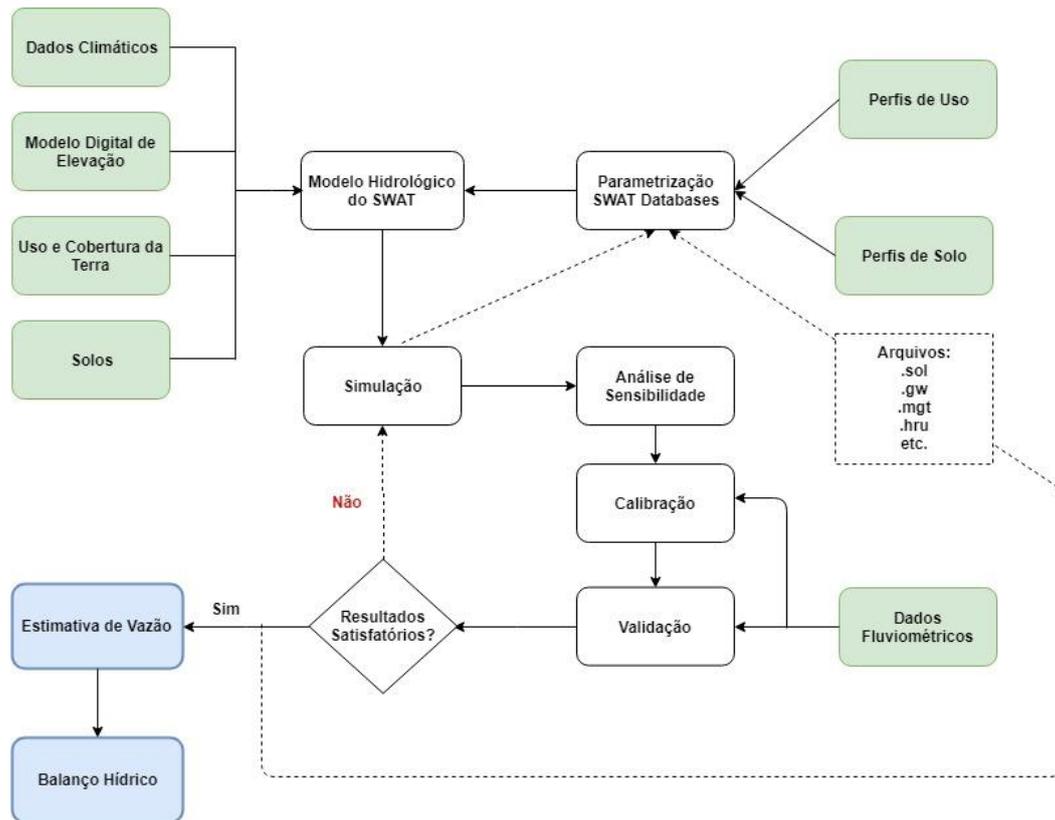


Figura 10 – Fluxograma

3. Resultados

A partir dos dados de entrada, foi possível delinear a bacia gerando um total de 25 sub bacias e 749 Unidades de Resposta Hidrológicas HRU's, sendo esta a combinação entre os tipos e usos dos solos e a declividade na região.

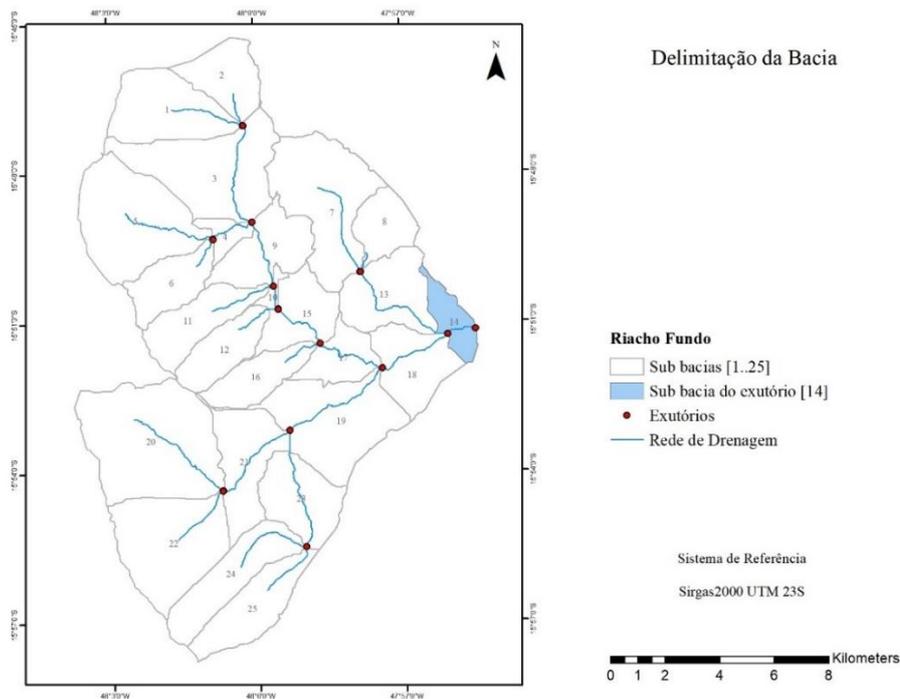


Figura 11 – Delimitação das Sub Bacias

3.1 Simulação Inicial (2009)

O próximo passo foi a simulação inicial para um período de 22 anos, entre 1989 e 2010, sendo os 3 primeiros para o aquecimento do modelo.

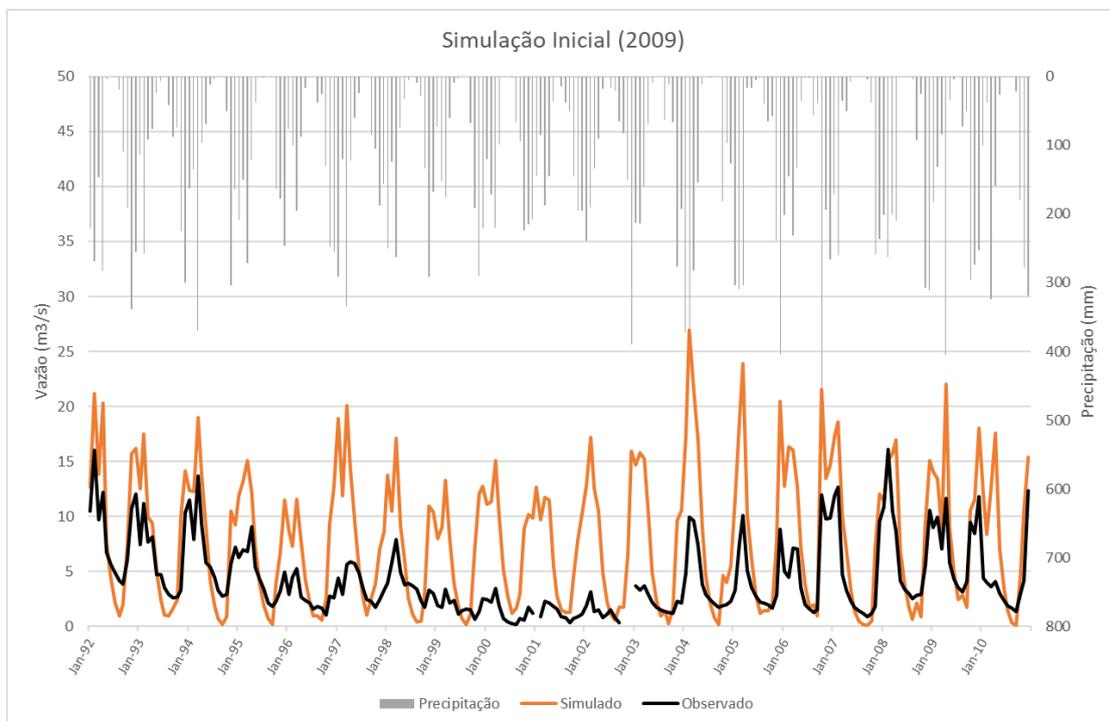


Figura 12 – Vazão Observada e Simulada entre 1992 e 2010

Na simulação inicial foi possível observar que a vazão não foi estimada de forma satisfatória, com os picos de vazão superestimados no

período chuvoso em quase todos os anos, com exceção dos anos 2008 e 2011. Para os períodos de estiagem a vazão foi subestimada em todos os anos.

Os indicadores foram 0.51 para o coeficiente de determinação R^2 e -1.91 para o coeficiente de eficiência ENS, considerados insatisfatórios segundo [Moriassi 2007], necessitando então a calibração do modelo.

As médias para escoamento superficial, subterrâneo e evapotranspiração de acordo com as classes de uso e ocupação do solo, para uma precipitação média de 1452 mm foram:

Classes	Escoamento Superficial	%	Escoamento Subterrâneo	%	Evapo-transpiração	%	Total
Agricultura	346.46	24.69	887.15	63.21	169.84	12.10	1403.45
Agricultura Irrigada	264.40	18.94	983.36	70.43	148.39	10.63	1396.15
Campo	135.29	9.73	1124.27	80.88	130.53	9.39	1390.09
Cerrado	17.92	1.30	1232.29	89.10	132.84	9.60	1383.05
Área Degradada	538.66	38.21	755.42	53.58	115.75	8.21	1409.83
Vegetação Alterada	230.75	16.48	1013.93	72.40	155.86	11.13	1400.54
Mata Galeria	29.49	2.12	1227.27	88.18	135.02	9.70	1391.78
Pastagem	243.08	17.26	1011.15	71.81	153.86	10.93	1408.09
Área Preservada	19.56	1.41	1165.07	83.83	205.23	14.77	1389.86
Áreas Urbanas	703.13	49.46	483.71	34.03	234.65	16.51	1421.49

Tabela 7 – Relação entre Variáveis do Ciclo Hidrológico e as Classes de Uso

De acordo com a Tabela 7, quanto maior a impermeabilidade do uso do solo maior é o escoamento superficial, enquanto o escoamento subterrâneo, que inclui, dentre outros, o fluxo lateral, a percolação, o fluxo de base e a recarga de aquífero, apresentou valores maiores para áreas com vegetação. A evapotranspiração não se comportou como o esperado, com valores menores para áreas mais impermeadas.

Segundo [Lima 2010], em estudos realizados em bacias rurais no Centro Oeste, do total da precipitação aproximadamente 30% é convertido em escoamento (cerca de 3% para o superficial e 27% para o escoamento de base) e 70% em evapotranspiração. Em seus estudos a vazão no exutório foi estimada em aproximadamente 30% do total precipitado. Outros estudos no Brasil verificaram uma variação na evapotranspiração entre 40% a 65% da precipitação [Uda 2013].

Variáveis	2009 (mm)	% sobre a Precipitação
Precipitação	1452.2	100
Evapotranspiração	204.1	14.05
Evapotranspiração Potencial	354.9	24.44
Escoamento superficial	473.51	32.61
Fluxo Lateral	100.38	6.91

Percolação	672.75	46.33
Fluxo de Base	632.64	43.56
Recarga de Aquífero	33.64	2.32
Ascensão Capilar	7.1	0.49

Tabela 8 – Balanço Hídrico na Simulação Inicial

Na Tabela 8 foram apresentados os valores estimados para as variáveis do ciclo hidrológico e a porcentagem sobre o total precipitado. O CN médio foi de 66.87.

3.2 Calibração e Validação

Dentre os estudos já realizados com o SWAT no Centro Oeste, os parâmetros que foram considerados mais sensíveis foram:

Baldissera (2005)	ALPHA_BF, GWQMN, GW_REVAP, REVAPMN, CN2
Sarmiento (2010)	CN2, SURLAG, RCHARG_DP, GWQMN, SOL_Z
Strauch (2010)	CN2, ALPHA_BF, CH_K2, ESCO, GW_DELAY
Ferrigo (2012)	ALPHA_BF, CN2, GW_DELAY, GWQMN, GW_REVAP
Salles (2012)	CN2, CH_K2, SURLAG, ALPHA_BF, ESCO
Ferrigo (2013)	SOL_AWC, GW_DELAY, GWHT, GW_REVAP, SOL_K, CN2, ALPHA_BF, SHALLST, GWQMN
Castro (2013)	SURLAG, ALPHA_BF, CN2, GWQMN, SOL_K
Nunes (2016)	GW_DELAY, CANMX, ALPHA_BNK, SHALLST, CN2
Teixeira (2016)	CN2, ALPHA_BF, GW_DELAY, ESCO, GWQMN, SOL_AWC, SOL_K, CANMX
Castro (2016)	CN2, ALPHA_BF, SURLAG, SOL_K, CANMX, RCHRG-DP, ESCO, GW_DELAY, GWQMN

Tabela 9 – Avaliação da Sensibilidade no Centro Oeste

Na calibração o objetivo foi diminuir o escoamento superficial e aumentar a evapotranspiração. Logo, de acordo com o levantamento dos parâmetros mais sensíveis na Tabela 9, foram selecionados 10 parâmetros a serem calibrados, seus respectivos intervalos e métodos, sendo r para multiplicação e v para a substituição dos valores:

Parâmetros	Arquivo	Descrição	Método	Min	Max
CN2	.mgt	Curva Número da condição de umidade do solo	r (*)	-0.2	0.2
ALPHA_BF	.gw	Constante de recessão do escoamento de base	v (=)	0	1
GW_DELAY	.gw	Tempo de retardo da água subterrânea	v (=)	30	45
GWQMN	.gw	Profundidade mínima do aquífero raso para que ocorra escoamento subterrâneo	v (=)	0	2
GW_REVAP	.gw	Coefficiente de escoamento de água do aquífero raso para a zona insaturada	v (=)	0	0.2
GWHT	.gw	Altura inicial da água subterrânea	v (=)	4	10

SHALLST	.gw	Profundidade inicial do aquífero raso	v (=)	2000	5000
REVAPMN	.gw	Profundidade de água no aquífero raso para que ocorra “revap”	v (=)	0	500
ESCO	.hru	Fator de compensação de evaporação da água do solo	v (=)	0.8	1
CH_N2	.rte	Coefficiente de rugosidade de Manning para o canal principal	r (*)	-0.01	0.2

Tabela 10 – Parâmetros Calibrados

A análise de sensibilidade pelo método global apresentou que os parâmetros mais sensíveis pelos métodos p-Value e t-Stat, em ordem inversa no p-Value e direta no t-Stat de acordo com os valores, foram o ALPHA_BF, GW_DELAY, ESCO, CN2 e GW_REVAP:

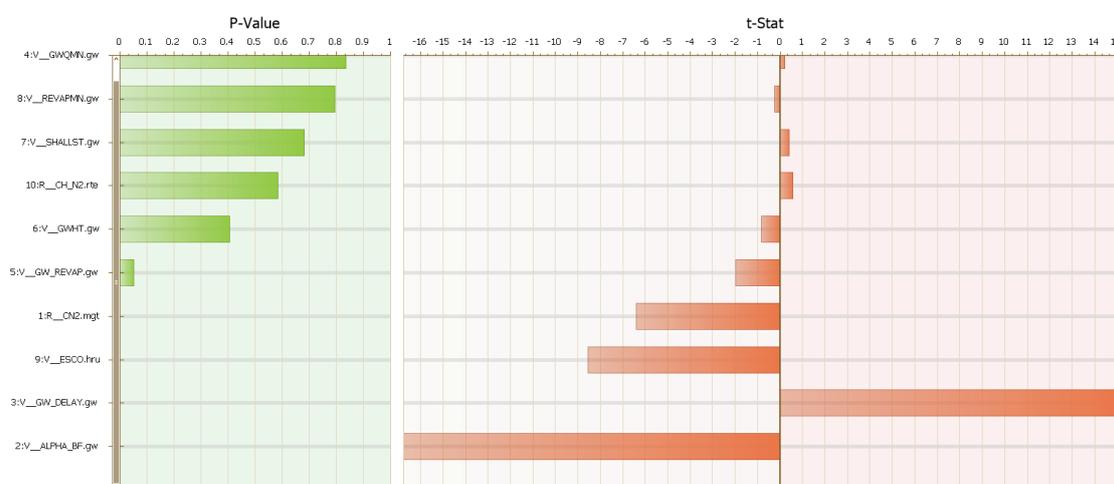


Figura 13 – Análise de Sensibilidade

Essa etapa foi realizada com calibração automática no SWAT CUP – *Swat Calibration and Uncertainty Program*. O método escolhido foi o Sufi2 – *Sequential Uncertainty Fitting*, com os indicadores das funções objetivo R^2 e ENS.

Foram realizadas 4 iterações com 500 simulações cada na calibração para o período entre 1992 e 2010 e uma iteração para a validação entre 2011 e 2016.

Em seguida, os novos valores dos parâmetros calibrados foram substituídos no modelo gerando a simulação final.

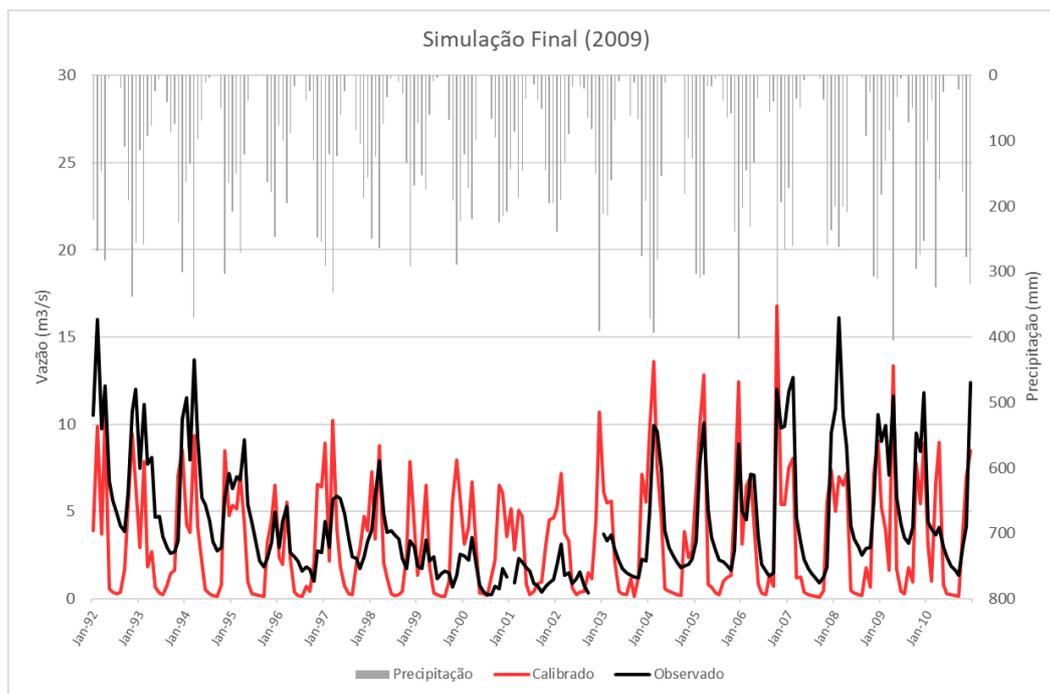


Figura 14 – Simulação Final Após Calibração em 2009.

	R²	ENS
Calibração	0.38	0.17
Validação	0.21	-0.92

Tabela 11 – Indicadores para a Calibração e Validação

A partir do gráfico e dos indicadores, foi possível observar que a estimativa da vazão após a calibração não obteve resultados satisfatórios. Com exceção dos anos iniciais e do período entre 2008 a 2011, as vazões de pico foram superestimadas e as vazões de recessão foram aproximadamente nulas em todos os anos.

Variáveis	2009 (mm)	% sobre a Precipitação
Precipitação	1452.2	100
Evapotranspiração	212.7	14.65
Evapotranspiração Potencial	354.9	24.44
Escoamento superficial	382.05	26.31
Fluxo Lateral	111.62	7.69
Percolação	744.57	51.27
Fluxo de Base	0	0
Recarga de Aquífero	37.23	2.56
Ascensão Capilar	7.1	0.49

Tabela 12 – Balanço Hídrico Após a Calibração em 2009

De acordo com os parâmetros selecionados para a calibração, tanto o aumento da evapotranspiração quanto a diminuição do escoamento

superficial foram insuficientes, além de o fluxo de base ter sido reduzido para 0, indicando erro no processamento da ferramenta.

O CN médio na região foi de aproximadamente 58, sendo incompatível com os estudos já realizados.

3.3 Simulação Histórica (1984 e 1998)

A estratégia definida para a análise da variação no uso do solo foi simular e calibrar o modelo inicialmente com o mapa de uso de 2009, que foi definido como a *baseline* do modelo, para posteriormente gerar uma nova simulação com os mapas históricos do uso do solo (1998 e 1984), inserindo nestes os valores dos parâmetros calibrados da simulação de 2009.

Para a série histórica dos usos do solo em 1998 e 1984 foi repetido o mesmo procedimento, com simulações iniciais e a posterior parametrização com os valores calibrados no modelo de 2009 para gerar a simulação final, sendo todos os dados de entrada os mesmos que o de 2009 com exceção do mapa de uso do solo.

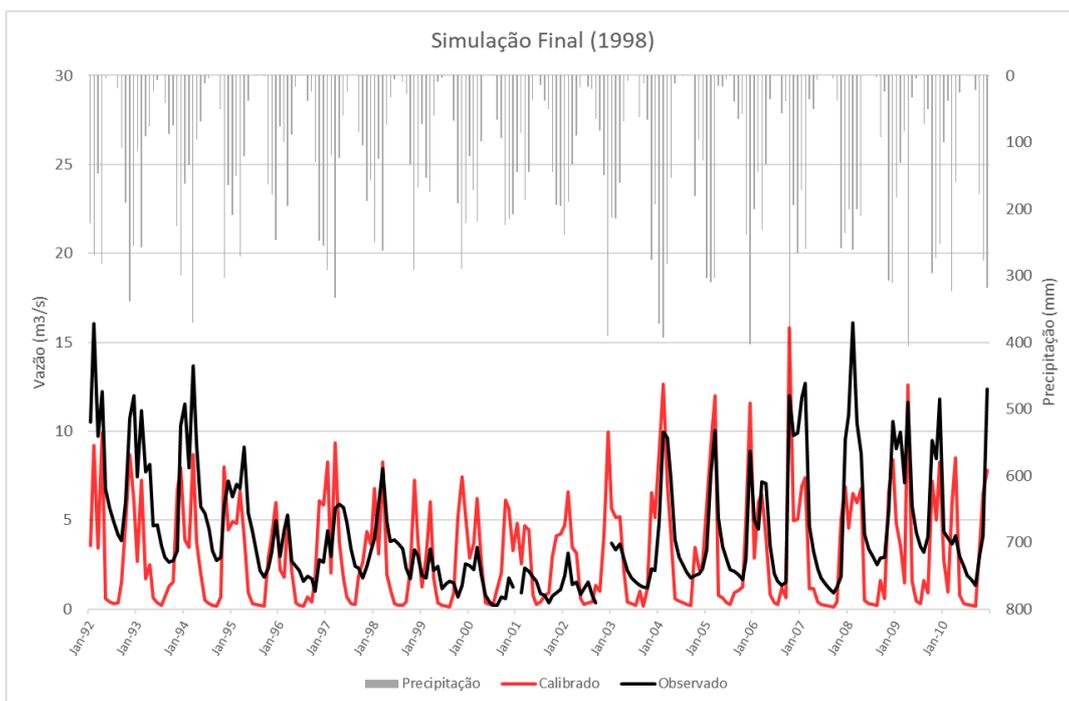


Figura 15 – Simulação para o Uso do Solo de 1998

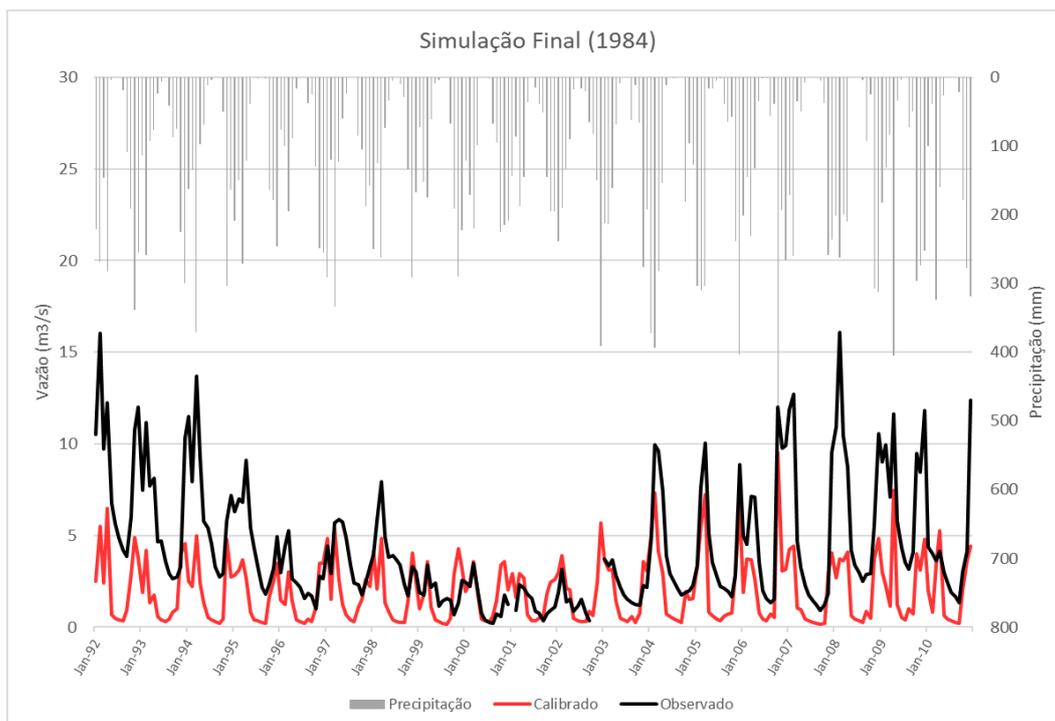


Figura 16 – Simulação para o Uso do Solo de 1984

Para ambos os períodos, a vazão simulada foi superestimada no período chuvoso e subestimada no período de recessão.

Variáveis	Simulação Final					
	1984	%	1998	%	2009	%
Precipitação	1452.2	100	1452.2	100	1452.2	100
Evapotranspiração	163.8	11.28	199.9	13.77	212.7	14.65
Escoamento superficial	110.5	7.61	336.5	23.17	382.05	26.31
Fluxo Lateral	146.57	10.09	117.32	8.08	111.62	7.69
Percolação	1029.53	70.89	797.07	54.89	744.57	51.27
Fluxo de Base	0	0	0	0	0	0
Recarga de Aquífero	51.48	3.54	39.85	2.74	37.23	2.56
Ascensão Capilar	7.1	0.49	7.1	0.49	7.1	0.49

Tabela 13 – Balanço Hídrico Após a Calibração nos Anos de 1984, 1998 e 2009.

Na Tabela 13 se destaca, dentre as variáveis estimadas no balanço hídrico, o aumento considerável no escoamento superficial ao longo dos anos e por consequência a diminuição do escoamento subterrâneo, condizente com os efeitos do aumento das áreas impermeabilizadas nas áreas urbanas como citado na Figura 4.

4. Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo estimar a vazão em uma sub-bacia urbana e analisar os efeitos das alterações no uso do solo ao longo do tempo sobre os processos hidrológicos na região.

A partir dos resultados verifica-se a necessidade de adotar novas estratégias para se tentar alcançar valores satisfatórios tais como fazer uma nova análise de sensibilidade para rever os parâmetros a serem calibrados e suas respectivas faixas de valores. Outras possibilidades de melhorias também poderiam ser testadas como a alteração dos dados de entrada para o tamanho das séries monitoradas da vazão de acordo com [Brighenti 2015] com a comparação entre *timesteps* diários, mensais e anuais para outros períodos, a definição de outro ano para a *baseline* do modelo, além do uso de outras funções na calibração como os métodos PSO, *Glue* e *Parasol*.

A partir do estudo foi possível observar a correlação entre o aumento das áreas impermeadas no uso do solo com o aumento do escoamento superficial devido ao suporte da ferramenta em espacializar as alterações para cada HRU. Para detalhar os estudos sobre os efeitos da urbanização, verifica-se a necessidade de avaliar também outras vazões intermediárias na sub-bacia e não somente a do exutório, principalmente nos locais de maior densidade urbana como nas proximidades do Córrego Vicente Pires e seus afluentes.

5. Referências Bibliográficas

AGUIAR, M. R. F. Análise da descarga sólida em suspensão na Bacia do Riacho Fundo, Brasília - DF. 2015. xi, 87 f., il. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) - Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

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. SWAT: Model use calibration and validation. *Trans. ASABE*, v. 55, n. 4, p. 1494-1508, 2012.

BALDISSERA, G. C. Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT. Cuiabá, 2005. 144p. Dissertação de Mestrado – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso.

BAKER, Tracy J.; Miller, Scott N. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed, *Journal of Hydrology*, Volume 486, 2013, Pages 100-111, ISSN 0022-1694.

BLAINSKI, E.; Porras, E. A. A.; Garbossa, L. H. P.; Pinheiro, A. Simulação de cenários de uso e ocupação das terras na bacia hidrográfica do Rio Camboriú utilizando o modelo SWAT. RBRH 2017, vol.22.

BRIGUENTHI, T. M.; Bonuma, N. B.; Chaffe, P. L. B. Calibração hierárquica do modelo Swat em uma bacia hidrográfica Catarinense. RBRH 2016, vol.21

CASTRO, K.B. Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do Cerrado intensamente monitorada. Dissertação de Mestrado em Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

DIAS, D. F. Processos geoquímicos na interface sedimento-água no braço Riacho Fundo do Lago Paranoá – DF. 2017. x, 88 f., il. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) - Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

ECHEVERRIA, R. M. Avaliação de impactos ambientais nos tributários do lago Paranoá, Brasília - DF. 2007. 132 f. Dissertação (Mestrado em Geologia)-Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

FERRIGO, S. Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática – estudo de caso da bacia do Lago Descoberto – DF. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

GASSMAN P., Tao, C., C. Xiaoling, L. Jianzhong, S. Sabine and S.P. José-Miguel. Assessing impacts of different land use scenarios on water budget of Fuhe River, China using SWAT model. 2015. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. Volume: 8(3). Pages: 95-109.

LIMA, J. E. F. W. Modelagem numérica do fluxo da água no solo e do escoamento de base em uma bacia experimental em área agrícola no Cerrado. Dissertação de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, 312 p., 2010.

MENEZES, P. H. B. J. Avaliação do efeito das ações antrópicas no processo de escoamento superficial e assoreamento na bacia do Lago Paranoá. 2010. ix, 123 f., il. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas)-Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

MORIASI , D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. Asabe*, 50(3), 885-900.

NUNES, G. 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, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, (148p), 2016.

PDDU-DF. Plano Diretor de Drenagem Urbana/DF 2008. Disponível em: <http://www.adasa.df.gov.br/drenagem-urbana/plano-diretor-de-drenagem-urbana-pddu-df>. Acessado em Março de 2018.

REATTO, A., Martins, E.S., Farias, M.F.R., Silva, A.V., Carvalho Jr, O.A. (2004). Mapa Pedológico Digital - SIG Atualizado do Distrito Federal, Escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo. Empresa Brasileira de Solos (EMBRAPA).

SALLES, L. Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pípiripau. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade de Brasília, 2012.

SARMENTO, L. Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas. Tese de Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.

TUCCI, C.E.M. Gerenciamento da Drenagem Urbana. In: *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. V.7 n.1. Jan/Mar. 5-27. 2002.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. *Estudos avançados*, v.22, n.63, p.1-16. 2008.

UDA, P. K; Corseuil, C. W; Kobiyama, M; Silva, F. V. Análise da evapotranspiração real diária para diferentes usos e coberturas do solo da bacia do rio Negrinho – SC por meio do modelo SEBAL e imagens ASTER. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 2013.

UNESCO. Vegetação do Distrito Federal. Tempo e Espaço. Uma Avaliação Multitemporal da Perda de Cobertura Vegetal no DF e da Diversidade Florística. 2ª ed. Brasília – DF 80p, 2002.

ZHANG, A.; Zhang, C., Wang G. Assessments of Impacts of Climate Change and Human Activities on Runoff with SWAT for the Huifa River Basin, Northeast China. Water Resources Management. 2012.