

**ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA DOS PARÂMETROS DO MODELO SWAT
OBTIDOS POR CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA – ESTUDO DE CASO DA BACIA
DO LAGO DESCOBERTO - DF**

SARA FERRIGO

**Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

**ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA DOS PARÂMETROS DO MODELO
SWAT OBTIDOS POR CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA – ESTUDO DE
CASO DA BACIA DO LAGO DESCOBERTO - DF**

SARA FERRIGO

**ORIENTADOR: SERGIO KOIDE
CO-ORIENTADOR: RICARDO TEZINI MINOTI**

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

**PUBLICAÇÃO: PTARH.DM – 159/14
BRASÍLIA/DF: MARÇO - 2014**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PÓS GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS**

**ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA DOS PARÂMETROS DO MODELO SWAT
OBTIDOS POR CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA – ESTUDO DE CASO DA BACIA
DO LAGO DESCOBERTO - DF**

SARA FERRIGO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS.

APROVADA POR:

PROF. SERGIO KOIDE, PhD (ENC-UnB)
(Orientador)

PROF. RICARDO TEZINI MINOTI, DOUTOR (ENC-UnB)
(Co-orientador)

PROF. CONCEIÇÃO DE MARIA DE ALBUQUERQUE ALVES, PhD (ENC-UnB)
(Examinador Interno)

PROF. ABELARDO ANTÔNIO DE ASSUNÇÃO MONTENEGRO, PhD (DTR-UFRPE)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, MARÇO DE 2014.

FICHA CATALOGRÁFICA

FERRIGO, SARA

Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática – Estudo de caso da bacia do lago Descoberto – DF

xviii, 164p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2014).

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

1. Modelagem Hidrológica

3. Análise de Sensibilidade

2. SWAT

4. Calibração Automática

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

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.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Sara Ferrigo.

TÍTULO: Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática – Estudo de caso da bacia do lago Descoberto – DF

GRAU: Mestre

ANO: 2014

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

Sara Ferrigo

saraferrigo@gmail.com

Dedico
ao meu marido Gabriel
e aos meus pais Itamar e Silvana,
com muito carinho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Itamar e Silvana, obrigada pela força, dedicação e oportunidades. Esse trabalho é fruto do que construímos juntos. Serei eternamente grata!

Ao meu marido Gabriel, pelo apoio, incentivo, amor, carinho e compreensão. Você foi essencial para isso acontecer. Muito obrigada!

Ao meu orientador e professor Sergio Koide, meus sinceros agradecimentos pelos ensinamentos, confiança, paciência e por todas as orientações.

Ao meu co-orientador Ricardo Minoti, meus sinceros agradecimentos por toda atenção, conversas, orientações, compreensão e amizade.

Ao professor Henrique Roig, pela atenção, confiança e oportunidades.

Aos professores: Conceição, Dirceu, Oscar, Cristina, Ariuska, Marco Antonio, Yovanka, Lenora e Carlos. Muito obrigada pelos ensinamentos, admiro muito o trabalho de vocês e tenho uma consideração enorme por todos!

Ao Israel, Nati e Théo, por serem motivo de muitas alegrias minhas.

À minha irmã pela mais fiel amizade.

À Leila, que mesmo distante eu tenho sua amizade verdadeira.

Aos meus amigos PTARHianos: Fernanda, Carol, Erica, Bruna e Bruno, muito obrigada pela companhia de todos os dias, pelo apoio, pelas discussões e principalmente pela amizade!

Aos casais: Ellen e Paulinho e Catarina e Júnior, obrigada pela amizade verdadeira!

Aos amigos, colegas de sala e de aula: Lucas Liporoni, Cláudia Guimarães, Cahola, Claudinha, Rovená, Ingrith, Ana Maria, Matheus, Cassio, Pedro, Luiz Gustavo e Vinicius.

À Caesb, pela disponibilização dos dados, em especial ao Augusto, Maria do Carmo, Joner e Vanusa pela atenção sempre dispensada. À Maria Cristina Karas, Daniela e Pedro, por fazerem parte de muitas etapas desse trabalho.

À EMATER, em especial à Priscila, pelas informações disponibilizadas,

À ADASA, Rafael e Mônica, pelas oportunidades de trabalhar junto no desenvolvimento da bacia.

À Fabiana, pelas oportunidades durante o plano de manejo da APA.

À Embrapa, ao INMET e à Terracap, pela disponibilização dos dados.

À todos participantes do grupo de modelagem, em especial à Kássia e à Diana, pelas discussões sobre modelagens e pelas amizades.

Ao CNPq pela bolsa de mestrado, ao MCTI, FINEP e FAP-DF pelo financiamento do projeto qual este trabalho está inserido.

A todas as pessoas que mencionei e as que não mencionei, que contribuíram diretamente e indiretamente no desenvolvimento desse estudo, meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

A modelagem hidrológica pode auxiliar a compreensão dos processos físicos e a avaliação dos impactos nos recursos hídricos e no meio ambiente, advindos principalmente do desenvolvimento rural e da expansão urbana em bacias hidrográficas. No entanto, a modelagem de um sistema requer etapas indispensáveis para a obtenção de resultados coerentes com a realidade, confiáveis e de qualidade. Considerando essa problemática, o objetivo deste trabalho foi avaliar a representatividade dos parâmetros do modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) obtidos por calibração automática das vazões de uma bacia hidrográfica, para utilização em outras cinco bacias que contribuem para o lago Descoberto no Distrito Federal, analisando conjuntamente a simulação da dinâmica hidrológica. Foi realizada a análise de sensibilidade do modelo a 14 parâmetros escolhidos pelo grau de importância durante a simulação inicial do modelo e pelas dificuldades observadas no processo de simulação das vazões. A calibração dos parâmetros em nível diário para os anos hidrológicos de 2005 a 2010 para a sub-bacia do rio Descoberto (SBRD) foi considerada satisfatória, tendo sido obtido um coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,4 e um coeficiente de determinação (R^2) de 0,44. Na verificação, para o período de 2010 a 2013, obteve-se um NSE de 0,48 e um R^2 de 0,46. Na SBRD, durante os anos hidrológicos de 2005 a 2010, os erros percentuais entre os valores das vazões observada e simulada, nas estações de chuva e seca, foram respectivamente de 35% e 56%, o que evidenciou que o modelo apresentou maiores dificuldades na simulação do fluxo de base durante o período de estiagem. A verificação da representatividade dos parâmetros calibrados automaticamente para a SBRD em nível mensal foi considerada satisfatória para outras quatro sub-bacias. Apenas a sub-bacia do córrego Olaria não apresentou resultados estatísticos satisfatórios. Os valores obtidos nas simulações para os componentes do ciclo hidrológico foram coerentes com trabalhos experimentais anteriores. Em relação à recarga ao aquífero raso, a diferença entre o observado e o simulado foi de 4,23% na sub-bacia do córrego Capão Comprido (SBCCC). A simulação da carga de sedimentos foi ruim, pois a modelagem levou a apenas 37,4% da carga total de sedimentos medida na SBCCC. Esses resultados mostraram a importância da escolha de parâmetros determinantes para o estudo, além da viabilidade do uso dos parâmetros obtidos por calibração automática em bacias hidrográficas similares.

PALAVRAS CHAVES: Modelagem Hidrológica, SWAT, Análise de Sensibilidade, Calibração Automática.

ABSTRACT

Hydrological modeling can help the understanding of physical processes and assessment of impacts on water resources and the environment caused by rural development and urban expansion in watersheds. However, modeling water systems requires essential steps for obtaining consistent and reliable results. This study aims to evaluate the representativeness of parameters hydrological model SWAT (Soil and Water Assessment Tool) obtained by automatic calibration of the surface flow from a watershed, for use in other five watershed that contribute to the Descoberto Lake in the Federal District, including the analysis of hydrological dynamics simulation. Sensitivity analysis of the model was performed for 14 parameters chosen by degree of importance during the initial simulation and the observed difficulties in simulating the flows. The parameter calibration at daily basis for the hydrological years 2005 to 2010 for the River Descoberto (SBRD) was satisfactory. It led to a Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) of 0.4 and a coefficient of determination (R^2) of 0.44. The validation for the period 2010 to 2013 led to NSE of 0.48 and a R^2 of 0.46. The percentage errors between the observed and simulated flow values in SBRD during the hydrological years of 2005 to 2010, were 35% and 56% at the rainy and dry seasons, respectively. It was found difficulties to simulate the base flow during the dry season. The validation of the representativeness of the parameters automatically calibrated for SBRD at monthly basis were satisfactory for other four sub-basins. The study found non-satisfactory statistical results only for Olaria Creek. The values obtained in the simulations of hydrological cycle components were consistent when compared to previous experimental works. Concerning to the shallow aquifer recharge, the difference between observed and simulated data was 4.23% for Capão Comprido Creek sub-basin (SBCCC). The simulation of sediment load was not good considering that it led to only 37.4% of the total sediment loads, measured in SBCCC. These results show the importance of the parameters selected for the study, and the feasibility of use of parameters obtained by automatic calibration in similar watersheds.

KEYWORDS: Hydrologic Modeling, SWAT, Sensitivity Analysis, Automatic Calibration.

SUMÁRIO

1 -	INTRODUÇÃO.....	1
2 -	OBJETIVOS.....	5
2.1 -	OBJETIVO GERAL	5
2.2 -	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
3 -	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
3.1 -	MODELOS HIDROLÓGICOS	6
3.1.1 -	<i>Evolução dos Modelos</i>	8
3.1.2 -	<i>Principais Modelos Hidrológicos Disponíveis</i>	9
3.1.3 -	<i>Etapas da Modelagem</i>	15
3.1.4 -	<i>Aplicação dos Modelos</i>	17
3.2 -	MODELO SWAT	18
3.2.1 -	<i>Estrutura do modelo SWAT</i>	20
3.2.2 -	<i>Caracterização e equacionamento</i>	21
3.2.3 -	<i>Aprimoramentos</i>	39
3.2.4 -	<i>Inputs</i>	43
3.2.5 -	<i>SWAT-CUP</i>	44
4 -	MATERIAL E MÉTODOS	50
4.1 -	CARACTERIZAÇÃO DAS SUB-BACIAS DE ESTUDO	50
4.2 -	PROGRAMAS COMPUTACIONAIS	54
4.3 -	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS PARA AS BASES DE DADOS DO MODELO.....	54
4.4 -	MODELAGEM INICIAL COM O SWAT	55
4.5 -	SELEÇÃO DOS PARÂMETROS E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO	56
4.5.1 -	<i>Análise de Sensibilidade Global</i>	59
4.5.2 -	<i>Análise de Sensibilidade Individual</i>	59
4.6 -	CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO	60
4.7 -	ANÁLISE DOS RESULTADOS	62
5 -	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
5.1 -	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	63
5.1.1 -	<i>Clima</i>	65
5.1.2 -	<i>Tipos de solos</i>	71
5.1.3 -	<i>Relevo</i>	73
5.1.4 -	<i>Uso do solo</i>	74
5.1.5 -	<i>Uso da água</i>	76
5.1.6 -	<i>Dados Observados</i>	78
5.1.7 -	<i>Sub-bacias e HRUs</i>	79
5.2 -	AValiação da Modelagem Inicial na SBRD	80
5.3 -	SELEÇÃO DOS PARÂMETROS E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	83
5.4 -	CALIBRAÇÃO DO MODELO SWAT PARA A SUB-BACIA DO RIO DESCOBERTO	92

5.5 - VERIFICAÇÃO DO MODELO SWAT	105
5.5.1 - Verificação do modelo para a sub-bacia do rio Descoberto (SBRD)	105
5.5.2 - Verificação na sub-bacia do córrego Chapadinha (SBCC)	108
5.5.3 - Verificação da sub-bacia do córrego Olaria	110
5.5.4 - Verificação da sub-bacia do córrego Rodeador	112
5.5.5 - Verificação da sub-bacia do córrego Capão Comprido	114
5.5.6 - Verificação da sub-bacia do Ribeirão das Pedras	116
5.5.7 - Resumo da avaliação de eficiência do modelo SWAT	118
5.6 - SIMULAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO	119
5.7 - OUTROS RESULTADOS	126
6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	127
7 - REFERÊNCIAS	130

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Caracterização dos diferentes usos e ocupação do solo na BHL D.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabela 2 - Parâmetros utilizados na Análise de Sensibilidade, descrição, função e respectivos intervalos mínimo e máximo de variação.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 3 - Funções objetivo e respectivas equações.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 4 - Área de drenagem das sub-bacias de estudo e respectiva percentagem de ocupação na BHL D.</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 5 - Informações básicas sobre as estações pluviométricas.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 6 - Área de influência das estações pluviométricas em cada sub-bacia de estudo.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 7 - Áreas e respectivas porcentagens de cada tipo de solo em cada sub-bacia de estudo.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 8 - Classes de declividade e respectivas áreas e porcentagens em cada sub-bacia de estudo.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 9 - Áreas e respectivos percentuais dos usos e ocupação do solo em cada sub-bacia de estudo.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabela 10 - Vazões de retirada de água superficial outorgada nas sub-bacias de estudo.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 11 – Número de sub-bacias de drenagem e de Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) nas sub-bacias estudadas.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 12 - Características dos parâmetros utilizados na Análise de Sensibilidade da Sub-bacia do Rio Descoberto (SBRD).....</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 13 - Valores de t-Stat e P-Value obtidos durante a análise de sensibilidade global da SBRD</i>	<i>86</i>
<i>Tabela 14 - Avaliação da sensibilidade dos parâmetros em estudos brasileiros.</i>	<i>88</i>
<i>Tabela 15 - Condutividade hidráulica para diferentes materiais representativos (Adaptado de Távora, 2010 (Singhal e Gupta, 1999).....</i>	<i>90</i>
<i>Tabela 16 - Parâmetros, métodos, intervalos e valores resultantes da calibração da SBRD.</i>	<i>93</i>
<i>Tabela 17 - Avaliação da percentagem residual na simulação da SBRD em relação aos valores de vazão observados.</i>	<i>96</i>
<i>Tabela 18 - Avaliação da percentagem residual na simulação da SBRD em relação aos valores de vazão observados no período de seca.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabela 19 - Avaliação estatística do coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE) e do coeficiente de determinação (R^2) na verificação da SBCC.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabela 20 - Avaliação estatística do coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE) e do coeficiente de determinação (R^2) na verificação da SBCO.....</i>	<i>112</i>
<i>Tabela 21 - Avaliação estatística do coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE) e do coeficiente de determinação (R^2) na verificação da SBCR.</i>	<i>114</i>
<i>Tabela 22 - Avaliação estatística do coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE) e do coeficiente de determinação (R^2) na verificação da SBCCC.</i>	<i>116</i>
<i>Tabela 23 - Avaliação estatística do coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE) e do coeficiente de determinação (R^2) na verificação da SBRP.</i>	<i>118</i>
<i>Tabela 24 – Quadro resumo dos resultados estatísticos obtidos nas análises de verificação do modelo SWAT nas sub-bacias.</i>	<i>118</i>

<i>Tabela 25 – Valores relacionados ao ciclo hidrológico simulado nas sub-bacias.....</i>	<i>120</i>
<i>Tabela 26 - Relações do ciclo hidrológico simulado nas Sub-bacias em estudo.....</i>	<i>120</i>
<i>Tabela 27 - Relações Vazão(Q)/Precipitação(Pcp) e Evapotranspiração(Et)/Precipitação(Pcp) nas sub-bacias estudadas de acordo com o balanço hídrico obtido dos valores observados.....</i>	<i>121</i>

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Estrutura do modelo SWAT (Adaptado de Gassman et al., 2007 e Arnold et al., 2012a).</i>	21
<i>Figura 2 - Esquema do movimento da água na fase terrestre e fase aquática no SWAT (Adaptado de Neitsch et al., 2009).</i>	23
<i>Figura 3 - Relação de escoamento superficial e da precipitação pelo método SCS Curve Number. (Adaptado de Neitsch et al., 2009)</i>	25
<i>Figura 4 - Distribuição da umidade na profundidade do solo de acordo com a realidade e modelada pela equação de Green e Ampt. (Adaptado de Neitsch et al., 2009)</i>	26
<i>Figura 5 – Distribuição da demanda de evaporação do solo de acordo com a profundidade.</i>	35
<i>Figura 6 - Ilustração conceitual da relação entre as incertezas dos parâmetros e a incerteza na simulação (Fonte: Abbaspour et al., 2007).</i>	45
<i>Figura 7 – Avaliação da sensibilidade de um parâmetro (P2) de acordo com a posição em que outro parâmetro (P1) é mantido constante (Fonte: Abbaspour et al. 2007)</i>	60
<i>Figura 8 - Localização geográfica da bacia hidrográfica do lago Descoberto (BHL D).</i>	63
<i>Figura 9 - Sub-bacias de estudo da bacia do Lago Descoberto.</i>	64
<i>Figura 10 - Disposição dos postos pluviométricos inseridos e próximos as sub-bacias de estudo.</i>	66
<i>Figura 11 - Espacialização da disponibilidade de dados de precipitação das estações pluviométricas no tempo.</i>	66
<i>Figura 12 - Precipitação média mensal das estações pluviométricas (1971-2013).</i>	67
<i>Figura 13 - Precipitação média anual das estações (1971-2013).</i>	67
<i>Figura 14 - Polígonos de Thiessen na BHL D.</i>	68
<i>Figura 15 - Precipitação média mensal na BHL D e nas sub-bacias de estudo de acordo com a influência da pluviosidade medida em cada estação pluviométrica (1971-2013) e calculada pelos polígonos de Thiessen.</i>	69
<i>Figura 16 - Temperaturas máximas, médias e mínimas mensais referentes à série histórica disponível de 1962 a 2013.</i>	70
<i>Figura 17 - Umidade relativa do ar média mensal referente à série histórica disponível de 1962 a 2013.</i>	71
<i>Figura 18 - Tipos de solos presente na bacia do lago Descoberto.</i>	72
<i>Figura 19 - Mapa de declividade da bacia do lago Descoberto.</i>	74
<i>Figura 20 - Mapa de uso e ocupação do solo das sub-bacias em estudo desenvolvido para a presente modelagem.</i>	75
<i>Figura 21 - Pontos de captação de água superficial e subterrânea outorgados na bacia do lago Descoberto.</i>	77
<i>Figura 22 - Postos fluviométricos de medições diárias (pontos amarelos) e mensais (pontos vermelhos) na BHL D.</i>	79
<i>Figura 23 – Sub-bacias de drenagem e Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) das sub-bacias estudadas.</i>	80

<i>Figura 24 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado (sem calibração) da SBRD para os anos hidrológicos correspondentes ao período de 2005 a 2010.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 25 - Diagrama de dispersão das vazões observada (x) e simulada (y) inicialmente pelo modelo SWAT.</i>	<i>82</i>
<i>Figura 26 - Resultado da análise de sensibilidade global da SBRD ranqueando os parâmetros mais sensíveis em ordem crescente.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 27 - Distribuição da relação do valor atribuído ao parâmetro (eixo x) versus a referente resposta no valor da função objetivo de Nash e Sutcliffe (eixo y).</i>	<i>87</i>
<i>Figura 28 - Importância relativa dos parâmetros utilizados na análise de sensibilidade da SBRD em relação aos diversos trabalhos publicados no Brasil.</i>	<i>89</i>
<i>Figura 29 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado na SBRD (Descoberto Chácara 89) após a calibração dos parâmetros.</i>	<i>93</i>
<i>Figura 30 - Diagrama de dispersão dos valores observados e simulados de vazão após a calibração do modelo na SBRD (Descoberto Chácara 89).</i>	<i>94</i>
<i>Figura 31 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado da SBRD (Descoberto Chácara 89) no ano hidrológico de 2009-2010 com calibração dos parâmetros.</i>	<i>95</i>
<i>Figura 32 - Diagrama de dispersão residual no período completo em relação a vazão observada no período de 2005-2010 na SBRD (Descoberto Chácara 89).</i>	<i>96</i>
<i>Figura 33 - Diagrama de dispersão residual no período de chuva (novembro a março) nos anos de 2005 a 2010 em relação à vazão observada na SBRD (Descoberto Chácara 89).</i>	<i>97</i>
<i>Figura 34 - Diagrama de dispersão residual no período de seca (junho a setembro) nos anos de 2005 a 2010 em relação à vazão observada.</i>	<i>98</i>
<i>Figura 35 - Diagrama de dispersão dos resíduos nos períodos de estiagem (junho à setembro) ao longo dos anos hidrológicos de 2005 a 2010.</i>	<i>100</i>
<i>Figura 36 - Box plot das vazões médias diárias observada e simulada durante o período de estiagem (junho a setembro) referentes aos anos hidrológicos de 2005 a 2010</i>	<i>101</i>
<i>Figura 37 – Hietograma e hidrogramas observado e simulado pelo modelo SWAT no córrego Capão da Onça (SBRD) no período de calibração.</i>	<i>102</i>
<i>Figura 38 – Diagrama de dispersão dos valores observado e simulado de vazão no córrego Capão da Onça (SBRD) durante o período de calibração.</i>	<i>102</i>
<i>Figura 39 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado da vazão mensal da SBRD no período de calibração (2005-2010).....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 40 - Diagrama de dispersão das vazões médias mensais observadas e simuladas na SBRD no período de calibração (2005-2010).</i>	<i>104</i>
<i>Figura 41 – Hietograma e hidrogramas observado e simulado da verificação diária na SBRD (2010-2013).</i>	<i>105</i>
<i>Figura 42 - Diagrama de dispersão dos valores observados de vazão (eixo x) versus valores simulados de vazão (eixo y) no período de verificação da SBRD.</i>	<i>106</i>
<i>Figura 43 - Diagrama de dispersão residual no período de verificação (2010/2013) em nível diário na SBRD.</i>	<i>107</i>
<i>Figura 44 - Hidrogramas observado e simulado da verificação mensal na SBRD (2010-2013).</i>	<i>107</i>
<i>Figura 45 - Diagrama de dispersão das vazões médias mensais observadas e simuladas na SBRD no período de verificação (2010-2013)</i>	<i>108</i>

<i>Figura 46 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado da verificação diária na SBCC (2005-2013) com o ajuste dos parâmetros calibrados na SBRD.</i>	<i>109</i>
<i>Figura 47 – Hietograma e hidrogramas observado e simulado da verificação mensal na SBCC (2005-2013) com o ajuste dos parâmetros calibrados na SBRD.</i>	<i>109</i>
<i>Figura 48 – Hietograma e hidrogramas observado e simulado da verificação diária na SBCCO (2005-2013) com o ajuste dos parâmetros calibrados na SBRD.</i>	<i>110</i>
<i>Figura 49 – Hietograma e hidrogramas observado e simulado da verificação mensal na SBCCO (2005-2013) com o ajuste dos parâmetros calibrados na SBRD.</i>	<i>111</i>
<i>Figura 50 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado da verificação diária na SBCCR (2005-2013) com o ajuste dos parâmetros calibrados na SBRD.</i>	<i>112</i>
<i>Figura 51 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado da verificação mensal na SBCCR (2005-2013) com o ajuste dos parâmetros calibrados na SBRD.</i>	<i>113</i>
<i>Figura 52 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado da verificação diária na SBCCC (2005-2013) com o ajuste dos parâmetros calibrados na SBRD.</i>	<i>115</i>
<i>Figura 53 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado da verificação mensal na SBCCC (2005-2013) com o ajuste dos parâmetros calibrados na SBRD.</i>	<i>115</i>
<i>Figura 54 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado da verificação diária na SBRP (2005-2013) com o ajuste dos parâmetros calibrados na SBRD.</i>	<i>116</i>
<i>Figura 55 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado da verificação mensal na SBRP (2005-2013) com o ajuste dos parâmetros calibrados na SBRD.</i>	<i>117</i>
<i>Figura 56 - Ciclo hidrológico simulado na sub-bacia do rio Descoberto (SBRD) no período de 2005 a 2013.</i>	<i>120</i>
<i>Figura 57 – Gráfico comparativo da relação Q/P_{cp} calculada por meio do balanço hídrico e simulada pelo modelo SWAT nas sub-bacias para os anos hidrológicos do período de 2005 a 2013.</i>	<i>122</i>
<i>Figura 58 - Gráfico comparativo da relação E_t/P_{cp} calculada por meio do balanço hídrico e simulada pelo modelo SWAT nas sub-bacias para os anos hidrológico do período de 2005 a 2013.</i>	<i>122</i>
<i>Figura 59 - Espacialização do escoamento superficial simulado no ano de 2012 nas sub-bacias estudadas.</i>	<i>124</i>
<i>Figura 60 - Espacialização da evapotranspiração real simulada no ano de 2012 nas sub-bacias estudadas.</i>	<i>124</i>
<i>Figura 61 - Espacialização da percolação simulada no ano de 2012 nas sub-bacias estudadas.</i>	<i>125</i>

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADASA	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal
AGNPS	Agricultural Non-Point Source Pollution Model
ALPHA_BF	Fator alfa do fluxo de base (dias)
ANA	Agência Nacional de Águas
ANION_EXCL	Fração de porosidade (espaços vazios) a partir da qual os ânions são excluídos.
AnnAGNPS	Annualized Agricultural NonPoint Source Pollution Model
ANSWERS	Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation
ANSWERS- Continuos	Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation Continuous
APA	Área de Proteção Ambiental
ARNO	Arno River Model
ARS	Agricultural Research Service
BASINS	Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources
BHLD	Bacia Hidrográfica do Lago Descoberto
C	Cambissolo
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CASC2D	Cascade of planes in 2-Dimensions
CN	Curva Número
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CREAMS	Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management System
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DEEPST	Altura inicial da água no aquífero profundo
DEM	Modelo Digital de Elevação
DF	Distrito Federal
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DWSM	Dynamic Watershed Simulation Model
EMATER	Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA	Agência de Proteção Ambiental
EPCO	Fator de compensação da retirada das plantas
EPIC	Erosion-Productivity Impact Calculator
ESCO	Fator de compensação da evaporação do solo
ESRI	Environmental Systems Research Institute
ET	Evapotranspiração
EUA	Estados Unidos da América
FLONA	Floresta Nacional
FX	Plintossolo
GLEAMS	Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems
GLUE	Generalised Likelihood Uncertainty Estimation
GO	Goiás
GW_DELAY	Retardo do escoamento subterrâneo
GW_REVAP	Coefficiente de re-evaporação da água subterrânea

GWHT	Altura inicial da água subterrânea
GWQMN	Concentração de nitrato na água subterrânea contribuinte (mgN/L)
GX	Gleissolo Aplico
ha	Hectares
HBV	Hydrological Simulation model
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center's - Hydrologic Modeling System
HRU	Unidade de Resposta Hidrológica
HSPF	Hydrologic Simulation Program-Fortran)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
KINEROS	Kinematic Erosion Model
km	Kilometros
km ²	Kilometros quadrados
LV	Latossolo Vermelho
LVA	Latossolo Vermelho Amarelo
m	Metros
m ³ /s	Metros cúbicos por segundo
MCMC	Markov chain Monte Carlo
mm	Milímetros
MMS	Modular Modeling System
MUSLE	Equação Universal de Perda de Solos Modificada
N	Nitrogênio
NSE	Coefficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe
NWS	National Weather Service
P	Fósforo
PARASOL	Parameter Solutions
PICAG	Projeto Integrado de Colonização Alexandre de Gusmão
PRMS	Precipitation-Runoff Modeling System
PSO	Particle Swarm Optimization
PTARH	Programa de Pós Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos
R ²	Coefficiente de determinação
REVAPMN	Profundidade de água limite no aquífero raso (mm)
RORB	Runoff Routing Model
SBCC	Sub-bacia do Córrego Chapadinha
SBCCC	Sub-bacia do Córrego Capão Comprido
SBCO	Sub-bacia do Córrego Olaria
SBCR	Sub-bacia do Córrego Rodeador
SBRD	Sub-bacia do Rio Descoberto
SBRP	Sub-bacia do Ribeirão das Pedras
SCS	Soil Conservation Service
SED	Produção de sedimentos (ton.dia ⁻¹)
SHALLST	Altura inicial da água no aquífero raso

SHE	Systeme Hydrologique Europeen
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SOL_AWC	Capacidade de água disponível (mm H ₂ O / mm solo)
SOL_BD	Densidade aparente do solo
Sol_K	Condutividade hidráulica saturada (mm/h)
Sol_Z	Profundidade do solo (mm)
SUFI-2	Sequential Uncertainty Fitting
SURLAG	Tempo de retardo do escoamento superficial
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SWMM	Storm Water Management Model
SWRRB	Simulator for Water Resources in Rural Basins
TMDL	Total Daily Maximum Loads
TOPIKAPI	Topographic Kinematic Approximation and Integration
TOPMODEL	Physically Based Runoff Production Model
UBC	University of British Columbia
USDA	United States Department of Agriculture
USLE	Equação universal de Perdas do Solo
USLE	Universal Soil Loss Equation
VSA	Variable Source Areas
WATFLOOD	Waterloo Flood System
WBN	Watershed Bounded Network
WEPP	Water Erosion Prediction Project
WESP	Watershed Erosion Simulation Program

1 - INTRODUÇÃO

A humanidade sempre exerceu fortes pressões sobre o ambiente em prol do desenvolvimento econômico e social e em respostas às demandas por produtos agrícolas e florestais. Porém, parte das transformações advindas do crescimento urbano e do desenvolvimento rural, pode estar associada a impactos negativos nos recursos naturais e no meio ambiente.

Os impactos ambientais associados às atividades agrícolas ou à expansão urbana raramente ocorrem de maneira isolada. Em geral são cíclicos, espacialmente distribuídos, e sistêmicos. De modo a equilibrar o desenvolvimento social e econômico com a preservação dos recursos naturais, faz-se necessário planejar e gerenciar integradamente o ambiente. No que se refere aos recursos hídricos, o enfoque adequado ao planejamento são as bacias hidrográficas.

O escoamento da água em bacias hidrográficas carrega para os corpos hídricos, nas formas dissolvidas, em suspensão, ou vinculadas aos sedimentos, diversas substâncias, além de resíduos industriais e agrícolas e microrganismos patogênicos. A intensificação do escoamento superficial e, conseqüentemente, dos processos erosivos ocasionam problemas na área agrícola advindos da remoção da camada superficial do solo e conseqüente redução de produtividade e da capacidade útil dos corpos hídricos.

Estudos hidrológicos e a compreensão da dinâmica dos fenômenos físicos decorrentes de situações adversas ao ambiente são etapas de fundamental importância para qualquer programa de planejamento e gerenciamentos de recursos hídricos em uma bacia hidrográfica. Contudo, analisar o comportamento hidrológico constitui-se em uma tarefa complexa.

A modelagem hidrológica pode permitir a compreensão dos processos físicos envolvidos nessa dinâmica auxiliando no planejamento e na otimização do gerenciamento. Diversos estudos têm sido realizados utilizando modelos hidrológicos computacionais como suporte para analisar e compreender a geração do escoamento superficial, a produção de sedimentos e a alteração da qualidade da água em bacias hidrográficas (Moriasi *et al.*, 2012; Jorgensen, 2010; Pechlivanidis *et al.*, 2011, entre outros).

Porém, verificam-se carências de dados e informações que caracterizem fisicamente as áreas de estudo, valendo ressaltar que existem alguns parâmetros físicos, tal como a condutividade hidráulica e a porosidade, que são mensuráveis em teoria, mas com valores representativos de difícil obtenção na prática e, por isso, são frequentemente calibrados

quando utilizados em modelos. Sendo assim, normalmente, o ajuste dos parâmetros durante o processo de calibração se torna uma tarefa indispensável para a modelagem hidrológica de bacias hidrográficas.

No entanto, a revisão na literatura científica indica que os modelos não são representações autênticas dos sistemas reais. Por esse motivo a confiabilidade nas previsões do modelo, é sem dúvida, o principal aspecto no que implica o seu uso como uma ferramenta de suporte a tomada de decisão. Um grau de confiabilidade da modelagem pode ser obtido a partir da definição de um intervalo possível de valores de parâmetros que caracterizam adequadamente o sistema real e físico durante o processo de análise de sensibilidade e calibração dos parâmetros ao modelo.

Para a avaliação da eficácia das simulações do modelo e para a realização de calibração, fazem-se necessários períodos históricos medidos/observados de variáveis (vazão, sedimentos e/ou nutrientes) para devidas comparações e análises. Entretanto, nesse caso, verifica-se também a baixa disponibilidade de dados observados ou a existência de séries muito pequenas, dificultando e muitas vezes impossibilitando executar os processos requeridos para a obtenção de um trabalho de qualidade.

Dentre os vários programas computacionais utilizados em modelagem de bacias hidrográficas de base física/conceitual, tem-se o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), desenvolvido pelo *Agricultural Research Service/United States Department of Agriculture* (ARS/USDA). O software é de domínio público e possibilita a análise dos efeitos nos recursos hídricos decorrentes de diferentes usos do solo, especialmente no que concerne a bacias hidrográficas rurais (Neitsch *et al.* 2005).

O modelo SWAT vem sendo amplamente utilizado em diversas regiões do mundo, incluindo principalmente análises relacionadas à compreensão dos fenômenos hidrológicos, previsão de vazão, sedimentos e qualidade da água, previsão de cenários de planejamento, efeitos resultantes da modificação do uso do solo, avaliação da eficácia de manejos agrícolas para a redução da perda de solo e poluição difusa, avaliação de impactos nos recursos hídricos pelas mudanças no clima entre muitas outras. As aplicações do SWAT são mostradas nas revisões apresentadas por Arnold e Fohrer (2005), Gassman *et al.* (2007), Krysanova e Arnold (2008), Douglas-Mankin *et al.* (2010), Tuppad *et al.* (2011) e Garbossa *et al.* (2011).

O Distrito Federal (DF) foi criado dentro do bioma cerrado, na região mais alta do Planalto Central, nas nascentes de cursos de água de três grandes regiões hidrográficas brasileiras: do Paraná, São Francisco e Araguaia/Tocantins. Porém o fato do Distrito

Federal ser uma área de nascentes cujos cursos de água apresentam-se pouco extensos e com vazões modestas quando comparadas às demandas regionais, leva a limitações nos aspectos quantitativos dos recursos hídricos superficiais (PGIRH - ADASA, 2005).

A bacia hidrográfica do lago Descoberto (BHL D) apresenta uma área de 452 km² e é responsável por 63% do abastecimento público de água do DF (CAESB, 2013). Localizada no Distrito Federal e no estado de Goiás a bacia é constituída por onze sub-bacias de drenagem em que seus sistemas hídricos contribuem para o lago do Descoberto.

A BHL D está incluída na Área de Proteção Ambiental da bacia do rio Descoberto (APA do Descoberto), que abrange 391 km² com a finalidade de assegurar condições ecológicas satisfatórias aos mananciais (Brasil, 1983) e no Projeto Integrado de Colonização Alexandre de Gusmão (PICAG) que foi implantado com o objetivo da fixação de agricultores (Brasil, 1962) e hoje é responsável pela produção de cerca de 40% dos produtos hortifrutigranjeiros consumidos no Distrito Federal. Além disso, três áreas da Floresta Nacional de Brasília (FLONA de Brasília), somando 83,5 km², e que foram criadas com o objetivo de constituir um cinturão verde que assegurasse a preservação dos mananciais (Brasil, 1999) estão incluídas na BHL D.

Por não apresentar atividade industrial ou lançamento significativo de efluentes domésticos, a principal preocupação relacionada ao gerenciamento dos recursos hídricos na bacia é a poluição difusa, onde a expansão urbana e o desenvolvimento agrícola podem estar causando a perda gradual do solo, a poluição dos recursos hídricos e eventual redução do deflúvio.

Em função de sua importância, grande parte das pesquisas realizadas pelo Programa de Pós Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH) da Universidade de Brasília, tem seu foco na BHL D, onde diversos estudos têm sido desenvolvidos para caracterização e monitoramento dos processos hidrológicos, entre eles: Barnez (2004), Avila (2005), Bicalho (2006), De Vito (2007), Fragoso (2008), Silva (2009), Lopes (2010), Sarmiento (2010), Santos (2012), e Ferrigo *et al.* (2012). A BHL D tem sido utilizada para a instalação de bacias experimentais de pesquisa e monitoramento do PTARH e apresenta consideráveis anos de monitoramento quanti-qualitativo realizado pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB).

Tendo em vista, de um lado, a importância do lago Descoberto como manancial para o abastecimento público no DF e, de outro, a constituição da bacia hidrográfica do lago Descoberto como uma bacia experimental para pesquisas do PTARH e a disponibilidade de dados observados julga-se extremamente pertinente o aprofundamento

dos estudos com base na calibração, modelagem hidrológica e na geração de novas informações, contribuições e conhecimentos sobre a área de estudo.

Para tanto, o presente trabalho teve como metas a avaliação da representatividade dos parâmetros do modelo SWAT obtidos na calibração de uma única sub-bacia e sua aplicação para a análise da dinâmica hídrica das principais sub-bacias afluentes ao lago Descoberto.

A organização do texto foi feita por capítulos, em que se apresentam: (2) os objetivos geral e específico do trabalho; (3) a fundamentação teórica acerca da modelagem hidrológica e com ênfase no modelo SWAT e os desenvolvimentos no âmbito desse tema; (4) a metodologia e as ferramentas utilizadas na pesquisa; (5) os resultados obtidos em relação à modelagem inicial com o SWAT, a análise de sensibilidade, calibração e verificação, incluindo também a dinâmica do ciclo hidrológico e a espacialização dos resultados nas sub-bacias; (6) as conclusões do trabalho e algumas recomendações para o aprimoramento e continuação do estudo; e, por fim, (7) as referências bibliográficas utilizadas na pesquisa.

2 - OBJETIVOS

2.1 - OBJETIVO GERAL

Analisar a consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática de uma sub-bacia hidrográfica para outras sub-bacias similares que contribuem para o lago Descoberto, avaliando conjuntamente a dinâmica hidrológica simulada pelo modelo.

2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar o modelo SWAT às principais sub-bacias de contribuição do Lago Descoberto, com vistas ao balanço hídrico do reservatório.
- Analisar a sensibilidade dos parâmetros, calibrar e verificar o modelo em nível diário para a sub-bacia do Rio Descoberto e avaliar as dificuldades, limitações e erros relativos da simulação da vazão pelo modelo;
- Verificar as alterações feitas nos parâmetros no processo de calibração da sub-bacia do Rio Descoberto para as demais sub-bacias estudadas em nível diário e mensal, analisando a possibilidade de reprodução da calibração feita em uma sub-bacia para outras sub-bacias similares.
- Analisar o balanço hídrico simulado pelo SWAT e espacializar os resultados nas sub-bacias estudadas.

3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica foi desenvolvida de forma a apresentar os conceitos principais inseridos num programa de modelagem assegurando a caracterização dos conhecimentos necessários para maior qualidade da pesquisa.

A primeira parte consiste de uma introdução aos modelos hidrológicos, da conceituação, classificação, evolução, descrição de diversos modelos amplamente utilizados e aplicações.

A segunda parte se fez referente às especificações do modelo SWAT, incluindo a estrutura e aprimoramentos desenvolvidos no modelo, a caracterização e equacionamento relevantes, os inputs necessários e exemplos das variadas aplicações.

3.1 - MODELOS HIDROLÓGICOS

A complexidade do sistema hídrico dificulta as análises quantitativa e qualitativa do mesmo, porém modelos hidrológicos, uma das ferramentas que integram as relações entre os fenômenos que caracterizam um sistema e que, assim, buscam auxiliar a representação do seu comportamento, contribuem para o entendimento dos sistemas e para a previsão de condições diferentes das observadas, podendo facilitar os estudos através de uma linguagem ou de uma forma de mais fácil acesso, uso e aplicação.

A simulação hidrológica é influenciada pela heterogeneidade física da bacia hidrográfica e pelos processos envolvidos, o que se tem propiciado o desenvolvimento de um grande número de modelos que se diferenciam em função dos dados utilizados, da discretização, das prioridades da representação dos processos, da escala espacial e temporal e dos objetivos a serem alcançados (Tucci, 1998).

Pela natureza variada dos modelos de simulação hidrológica, desenvolvidos e aplicados com diferentes objetivos, há diversas tentativas de categorização.

Viessman Jr. e Lewis (2002) apresentam uma classificação descritiva dos modelos, em seis categorias:

- (a) Modelos físicos vs. matemáticos: Os modelos físicos incluem tecnologias análogas e princípios de similaridade aplicados aos modelos em pequenas escalas. Por exemplo, o escoamento simulado em laboratório pode ser realizado com uma escala de 1:10 em relação ao da natureza. Modelos matemáticos

baseiam-se em enunciados matemáticos para representar o sistema. A teoria do hidrograma unitário é um modelo matemático da resposta de uma bacia hidrográfica aos vários eventos de chuva.

- (b) Modelos empíricos vs. conceituais: Os modelos empíricos representam o sistema real pela descrição matemática com base em dados experimentais, em vez de leis físicas gerais. Os modelos conceituais baseiam-se nas concepções teóricas para caracterizar e interpretar os fenômenos, em vez de descrever a ocorrência empírica do processo físico;
- (c) Modelos concentrados vs. distribuídos: Os modelos que ignoram as variações espaciais dos parâmetros no interior do sistema são designados como genéricos globais ou concentrados. Um exemplo é o uso do hidrograma unitário para prever a distribuição temporal do escoamento superficial para diferentes chuvas sobre áreas de drenagem homogêneas. Os modelos de parâmetros distribuídos levam em consideração as variações espaciais do comportamento do processo no interior do sistema. Por exemplo, alguns modelos de simulação de águas subterrâneas levam em conta as variações no armazenamento e transmissividade, com informações para cada unidade de uma rede de células à área espacial do aquífero. Mais recentemente, sistemas de água superficial estão sendo analisados através da tecnologia de sistema de informação geográfica com o uso de parâmetros distribuídos (Engel *et al.*, 2007).
- (d) Modelos estocásticos vs. determinísticos: Modelos estocásticos ou probabilísticos são modelos matemáticos em que o comportamento de uma ou mais variáveis é totalmente ou parcialmente descrito por funções de probabilidade. Modelos determinísticos são modelos matemáticos em que o comportamento de toda variável é completamente determinado pelas equações que governam o modelo. Muitos processos estocásticos são aproximados por métodos determinísticos se excluírem toda a consideração de parâmetros aleatórios. A simulação determinística descreve o comportamento do ciclo hidrológico em termos de relações matemáticas que descrevem as interações das várias fases do ciclo hidrológico.
- (e) Modelos de eventos vs. contínuos: Os modelos hidrológicos podem ser investigados em maior detalhe se o intervalo de tempo da simulação for reduzido. Muitos modelos hidrológicos de curta duração podem ser classificados como modelos de simulação de um único evento, em contraste

com os modelos sequenciais ou contínuos. Um modelo contínuo é normalmente utilizado para simular 3, 4, 5, ou mais anos de vazões. Já um modelo típico de simulação de eventos pode utilizar um intervalo de tempo de 1 hora ou até mesmo de 1 minuto.

- (f) Modelos de *water budget* vs. preditivos: Muitos modelos podem ser classificados conforme a sua finalidade. Uma comparação importante é verificar se o modelo se propõe a prever as condições futuras utilizando informações sintéticas sobre as precipitações e condições da bacia de drenagem (modelos preditivos) ou pela verificação dos eventos históricos (modelos *water budget*). Um modelo *water budget* é definido como um modelo ou um conjunto de relações que admitem o equilíbrio histórico de entradas, saídas e mudanças no armazenamento de um sistema em estudo.

3.1.1 - Evolução dos Modelos

O início da modelagem hidrológica pode ser atribuído ao desenvolvimento da engenharia civil na segunda metade do século XIX (Todini, 1988) surgindo em resposta a problemas de engenharia, como para projetos de estradas, canais, esgotos urbanos, sistemas de drenagem, barragens, bueiros, pontes e sistemas de abastecimento de água (Singh e Woolhiser, 2002).

Até meados da década de 1960, a modelagem hidrológica envolveu principalmente o desenvolvimento de conceitos, teorias e modelos de componentes individuais do ciclo hidrológico.

Segundo uma revisão realizada por Singh e Woolhiser (2002) sobre a evolução dos componentes individuais do ciclo hidrológico: os estudos da relação chuva-vazão foram iniciados com o desenvolvimento do método racional (Mulvany, 1850); utilizando princípios simplificados da física, uma das primeiras tentativas de desenvolver uma teoria de infiltração foi por Green e Ampt (1911); Horton (1919) derivou uma série de fórmulas empíricas para estimar a interceptação de tempestades por vários tipos de cobertura vegetal; o escoamento em reservatórios foi estudado por Puls (1928); os primeiros trabalhos descrevendo a evaporação de lagos foram feitos por Richardson (1931) e Cummings (1935); Sherman (1932) introduziu o conceito do hidrograma unitário para relacionar a resposta do escoamento direto com o excesso da chuva; um ano após, Horton

(1933) desenvolveu a teoria da infiltração para estimar o excesso da chuva e aprimorou as técnicas de separação do hidrograma; Fair e Hatch (1933) derivaram uma fórmula para calcular a permeabilidade do solo; para o escoamento em rios foi desenvolvido o método de Muskingum (McCarthy, 1938); o trabalho que estabeleceu as bases da hidrologia subterrânea foi realizado por Theis (1935), em que combinou a lei de Darcy com a equação de continuidade para obter a relação entre a redução da superfície piezométrica e a taxa e duração da descarga de um poço; Barnez (1940) estudou a infiltração das águas subterrâneas e levou ao desenvolvimento de técnicas para a separação do escoamento de base e interfluxo de um hidrograma; Jacob (1943, 1944) correlacionou os níveis de água subterrânea com a precipitação; Thornthwaite (1948) e Penman (1948) fizeram importantes contribuições para modelos de evapotranspiração; e o *Soil Conservation Service* (SCS) (1972) desenvolveu o método do SCS *Curve Number* para calcular o escoamento.

A integração de diferentes componentes do ciclo hidrológico e a simulação de praticamente toda a bacia hidrográfica foram possíveis somente com o início da revolução digital na década de 1960. O modelo SWM (*Stanford Watershed Model*), hoje HSPF, desenvolvido por Crawford e Linsley (1966) foi, provavelmente, a primeira tentativa de modelar praticamente todo o ciclo hidrológico, o qual introduziu a avaliação da distribuição espacial da infiltração. Além disso, foi desenvolvido uma série de modelos semidistribuídos capazes de explicar a variabilidade espacial dos processos hidrológicos na bacia hidrográfica, incluindo modelos capazes de simular fontes difusas e/ou pontuais de poluição.

De fato, tem aumentado gradualmente o desenvolvimento de modelos hidrológicos e a complexidade dos sistemas modelados, paralelamente ao desenvolvimento dos sistemas computacionais desde a década de 1970. Descrevem-se na sequência as principais ferramentas disponíveis na atualidade.

3.1.2 - Principais Modelos Hidrológicos Disponíveis

Modelos hidrológicos vêm sendo constantemente aprimorados para representar, principalmente, os processos naturais e antrópicos. Mais recentemente, esse desenvolvimento vem sendo acoplado a sistemas de informações geográficas (SIGs) como forma de unir as distintas séries de dados e informações disponíveis em multiescalas, além de possibilitar a distribuição espacial dessas informações através da subdivisão da área de

estudo em unidades menores e hidrológicamente mais homogêneas, podendo minimizar uma das maiores limitações encontrada na aplicação de modelos complexos, que é trabalhar com a grande quantidade e heterogeneidade dos dados que descrevem os sistemas naturais.

Atualmente, existem diversos modelos de bacias hidrográficas, em geral bem conhecidos e em uso constante em diferentes países. Esses modelos variam significativamente na sua construção referente ao processamento de cada componente individual do ciclo hidrológico, e em parte, por apresentarem finalidades diferentes.

Nos Estados Unidos o modelo HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center's - Hydrologic Modeling System*) é um modelo muito utilizado pelo setor privado para a concepção de sistemas de drenagem, quantificando o efeito da mudança do uso solo em cheias. Já o modelo NWS (*National Weather Service*) é o modelo mais utilizado para a previsão de cheias. O HSPF (*Hydrologic Simulation Program-Fortran*) é um modelo de qualidade da água adotado pela Agência de Proteção Ambiental (EPA). O modelo MMS (*Modular Modeling System*) do USGS é um dos modelos mais utilizados para o planejamento de recursos hídricos e gestão de obras.

Os modelos UBC (*University of British Columbia*) e WATFLOOD (*Waterloo Flood System*) são populares no Canadá para simulação hidrológica. Os modelos WBN (*Watershed Bounded Network*) e RORB (*Runoff Routing Model*) são comumente utilizados na Austrália para a previsão de cheias, projeto de drenagem, e avaliação do efeito da mudança no uso do solo. O TOPMODEL (*Physically Based Runoff Production Model*) e o SHE (*Système Hydrologique Europeen*) são os modelos mais utilizados para a análise hidrológica em muitos países europeus. O modelo HBV (*Hydrological Simulation model*) amplamente utilizado para a previsão de fluxo em países escandinavos. Os modelos ARNO (*Arno River Model*) e TOPIKAPI (*Topographic Kinematic Approximation and Integration*) são populares na Itália. O *Tank model* é bem aceito no Japão. E o modelo *Xinanjiang* é comumente utilizado na China (Singh e Woolhiser, 2002).

Entre os diversos modelos hidrológicos comumente utilizados, com base em Maidment (1992), Singh e Frevert (2002); Tucci (2005); Viessman e Lewis (2002); Todini (2007); Borah e Bera (2004); Singh e Woolhiser (2002); e Santos (2009), fez-se uma descrição simplificada:

- **HSPF** (*Hydrologic Simulation Program-Fortran*) (Bicknell *et al.*, 1996) é um modelo de bacia hidrográfica que simula o escoamento superficial e cargas não pontuais de poluentes. O HSPF é composto por três módulos principais (PERLND, IMPLND e

RCHRES) e cinco módulos de utilidades. Para a simulação com HSPF, a bacia hidrográfica deve ser representada em termos de segmentos de solos (permeáveis e impermeáveis) e trechos de rios. O módulo PERLND representa os processos de hidrologia e de qualidade da água que ocorrem no segmento de solo permeável, enquanto o IMPLND pode ser utilizado para a área de superfície impermeável onde ocorre pouca ou nenhuma infiltração. O módulo RCHRES simula os processos que ocorrem num trecho de um canal aberto ou de represamento de mistura completa. O HSPF é um modelo extremamente intensivo e superparametrizado, requer uma grande quantidade de dados e informações do local para representar com precisão os processos de hidrologia e de qualidade da água em uma bacia hidrográfica. O HSPF está incluído ao BASINS (*Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources*) da EPA (*Environmental Protection Agency*) para o estabelecimento do total de cargas máximas diárias (*Total Maximum Daily Loads - TMDLs*) (EPA, 2001).

- **PRMS** (*Precipitation-Runoff Modeling System*), desenvolvido no Serviço Geológico dos EUA (USGS) (Leavesley *et al.*, 1983), é um modelo físico, de parâmetros distribuídos e que foi desenvolvido para avaliar os efeitos de diferentes combinações de precipitação, clima e uso solo nas respostas da bacia hidrográfica. O modelo simula as respostas nas relações do balanço hídrico, no regime de vazões, picos e volumes de cheias, nas relações da água no solo, cargas de sedimentos e recarga de águas subterrâneas, de maneira contínua ou de eventos.
- **WEPP** (*Water Erosion Prediction Project*) (Flanagan e Nearing, 1995) é um modelo desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) para ser aplicado a grandes bacias. Esse modelo é conceitual de base física e simula a erosão com base na geração estocástica do clima, na teoria de infiltração, na física do solo, na ciência das plantas e na hidráulica e mecânica da erosão. O WEPP é um modelo semidistribuído e opera em passo de tempo diário para a previsão de evapotranspiração e percolação.
- **TOPMODEL** (Beven e Kirkby, 1979) é um modelo semidistribuído e os processos hidrológicos são representados utilizando relações físicas. A discretização da bacia é em sub-bacias, mas a distribuição é em função de fator topográfico (*topographic index*) obtido em mapas detalhados.
- **WESP** (*Watershed Erosion Simulation Program*) (Lopes, 1987) utiliza a componente hidráulica do modelo KINEROS e as técnicas de modelagem desenvolvidas no âmbito

do projeto WEPP. Neste modelo, a bacia também é discretizada por um sistema de planos de escoamento que descarregam em canais de drenagem, sub-bacias. É um modelo distribuído, que simula eventos, e foi elaborado para ser aplicado a pequenas bacias nas regiões semiáridas.

- **SHE** (*System Hydrologic Europe*) foi desenvolvido por um consórcio europeu de três organizações, o Instituto de Hidrologia (Inglaterra), a empresa de consultoria francesa (SOGREAH) e o Instituto Hidráulico Dinamarquês. Consiste num modelo de base física e parâmetros distribuídos, em que a bacia é discretizada por uma grade horizontal e vertical. O SHE pode ser aplicado para diversos problemas hidrológicos, incluindo esquemas de irrigação, determinação de mudanças de uso do solo, desenvolvimento de estudos da água, contaminação de águas subterrâneas, erosão e transporte de sedimentos, e previsão de cheias. Porém, o modelo requer grande número de informações e uma dispendiosa estrutura computacional, o que pode inviabilizar a sua utilização em nível pessoal. O equacionamento e a descrição da estrutura do modelo podem ser encontrados em Abbott et al (1986) e Bathurst (1986).
- **AGNPS** (*Agricultural NonPoint Source Pollution Model*) (Young et al., 1989) simula o escoamento, sedimentos e transporte de nitrogênio (N), fósforo (P) e demanda química de oxigênio (DQO), resultante de eventos de chuvas.
- **AnnAGNPS** (*Annualized Agricultural NonPoint Source Pollution Model*) (Bingner e Theurer, 2001) uma das atualizações do AGNPS para simulações contínuas de hidrologia, erosão do solo e transporte de sedimentos, nutrientes e pesticidas. O modelo foi projetado para analisar o impacto de poluentes de fontes difusas sobre o ambiente em bacias hidrográficas predominantemente agrícolas.
- **ANSWERS** (*Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation*) (Beasley et al., 1977) utiliza um conceito de parâmetros distribuídos para modelar os processos espacialmente variáveis de escoamento, infiltração, drenagem subterrânea, e erosão resultantes de um único evento. O modelo tem dois componentes principais - hidrologia e respostas de erosão.
- **ANSWERS-Continuous** (*Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation Continuous*), (Bouraoui et al., 2002) emergiu para a obtenção de respostas contínuas de escoamento e sedimentos do modelo ANSWERS.
- **CASC2D** (*Cascade of planes in 2-Dimensions*) (Ogden, 1998) é um modelo de base física e simula o escoamento superficial e os sedimentos em células (grids)

bidimensionais e canais unidimensionais e contém, simultaneamente, a simulação de um único evento e contínua em longo prazo.

- **MIKE SHE** (*European Hydrological System Model*) (Refsgaard e Storm, 1995), com base no SHE, o Sistema Hidrológico Europeu, é um modelo abrangente, distribuído e de base física. Simulando o escoamento, sedimentos e parâmetros da qualidade da água em células bidimensionais, unidimensionais em canais, unidimensional em camadas de fluxo insaturadas e tridimensional em camadas de fluxo saturado. Também tem a capacidades de simulação de eventos e contínua em longo prazo. O modelo foi desenvolvido por um consórcio europeu de três organizações, o Instituto de Hidrologia (Inglaterra), a empresa de consultoria francesa (SOGREAH) e o Instituto Hidráulico Dinamarquês.
- **DWSM** (*Dynamic Watershed Simulation Model*), (Borah *et al.*, 1999) simula o escoamento superficial e subsuperficial, a propagação de ondas de cheias, a erosão do solo, transporte de sedimentos e transporte de agrotóxicos em bacias hidrográficas rurais durante eventos de chuvas.
- **KINEROS** (*Kinematic Erosion Model*) (Woolhiser *et al.*, 1990) simula a erosão, transporte e deposição de sedimentos, escoamento superficial e a qualidade da água para eventos individuais de precipitação. É um modelo semidistribuído, e a bacia é representada por planos retangulares, canais e elementos de armazenamento. O modelo utiliza a equação de continuidade dos sedimentos (Bennett, 1974 *apud* Woolhiser *et al.*, 1990) e calcula o desprendimento das partículas pelo impacto das gotas de chuva pela equação de Meyer e Wischmeier (1969 *apud* Woolhiser *et al.*, 1990).
- **HEC-HMS** (*Hydrologic Engineering Center's - Hydrologic Modeling System*) desenvolvido pelo US Army Corps of Engineers (US-Army Corps of Engineers, 2000) é um modelo de base física, semidistribuídos, simula processos de chuva-vazão e tem capacidades para operação de reservatórios. O modelo pode operar em um passo de tempo sub-diário. O escoamento do evento é modelado usando o método SCS *Curve Number* e o método de infiltração de Green-Ampt.
- **SWMM** (*Storm Water Management Model*) foi desenvolvido inicialmente pela EPA por Metcalf e Eddy (1971) e vem sendo submetido a diversas melhorias e ampliações. Atualmente simula vazões de eventos ou contínua em longo do tempo, semidistribuído em múltiplas sub-bacias e permite a incorporação de micro ou macrodrenagem de águas pluviais.

- **GLEAMS** (*Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems*) (Leonard *et al.*, 1987) é um modelo matemático, concentrado que opera em passo diário e foi desenvolvido como uma extensão do CREAMS. Elaborado para avaliar os efeitos de sistemas de manejo sobre a circulação de produtos químicos agrícolas entre e através da zona radicular, simulando o transporte e a lixiviação desses pesticidas. Como vários outros é um modelo que vem sendo evoluído e aprimorado ao longo do tempo.
- **CREAMS** (*Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management System*) (Knisel, 1980) é um modelo de parâmetros concentrados e simula áreas de manejo agrícola permitindo estabelecer níveis de impacto sobre a qualidade de água e do solo. O componente de erosão mantém elementos da USLE (Equação Universal de Perda do Solo), mas inclui a capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento superficial. O componente de nitrogênio considera os processos de mineralização, nitrificação e desnitrificação, absorção pelas plantas e o nitrato lixiviado por percolação para fora da zona de raiz. O componente pesticida considera a interceptação foliar, a degradação, bem como a adsorção e degradação no solo.
- **EPIC** (*Erosion-Productivity Impact Calculator*) é um modelo de domínio público, que tem sido utilizado para analisar os efeitos da erosão do solo na produção agrícola em mais de 60 países na Ásia, América do Sul e Europa (Williams *et al.*, 1984).
- **SWRRB** (*Simulator for Water Resources in Rural Basins*) (Arnold e Williams, 1987) é um modelo de base física e foi desenvolvido pelo *U.S. Department of Agriculture* para simular o escoamento superficial, evapotranspiração, sedimentação e o transporte de nutrientes e pesticidas em grandes bacias hidrográficas rurais, não monitoradas. O modelo opera em uma escala de tempo contínuo e é distribuído, permitindo a subdivisão das bacias para considerar as diferenças no solo, uso do solo, precipitações, etc. O modelo pode prever o efeito das mudanças de manejo sobre a água, a produção de sedimentos, e pesticidas com razoável precisão para bacias rurais não monitoradas em todos os Estados Unidos.
- **QUAL2E** é um modelo de simulação da qualidade da água desenvolvido pela EPA (Brown e Barnwell, 1987). O QUAL2E é um modelo unidimensional, de estado permanente e não uniforme baseado na solução de equações diferenciais de advecção e dispersão, em todos os seus termos, por um esquema implícito de diferenças finitas, aplicável a rios dendríticos e de boa mistura. Simula a concentração de oxigênio

dissolvido associado a outras variáveis de qualidade de água (DBO, temperatura, clorofila-a, nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato, fósforo orgânico, fósforo dissolvido, coliformes, um constituinte não conservativo e três constituintes conservativos).

- **SWAT** foi elaborado no USDA (Arnold *et al.*, 1998) e foi desenvolvido para auxiliar os gestores de recursos hídricos a prever e avaliar o impacto das alterações do uso e manejo do solo, em grandes bacias hidrográficas não monitoradas. O modelo é destinado para as previsões de cargas em longo prazo e não é capaz de simular um único evento. É um modelo conceitual que opera em um intervalo de tempo diário. É semidistribuído por sub-bacias, unidades de resposta hidrológica (HRUs – *Hydrologic Responses Units*), pequenos lagos, área alagáveis e canal principal. O modelo tem oito componentes principais - hidrologia, meteorologia, sedimentação, temperatura do solo, crescimento de cultura, nutrientes, pesticidas e gestão agrícola. Juntamente ao HSPF, o SWAT também está incorporado ao BASINS, para simulações de fontes de poluição não pontuais.

3.1.3 - Etapas da Modelagem

Durante a revisão na literatura, foi possível observar que não há publicações de normas exatas nem nível de detalhamento adequado para garantir a qualidade de estudos feitos com o uso de modelos hidrológicos. Porém, diversos autores e organizações listam diretrizes importantes para tais estudos.

Viessman Jr. e Lewis (2002) resumem, a partir de uma revisão, que os estudos devem conter basicamente:

- (a) Revisão do problema: A revisão do problema deve identificar todos os elementos significativos na área de estudo de modo que o modelo selecionado inclua todos os processos relevantes.
- (b) Objetivos: Os objetivos do estudo devem ser quantificados de modo que alguma solução possa ser mostrada.
- (c) Disponibilidade e precisão dos dados: As medições de campo a serem utilizadas para a calibração, verificação e previsão devem ser revisadas para garantir que os dados sejam aceitáveis. Possíveis fontes de erros, tanto sistemáticas quanto aleatórias, devem ser identificadas.

- (d) Recursos de estudo: Calendário, disponibilidade de recursos humanos, orçamento, disponibilidade de dados e outros recursos de estudo devem ser avaliados para orientar a seleção do modelo.
- (e) Opções de modelos: Vários modelos devem ser revisados.
- (f) Seleção do modelo: A seleção do modelo deve ser baseada em critérios de desempenho e recursos disponíveis para a aplicação.
- (g) Discretização: O menor número de subáreas necessárias para discretização deve ser definido, de modo que o sistema modelado seja compatível com os objetivos e recursos (tempo, dinheiro e dados) disponíveis.
- (h) Os critérios de desempenho: Os critérios de desempenho do modelo precisam ser predefinidos e devidamente identificados para que modelos alternativos possam ser comparados e a modelagem mais simples e que fornece os resultados desejados possa ser selecionada.
- (i) Verificação do funcionamento: A maioria dos modelos contém tutorial ou exemplos de problemas, que deverão ser revistos e replicados para garantir que o modelo está funcionando conforme o esperado.
- (j) Análise de sensibilidade: O teste de sensibilidade deve ser realizado em parâmetros fundamentais para identificar quais são de maior importância, e o esforço em sua estimativa deve ser proporcional à sua importância
- (k) Preparação de dados: Todas as entradas e saídas para a concepção devem ser interpretadas para demonstrar que o modelo está simulando coerentemente.
- (l) Calibração e verificação: os conjuntos de dados devem ser divididos aproximadamente pela metade, com uma parte a ser utilizada para a calibração e a outra parte para a verificação do modelo.
- (m) Documentação: O estudo deve ser bem documentado, incluindo a versão do modelo utilizado, as suposições feitas, e os parâmetros selecionados e por que, e as entradas e as saídas do modelo devem ser arquivadas para uso futuro.

Os estudos e projetos que seguem essas diretrizes podem melhorar a qualidade de seus resultados. Entre outras vantagens, reduz a possibilidade de utilização de modelos impróprios e de uso inadequado de modelos adequados.

3.1.4 - Aplicação dos Modelos

Nas últimas décadas, a ciência da modelagem de simulação computacional de sistemas hídricos superficiais e subterrâneos passou de difundidos interesses acadêmicos a um procedimento de engenharia prática.

Tucci (1998) categoriza em três grandes grupos os modelos empregados no gerenciamento de recursos hídricos, considerando principalmente os objetivos e aplicações:

- (a) Modelos de comportamento: Alguns modelos, podendo ser chamados de modelos de comportamento, são utilizados para descrever o comportamento de um sistema, prognosticando as respostas destes quando sujeitos a diferentes entradas ou devido a modificações nas suas características. Um modelo de comportamento, que represente um trecho de um rio, por exemplo, busca reproduzir o hidrograma de jusante, sujeito a diferentes hidrograma de entrada a montante ou a modificações no seu leito ou mesmo a construção de uma barragem no trecho. Os modelos, neste caso, são utilizados para avaliar alternativas possíveis de ocorrerem no sistema, prognosticando a resposta do mesmo a estas ações.
- (b) Modelos de otimização: Os modelos de otimização estão preocupados com as melhores soluções em nível de projeto de engenharia, de um sistema específico. Por exemplo, a rede de abastecimento de água de uma parte de uma cidade pode ser representada por um modelo hidráulico, o modelo de otimização é aquele que pesquisa o menor diâmetro comercial dos diferentes trechos da malha.
- (c) Modelos de planejamento: Esses tipos de modelos simulam as condições globais de um sistema. Normalmente, o modelo de planejamento envolve além de uma solução hidrológica, hidráulica e econômica, uma quantificação socioeconômica e ambiental.

As principais aplicações da modelagem hidrológica estão basicamente ligadas à: compreensão do comportamento dos fenômenos hidrológicos; análise de consistência e preenchimento de falhas; previsão de vazão (Adamowski e Sun, 2010; Hosseini *et al.*, 2011; Franchini *et al.*, 2011; Pontes e Collischonn, 2012; Maheswaran e Khosa, 2012); dimensionamento e previsão de cenários de planejamento; efeitos resultantes da modificação do uso do solo (Giri *et al.*, 2011; Machado *et al.*, 2003); gestão integrada de bacias hidrográficas (Glavan *et al.*, 2012; Hu *et al.*, 2010; Shi *et al.*, 2012); avaliação da

eficácia de manejos agrícolas para a redução da perda de solo e poluição difusa (Güemann *et al.*, 2005); previsão e identificação de processos erosivos e sedimentação (Panagopoulos *et al.*, 2011; Minoti, 2006; Ferrigo *et al.*, 2012); avaliação de impactos nos recursos hídricos pelas mudanças no clima (Booji, 2005; Faramarzi *et al.*, 2012; Ryu *et al.*, 2011; Escarião *et al.*, 2012); avaliação da disponibilidade e qualidade da água (Perrim *et al.*, 2012, Pisinaras *et al.*, 2010, Lam *et al.*, 2012, Lins *et al.*, 2012) entre muitas outras.

Esses estudos vêm do importante papel que hidrólogos têm em desempenhar para garantir que futuras atribuições da água sejam cientificamente baseadas e feitas de forma eficiente, de modo a satisfazer as necessidades de ambos os sistemas humanos e naturais.

3.2 - MODELO SWAT

O modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é um modelo de bacia hidrográfica, semidistribuído com base em tempo contínuo e opera em passo diário. O objetivo no desenvolvimento do modelo foi para prever e avaliar os efeitos do manejo e de mudanças no uso do solo sobre os recursos hídricos, principalmente em bacias hidrográficas rurais não monitoradas (Arnold *et al.*, 1998).

O desenvolvimento do SWAT é uma continuação da experiência da modelagem da USDA-ARS que se estendeu por um período de mais de 30 anos (Gassman *et al.*, 2007). A primeira versão do SWAT foi lançada no início de 1990 e o primeiro relato de aplicação na literatura científica foi de Engel *et al.* (1993 *apud* Arnold *et al.*, 2012a).

Srinivasan e Arnold (1994) publicaram a primeira interface do SWAT com um sistema de informações geográfica (SIG) e Arnold *et al.* (1998) descreveram uma visão geral e os principais componentes do modelo. Até o ano de 2000 foram desenvolvidas mais quatro versões do modelo. Gassman *et al.* (2007) incluindo uma descrição mais detalhada da versão 2005, apresentou um espectro de mais de 250 aplicações do SWAT realizadas em todo o mundo. Em 2009, foi lançada mais uma versão do modelo e até 2010 só o Brasil já registrava mais de 70 trabalhos relacionados à aplicação do modelo nas mais diferentes regiões brasileiras (Garbossa *et al.* 2011). Em 15 de abril de 2013 foi lançada a última atualização do modelo SWAT versão 2012, até o momento, disponível para download no site oficial do modelo: <http://swat.tamu.edu/>.

O modelo SWAT apresenta uma interface amigável em ambiente SIG, o ArcSWAT, que permite maior agilidade e facilidade na organização e no seu uso.

É um modelo de domínio público e apresenta quatro grupos em nível mundial de discussão via internet (SWAT, ArcSWAT, VizSWAT e SWAT-CUP) e cinco grupos específicos de alguns países e regiões (América Latina, Sudeste Asiático, Irã e Brasil) também de discussão por fórum, em que há trocas de informações e experiências entre usuários e inclusive uma atenção especial dos próprios desenvolvedores do modelo quando a questão se faz pertinente. Pelo extenso e crescente emprego do modelo ao redor do mundo essas trocas de informações e experiências têm dado aos usuários apoio e credibilidade. E os desenvolvedores buscam melhorias e aprimoramento do modelo para sua aplicação efetiva nas diferentes regiões do mundo.

Outra propriedade significativa do modelo SWAT é a sua extensa documentação teórica, além do manual do usuário e o documento referente aos *inputs* e *outputs* do modelo. Ainda, o site do modelo disponibiliza uma compilação de todos os artigos e publicações relacionadas a sua aplicação, reunindo atualmente, mais de 1500 trabalhos.

O BASINS (*Better Assessment Science Integrating point and Nonpoint Sources*) é um sistema de avaliação da qualidade da água das bacias hidrográficas, que integra o sistema de informação geográfica (SIG), dados de bacias hidrográficas e ferramentas de modelagem para avaliação ambiental em um único pacote (EPA, 2013).

Notadamente, pelo fato dos modelos SWAT e HSPF fazerem parte do BASINS, alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de comparar a eficiência dos modelos frente à simulação da vazão, sedimentos e nutrientes.

Im *et al.* (2003) compararam os resultados obtidos por ambos modelos quando aplicados na bacia do córrego Pelecat, de 12,048 hectares, no Estado da Virgínia (EUA). Os resultados indicaram que ambos os modelos foram capazes de simular satisfatoriamente a vazão, sedimentos e nutrientes durante o período de simulação. Considerando-se as diferenças de cargas anuais e a tendência de cargas mensais, o modelo HSPF simulou a hidrologia e os componentes da qualidade da água de forma mais precisa do que SWAT em todos os locais de monitoramento dentro da bacia hidrográfica. No entanto, os autores concluem que o modelo HSPF é menos amigável do que o modelo SWAT, devido a inúmeros parâmetros necessários para controlar e representar o ciclo hidrológico e o transporte de sedimentos e nutrientes.

Nasr *et al.* (2007) compararam os modelos SWAT, HSPF e SHETRAN/GOPEC na capacidade de simular a produção de fósforo proveniente de áreas agrícolas em três bacias hidrográficas na Irlanda. O modelo HSPF proporcionou melhor simulação da descarga

líquida média diária, enquanto o SWAT apresentou os melhores resultados de para cargas totais de fósforo em nível diário.

A eficiência dos modelos SWAT e HSPF também foram testadas por Saleh e Du (2004) para uma bacia localizada na intensa região produtora de laticínios no Estado do Texas (EUA). O resultado do modelo foi calibrado para o fluxo em nível diário, sedimentos e nutrientes medidos em cinco locais dentro da bacia. O modelo HSPF descreveu melhor a vazão e os sedimentos nos períodos de calibração e verificação comparativamente ao SWAT. No entanto, o SWAT demonstrou ser um melhor indicador de carga de nutrientes.

3.2.1 - Estrutura do modelo SWAT

De acordo com Gassman *et al.* (2007) a origem do SWAT pode ser atribuída a modelos desenvolvidos anteriormente pelo USDA-ARS, incluindo o CREAMS (Knisel, 1980), o GLEAMS (Leonard *et al.*, 1987) e o EPIC (Williams, 1990 e Izaurralde *et al.*, 2006 *apud* Gassman *et al.*, 2007). O modelo SWAT atual é um descendente direto do modelo *Simulator for Water Resources in Rural Basins* (SWRRB) (Arnold e Williams, 1987), juntamente com outros modelos, como o ROTO (*Routing Outputs to Outlet*) (Arnold *et al.*, 1995 *apud* Gassman *et al.*, 2007), QUAL2E (Brown and Barnell, 1987) e CFARM (*carbon cycling routine*) (Kemanian, 2011) além de componentes chave, incluindo um gerador de clima, uma rotina de transporte de sedimentos e um submodelo de água subterrânea. Modificações adicionais vêm sendo feitas no modelo SWAT, como: a expansão de rotinas e capacidades de transporte de poluentes em reservatórios, pequenos lagos, áreas alagáveis; a inclusão de fontes pontuais de poluição e o efeito de tanques sépticos; a admissão de rotinas subsidiárias pelo método de infiltração Green-Ampt (Green e Ampt, 1911); e a rotina de contabilidade temporal, na adoção de diferentes práticas de manejo. A Figura 1 representa o acoplamento e junção desses diversos componentes e modelos.

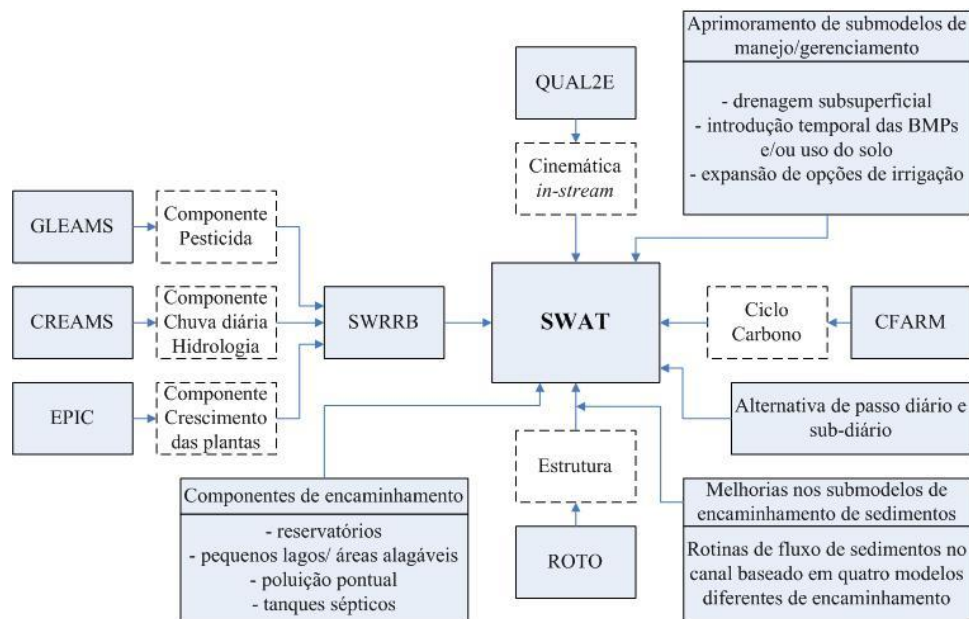


Figura 1 - Estrutura do modelo SWAT (Adaptado de Gassman *et al.*, 2007 e Arnold *et al.*, 2012a).

3.2.2 - Caracterização e equacionamento

Os principais componentes do modelo incluem propriedades do clima, hidrologia, temperatura do solo, crescimento das plantas, nutrientes, sedimentos, pesticidas, bactérias, patógenos e manejo solo.

No SWAT a bacia hidrográfica é dividida em sub-bacias, que podem ser subdivididas em unidades de resposta hidrológica (HRUs – *Hydrologic Response Units*) que consistem em áreas homogêneas de uso do solo, gestão, declividade e tipo de solo. Implícito no conceito da HRU é o pressuposto de que não há interação entre HRUs em uma sub-bacia. As cargas (escoamento, sedimentos, nutrientes, etc.) de cada HRU são calculadas separadamente e depois somadas em conjunto para determinar as cargas totais da sub-bacia. Se a interação de uma área de uso do solo com outra é importante, em vez de definir os domínios uso do solo como HRUs eles devem ser definidos como sub-bacias. É só em nível de sub-bacia que as relações espaciais podem ser especificadas. O benefício das HRUs é o aumento da precisão que contribuem para a predição de cargas a partir da sub-bacia. O crescimento e desenvolvimento de plantas podem ser muito diferentes entre as espécies. Quando a diversidade da cobertura vegetal dentro de uma sub-bacia é contabilizada, o valor líquido de escoamento que entra no canal principal da sub-bacia pode ser muito mais preciso (Arnold *et al.*, 2012b)

O balanço hídrico é a força motriz por trás de todos os processos do SWAT porque impacta o crescimento da planta e do movimento dos sedimentos, nutrientes, pesticidas e agentes patogênicos. A simulação da hidrologia das bacias hidrográficas é separada em fase terrestre, que controla a quantidade de água, sedimentos, nutrientes e pesticidas para o canal principal em cada sub-bacia, e em fase aquática (*in-stream*), que é o movimento da água, sedimentos, etc., através da rede de canais da bacia para o seu exutório (Figura 2).

Os processos hidrológicos simulados pelo SWAT incluem a interceptação e armazenamento nas copas das árvores, escoamento superficial, infiltração, evapotranspiração, fluxo lateral, drenagem subsuperficial, redistribuição da água no perfil do solo, o uso de água através de bombeamento (se houver), fluxo de retorno e recarga por infiltração de águas superficiais, lagoas, canais e tributários.

O clima é o principal agente indutor do ciclo hidrológico, ou seja, o que controla o equilíbrio da água, tais como a precipitação diária, a temperatura máxima/mínima do ar, a radiação solar, a velocidade do vento e a umidade relativa do ar. O SWAT pode ler esses dados observados diretamente a partir de arquivos inseridos ou gerar através de um gerador de tempo (*weather generator*) a partir de estatísticas mensais observadas.

O SWAT utiliza um único modelo de crescimento da planta para simular todos os tipos de cobertura do solo e diferencia entre as plantas anuais e perenes. O modelo de crescimento de plantas é usado para avaliar a remoção de água e de nutrientes a partir da zona de raiz, a transpiração, a biomassa e o rendimento de produção.

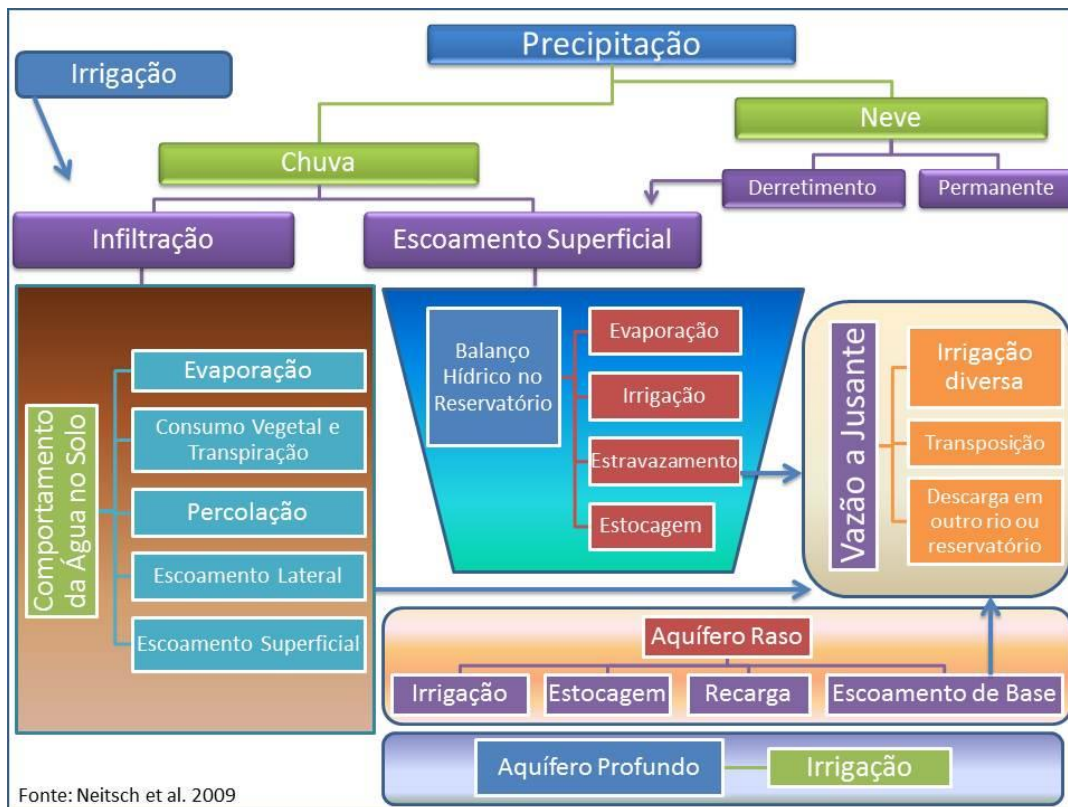


Figura 2 - Esquema do movimento da água na fase terrestre e fase aquática no SWAT (Adaptado de Neitsch *et al.*, 2009).

O SWAT utiliza a Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE) (Williams e Berndt, 1977) para prever a produção de sedimentos. Além disso, o SWAT modela o movimento e a transformação de várias formas de nitrogênio e fósforo na bacia. O modelo, ainda, permite ao usuário definir práticas de manejo que ocorrem em cada HRU, incluindo irrigação, terraceamento, plantio direto, etc.

Uma vez que as cargas de água, sedimentos, nutrientes e pesticidas a partir da fase terrestre para o canal principal foram determinadas, as cargas são encaminhadas através dos córregos e reservatórios dentro da bacia hidrográfica, iniciando a chamada fase aquática.

O balanço hídrico dos reservatórios inclui a entrada, escoamento, precipitação na superfície, evaporação, infiltração a partir do fundo do reservatório, e desvios.

As descrições completas dos processos e as equações utilizadas pelo modelo são documentadas no manual teórico do SWAT em Neitsch *et al.* (2009) e em Arnold *et al.* (1998).

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

$$SW_1 = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

em que, SW_1 é o quantidade final de água no solo (mm), SW_0 é a quantidade inicial de água no solo (mm), t é o tempo (dias), R_{day} é a precipitação acumulada no dia i (mm), Q_{surf} é o escoamento superficial acumulado no dia i (mm), E_a é a evapotranspiração acumulada no dia i (mm), w_{seep} é a quantidade de percolação e de desvio de fluxo que sai do perfil do solo no dia i (mm), e Q_{gw} é a quantidade do fluxo de retorno no dia i (mm).

3.2.2.1 Escoamento Superficial

O escoamento superficial ocorre quando a taxa de água aplicada à superfície do solo excede a taxa de infiltração. Quando a água é inicialmente aplicada a um solo seco, a taxa de infiltração é usualmente muito elevada. No entanto, diminui à medida que o solo torna-se mais molhado. Quando a taxa de aplicação é mais elevada do que a taxa de infiltração, as depressões da superfície começam a encher. Se a taxa de aplicação continua a ser mais elevada do que a taxa de infiltração e todas as depressões da superfície são cheias, o escoamento superficial irá começar.

O SWAT fornece dois métodos para estimar o escoamento superficial: o procedimento SCS *Curve Number* (SCS, 1972) e o método de infiltração de Green e Ampt (1911).

Método SCS Curve Number

A equação de escoamento SCS é um modelo empírico que entrou em uso comum na década de 1950. Foi o produto de mais de 20 anos de estudos envolvendo relações de precipitação pluviométrica e escoamento em pequenas bacias hidrográficas rurais em todo o EUA. O modelo foi desenvolvido para fornecer uma base consistente para estimar as quantidades de escoamento sob diferentes usos e tipos de solo (Rallison e Miller, 1981):

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

em que, Q_{surf} é o escoamento acumulado ou precipitação em excesso (mm), R_{day} é a altura da chuva para o dia (mm), I_a são as abstrações iniciais que inclui o armazenamento na superfície e a interceptação do escoamento antes da infiltração (mm), e S é o parâmetro de retenção (mm). O parâmetro de retenção varia espacialmente devido a mudanças no uso da terra, solos, manejo e declividade e temporalmente devido a mudanças no conteúdo de água do solo.

O SCS *Curve Number* é uma função da permeabilidade do solo, uso da terra e condições antecedentes de água no solo. O *Curve Number* típico de condição de umidade II estão listados em tabelas para várias coberturas de solo e tipos de solo, em SCS engenharia Division, 1986.

Porém, Sartori (2010) propôs uma classificação hidrológica de solos com critérios baseados em propriedades de solos brasileiros e determinou CN de referência para alguns complexos hidrológicos envolvendo usos de solo brasileiros.

A solução gráfica da equação 2 para diferentes valores de CN é apresentada na Figura 3.

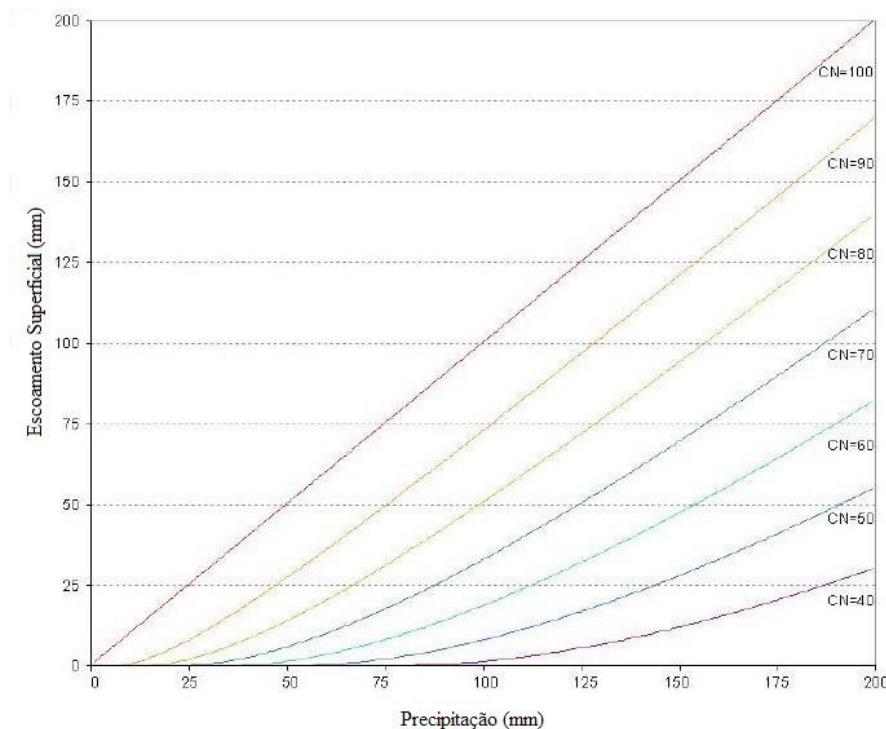


Figura 3 - Relação de escoamento superficial e da precipitação pelo método SCS Curve Number. (Adaptado de Netisch *et al.*, 2009)

Green e Ampt Método Infiltração

A equação de Green e Ampt foi desenvolvida para prever a infiltração assumindo excesso de água na superfície todo tempo (Green e Ampt, 1911). A equação assume que o perfil do solo e a umidade antecedente é homogênea e distribuída uniformemente no perfil do solo. Como a água infiltra no solo, o modelo assume que o solo acima está completamente saturado e há uma quebra acentuada no teor de umidade na frente de molhamento. A Figura 4 ilustra graficamente a diferença entre a distribuição da umidade com a profundidade do solo modelada pela equação de Green e Ampt e o que ocorre na realidade.

Mein e Larson (1973) desenvolveram uma metodologia para a determinação do tempo de empoçamento com infiltração usando a equação de Green e Ampt. O método do excesso de chuvas Green-Ampt Mein-Larson (3) foi incorporado no SWAT para fornecer uma opção alternativa para a determinação do escoamento superficial. Este método requer valores sub-diários de precipitação fornecidos pelo usuário.

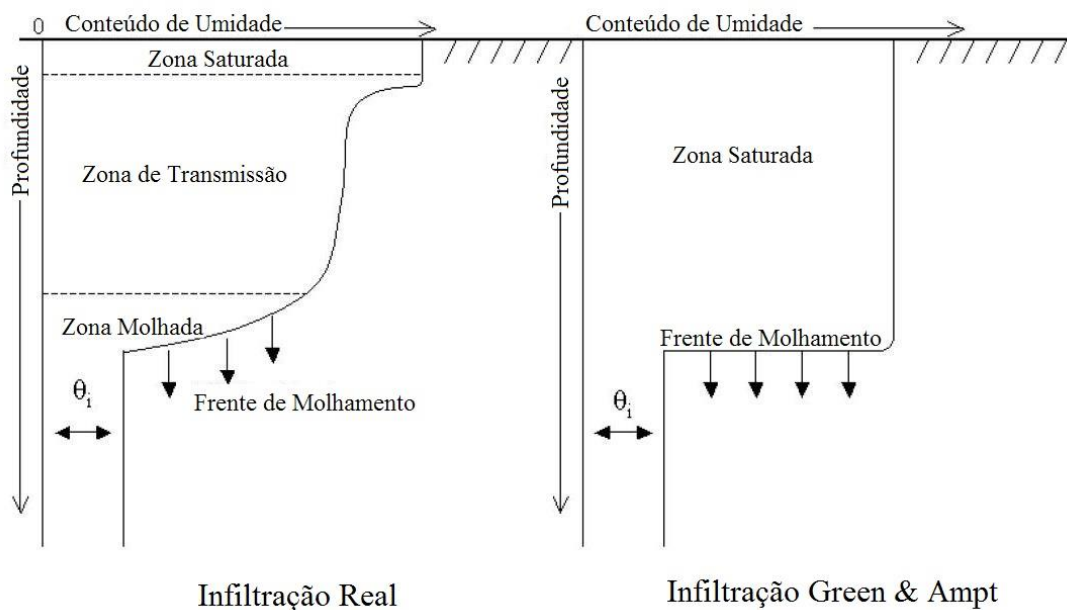


Figura 4 - Distribuição da umidade na profundidade do solo de acordo com a realidade e modelada pela equação de Green e Ampt. (Adaptado de Neitsch *et al.*, 2009)

A taxa de infiltração *Green-Ampt Mein-Larson* é definida como:

$$f_{int,t} = K_e \left(1 + \frac{\Psi_{wf} \times \Delta\theta_v}{F_{inf,t}} \right) \quad (3)$$

em que, f_{int} é a taxa de infiltração no tempo t (mm/h), K_e é a condutividade hidráulica efetiva (mm/h), o potencial Ψ_{wf} frente de molhamento matricial (mm), $\Delta\theta_v$ é a alteração no teor de água volumétrico na parte da frente de molhamento (mm/mm) e F_{inf} é a infiltração acumulativa no tempo t (mm).

O parâmetro de condutividade hidráulica efetiva de Green-Ampt, K_e é, aproximadamente, equivalente à metade da condutividade hidráulica saturada do solo, K_{sat} (Bouwer, 1969 *apud* Neitsch *et al.*, 2009).

3.2.2.2 Evapotranspiração

Evapotranspiração é um termo que inclui todos os processos pelos quais a água na superfície do solo é convertida em vapor de água. Inclui a evaporação a partir do dossel das plantas, a transpiração, a sublimação da neve e a evaporação do solo.

A evapotranspiração é o principal mecanismo pelo qual a água é removida de uma bacia. Aproximadamente 62% da precipitação que cai sobre os continentes é evapotranspirada. A evapotranspiração excede o escoamento na maioria das bacias hidrográficas e em todos os continentes, exceto na Antártida (Dingman, 1994).

Uma estimativa precisa da evapotranspiração é fundamental para a avaliação dos recursos hídricos e do impacto das mudanças climáticas e do uso do solo sobre os recursos hídricos.

Interceptação

O dossel das plantas pode afetar significativamente a infiltração, o escoamento superficial e a evapotranspiração. Quando a chuva cai, a interceptação pelas plantas reduz a energia erosiva das gotas e armazena uma parte da precipitação no dossel. A influência que o dossel exerce sobre esses processos, é uma função da densidade da cobertura vegetal e da morfologia das espécies de plantas.

Ao calcular o escoamento superficial, o método SCS curva número concentra a interceptação no dossel das plantas, em termos de abstrações iniciais. Essa variável inclui também, o armazenamento superficial e infiltração antes do escoamento, e é estimado como 20% do valor do parâmetro de retenção para um determinado dia.

Quando a equação de infiltração Green e Ampt é usada para calcular o escoamento superficial e infiltração, a interceptação de chuva pelo dossel das plantas é calculada separadamente.

O SWAT permite que a quantidade máxima de água que pode ser mantida no armazenamento pelo dossel varia diariamente em função do índice de área foliar:

$$can_{day} = can_{mx} \times \frac{LAI}{LAI_{mx}} \quad (4)$$

em que, can_{day} é a quantidade máxima de água que é interceptada e armazenada no dossel em um determinado dia (mm), can_{mx} é a quantidade máxima de água que pode ser interceptada e armazenada no dossel quando este está totalmente desenvolvido (mm), LAI é o índice de área foliar para um determinado dia, e LAI_{mx} é o índice de área foliar máximo para a planta.

Quando a precipitação acontece em um determinado dia, o armazenamento do dossel é preenchido antes da água chegar ao solo:

$$R_{int(f)} = R_{int} + R'_{day} \quad e \quad R_{day} = 0 \quad (5)$$

quando $R'_{day} \leq can_{day} - R_{int(i)}$

$$R_{int(f)} = can_{day} \quad e \quad R_{day} = R'_{day} - (can_{day} - R_{int(i)}) \quad (6)$$

quando $R'_{day} > can_{day} - R_{int(i)}$

em que, $R_{int(i)}$ é a quantidade inicial de água livre mantida no dossel em um determinado dia (mm), $R_{int(f)}$ é a quantidade final de água livre mantida no dossel em um determinado dia (mm), R'_{day} é a quantidade de chuva num determinado dia antes da interceptação do dossel ser removida (mm), R_{day} é a quantidade de chuva num determinado dia, que atinge a superfície do solo (mm), e can_{day} é a quantidade máxima de água que pode ser mantida no dossel em um determinado dia (mm).

Evapotranspiração Potencial

A evapotranspiração potencial (PET) é um conceito originalmente introduzido por Thornthwaite (1948), definido pelo autor como a evapotranspiração que iria ocorrer a partir de uma área coberta uniformemente com uma vegetação que tem acesso ilimitado de água no solo e que não foi exposta aos efeitos de armazenamento de calor e advecção.

Como a taxa de evapotranspiração é fortemente influenciada por um número de características da superfície vegetativas, Penman (1956) redefiniu a PET como "a quantidade de água transpirada por uma cultura verde, de altura pequena e uniforme, com o solo completamente sombreado e sem escassez de água". Pesquisadores, mais tarde (Jensen *et al.*, 1990) sugeriram que a alfafa, a uma altura de 30 cm a 50 cm pode ser a escolha mais apropriada (Neitsch *et al.*, 2009)

Vários métodos foram desenvolvidos para estimar a PET. Três destes métodos têm sido incorporados no SWAT: o método de Penman-Monteith (Monteith, 1965; Allen, 1986; Allen *et al.*, 1989.), O método de Priestley-Taylor (Priestley e Taylor, 1972) e o método de Hargreaves (Hargreaves *et al.*, 1985). O modelo também pode ler valores de PET em nível diário, se o usuário preferir aplicar um método de evapotranspiração potencial diferente e de certa forma mais apropriado para sua região de estudo.

Os três métodos de PET incluídos no SWAT variam na quantidade de dados de entrada necessários. O método de Penman-Monteith requer radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. O método de Priestley-Taylor requer radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa do ar. O método de Hargreaves requer apenas a temperatura do ar.

Método Penman-Monteith

A equação de Penman-Monteith é dada por:

$$\lambda E = \frac{\Delta \times (H_{net} - G) + \rho_{air} \times c_p \times [e_z^0 - e_z]/r_a}{\Delta + \gamma \times (1 + r_c/r_a)} \quad (7)$$

em que, λE é a densidade do fluxo de calor latente ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), E é a profundidade da taxa de evaporação (mm d^{-1}), Δ é a inclinação da curva pressão-temperatura de saturação do vapor, de/dT ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), H_{net} é a radiação líquida ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), G representa a densidade

de fluxo de calor para o terreno ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), ρ_{air} é a densidade do ar (kg m^{-3}), c_p é o calor específico ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), e_z^0 é a pressão de vapor de saturação do ar na altura z (kPa), e_z é a pressão de vapor de água do ar na altura z (kPa); γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), r_c é a resistência do dossel da planta (s m^{-1}), e r_a é a resistência aerodinâmica (s m^{-1}).

Todos os itens relacionados às equações principais são calculados pelo próprio modelo e os métodos e equações utilizadas para isso estão apresentadas na documentação teórica.

Método Priestley e Taylor

Priestley e Taylor (1972) desenvolveram uma versão simplificada da combinação de equações para utilização quando as superfícies estão molhadas. O componente aerodinâmico foi removido e o componente de energia foi multiplicado por um coeficiente, $\alpha_{pet} = 1,28$, quando o ambiente em geral está molhado ou sob condições úmidas. A equação do método *Priestley e Taylor* é:

$$\lambda E_0 = \alpha_{pet} \times \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times (H_{net} - G) \quad (8)$$

em que, λ é o calor latente de vaporização (MJ kg^{-1}), E_0 é a evapotranspiração potencial (mm d^{-1}), α_{pet} é um coeficiente, Δ é a inclinação da curva de saturação de vapor pressão-temperatura, de/dT ($\text{kPa } \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), H_{net} é a radiação líquida ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), e G é a densidade do fluxo de calor para o terreno ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

A equação de Priestley-Taylor fornece estimativas de evapotranspiração potencial para baixas condições advectivas. Nas áreas semi-áridas ou áridas, onde o componente do balanço de energia é significativo, a equação de Priestley-Taylor possivelmente irá subestimar a evapotranspiração potencial.

Método Hargreaves

O método de Hargreaves foi originalmente derivado de oito anos de dados de lisímetro na Califórnia (Hargreaves, 1975). Várias melhorias foram feitas para a equação original e a forma utilizada no SWAT foi publicado em 1985 (Hargreaves *et al.*, 1985):

$$\lambda E_0 = 0.0023 \times H_0 \times (T_{max} - T_{min})^{0.5} \times (\bar{T}_{av} + 17.8) \quad (9)$$

em que, λ é o calor latente de vaporização (MJ kg^{-1}), E_0 é a evapotranspiração potencial (mm d^{-1}), H_0 é a radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), T_{max} é a temperatura máxima do ar para um determinado dia ($^{\circ}\text{C}$), T_{min} é a temperatura do ar mínima para um determinado dia ($^{\circ}\text{C}$), e \bar{T}_{av} é temperatura média do ar para um dado dia ($^{\circ}\text{C}$).

Evapotranspiração Real

Uma vez que a evapotranspiração potencial total é determinada, a evaporação real é calculada no modelo. O SWAT, primeiro evapora a chuva interceptada pelo dossel da planta. Em seguida, calcula a quantidade máxima de transpiração e a quantidade máxima de sublimação/evaporação do solo, utilizando uma abordagem semelhante à de Richtie (1972, *apud* Neitsch *et al.*, 2009). A quantidade real de sublimação e evaporação do solo é então calculada.

Evaporação da chuva interceptada

Toda a água presente no dossel está prontamente disponível para a remoção por evapotranspiração. A quantidade de evapotranspiração real da chuva interceptada é especialmente significativa em florestas onde, em alguns casos, a evaporação da precipitação interceptada é maior do que a transpiração.

O SWAT remove o máximo de água possível do armazenamento dossel ao calcular a evaporação real.

Se evapotranspiração potencial, E_0 , for menor que a quantidade de água interceptada no dossel, R_{int} , então:

$$E_a = E_{can} = E_0 \quad (10)$$

$$R_{int(f)} = R_{int(i)} - E_{can} \quad (11)$$

em que, E_a é a evapotranspiração real na bacia hidrográfica num determinado dia (mm), E_{can} é a evaporação da água interceptada pelo dossel das plantas num determinado dia (mm), E_0 é a evapotranspiração potencial num determinado dia (mm), $R_{int(i)}$ é a quantidade inicial de água interceptada pelo dossel das plantas num determinado dia (mm), e $R_{int(f)}$ é a quantidade final de água interceptada no dossel das plantas num determinado dia (mm).

Se a evapotranspiração potencial, E_0 for maior que a quantidade de água interceptada no dossel, R_{int} , então:

$$E_{can} = R_{int(i)} \quad (12)$$

$$R_{int(f)} = 0 \quad (13)$$

Uma vez que toda a água livre no dossel foi evaporada, a demanda de água por evaporação restante ($E'_0 = E_0 - E_{can}$) é dividida entre a vegetação e o solo.

Transpiração

Se a equação de Penman-Monteith é seleccionada como o método de cálculo da evapotranspiração potencial, a transpiração é também calculada pelas equações utilizadas pelo método. Para os outros métodos, a transpiração é calculada por:

$$E_t = \frac{E'_0 \times LAI}{3.0} \quad 0 \leq LAI \leq 3.0 \quad (14)$$

$$E_t = E'_0 \quad LAI > 3.0 \quad (15)$$

em que, E_t é a transpiração máxima num dado dia (mm), E'_0 é a evapotranspiração potencial ajustada para a evaporação da precipitação interceptada (mm), e LAI é o índice de área foliar.

O valor para a transpiração calculada pelas equações 14 e 15 é a quantidade que ocorre em um determinado dia, quando a planta está crescendo em condições ideais. A quantidade real de transpiração pode ser menor do que é, devido à falta de água disponível no perfil do solo.

Sublimação e evaporação do solo

Em casos que há ocorrência de neve a sublimação é considerada. A quantidade de sublimação e evaporação do solo é afetada pelo grau de sombreamento. A quantidade máxima de sublimação/evaporação do solo em um determinado dia é calculada por:

$$E_s = E'_0 \times cov_{sol} \quad (16)$$

em que, E_s é a evaporação/sublimação máxima num determinado dia (mm), E'_0 é a evapotranspiração potencial ajustada para a evaporação da precipitação interceptada (mm), e cov_{sol} é o índice de cobertura do solo.

O índice de cobertura do solo é calculado por:

$$cov_{sol} = \exp(-5.0 \times 10^{-5} \times CV) \quad (17)$$

em que, CV é a biomassa e resíduos acima do solo (kg ha^{-1}).

A quantidade máxima de sublimação/evaporação do solo é reduzida durante períodos de alta utilização de água pela planta.

Uma vez que a quantidade máxima de sublimação/evaporação do solo é calculada, o SWAT primeiro remove a água do bloco de neve para atender a demanda evaporativa.

No entanto, quando existe uma demanda de evaporação da água do solo, o SWAT primeiro particiona a demanda evaporativa entre as diferentes camadas. A distribuição da profundidade utilizada para determinar a quantidade máxima de água a ser evaporada é:

$$E_{soil,z} = E_s'' \times \frac{z}{z + \exp(2.374 - 0.00713 \times z)} \quad (18)$$

em que, $E_{soil,z}$ é a demanda por evaporação na profundidade z (mm), E_s'' é a evaporação de água máxima do solo num determinado dia (mm), e z é a profundidade abaixo da superfície.

Os coeficientes nessa equação foram selecionados de modo que 50% da demanda de evaporação seja extraída dos primeiros 10 mm de solo e que 95% da demanda de evaporação seja extraída dos 100 mm de profundidade do solo.

A quantidade de demanda evaporativa para uma camada de solo é determinada pela diferença entre as demandas evaporativas calculadas nos limites superior e inferior da camada do solo:

$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soilzu} \quad (19)$$

em que, $E_{soil,ly}$ é a demanda evaporativa para a camada ly (mm), $E_{soil,zl}$ é a demanda evaporativa do limite inferior da camada do solo, e E_{soilzu} é a demanda evaporativa do limite superior da camada do solo.

O SWAT não permite que uma camada diferente compense a incapacidade de outra camada atender sua demanda evaporativa, sendo assim, a demanda evaporativa não atingida por uma camada de solo resulta em uma redução na evapotranspiração real para a HRU.

Um coeficiente foi incorporado na equação 19 para permitir que o usuário modifique a distribuição da profundidade utilizada para atender a demanda evaporativa do solo. A equação modificada é:

$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soilzu} \times esco \quad (20)$$

em que, $esco$ é o coeficiente de compensação da evaporação do solo. Soluções da equação para diferentes valores de $esco$ são plotados na Figura 5.

Quando o valor de $esco$ é reduzido, o modelo é capaz de extrair mais da demanda evaporativa de níveis mais baixos.

Quando o teor de água de uma camada de solo está abaixo da capacidade de campo, a demanda por evaporação da camada é reduzida de acordo com as seguintes equações:

$$E'_{soil,ly} = E_{soil,ly} \times \exp\left(\frac{2.5 \times (SW_{ly} - FC_{ly})}{FC_{ly} - WP_{ly}}\right) \quad SW_{ly} < FC_{ly} \quad (21)$$

$$E'_{soil,ly} = E_{soil,ly} \quad SW_{ly} \geq FC_{ly} \quad (22)$$

em que, $E'_{soil,ly}$ é a demanda evaporativa da camada ly ajustada para o conteúdo de água (mm), $E_{soil,ly}$ é a demanda evaporativa para a camada ly (mm), SW_{ly} é o conteúdo de água

no solo na camada ly (mm), FC_{ly} é o conteúdo de água na camada ly na capacidade de campo (mm), e WP_{ly} é o conteúdo de água na camada ly no ponto de murcha (mm).

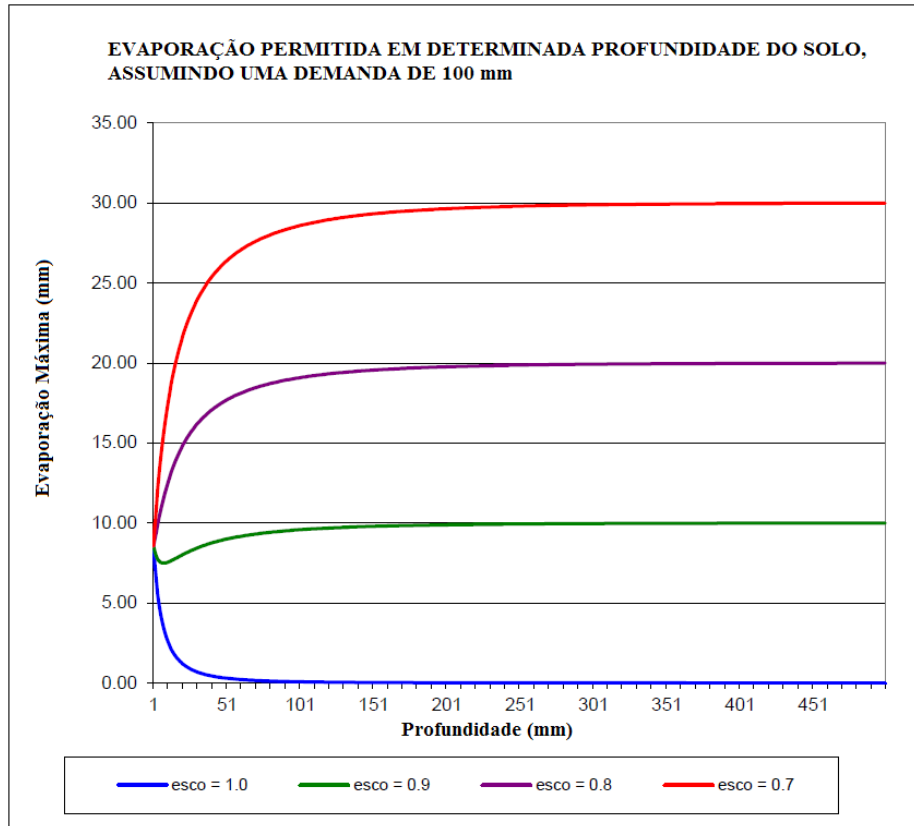


Figura 5 – Distribuição da demanda de evaporação do solo de acordo com a profundidade.

Além de limitar a quantidade de água removida por evaporação em condições secas, o SWAT define um valor máximo de água que pode ser retirada a qualquer momento. Esse valor máximo é de 80% de água disponível para a planta em um determinado dia. O conteúdo de água disponível para a planta é definido como a diferença entre o teor total de água na camada de solo e o teor de água da camada de solo no ponto de murcha permanente (-1,5 MPa):

$$E''_{soil,ly} = \min \left(E'_{soil,ly} \times 0.8 \times (SW_{ly} - WP_{ly}) \right) \quad (23)$$

em que, $E''_{soil,ly}$ é a quantidade de água removida da camada ly por evaporação (mm), $E'_{soil,ly}$ é a demanda evaporativa da camada ly ajustada para o conteúdo de água no solo (mm), SW_{ly} é o conteúdo de água no solo na camada ly (mm), e WP_{ly} é o conteúdo de água no solo na camada ly no ponto de murcha (mm).

3.2.2.3 Percolação

A percolação dada como a transferência de água do solo para o reservatório de água subterrânea somente ocorre se a quantidade de água exceder a capacidade de campo para aquela camada e a camada inferior não estiver saturada.

O volume de água disponível na camada do solo para a percolação é calculado por:

$$SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \quad se \quad SW_{ly} > FC_{ly} \quad (24)$$

$$SW_{ly,excess} = 0 \quad se \quad SW_{ly} \leq FC_{ly} \quad (25)$$

em que, $SW_{ly,excess}$ é o volume de água drenável na camada de solo em um determinado dia (mm), SW_{ly} é a quantidade de água na camada do solo em um determinado dia (mm), FC_{ly} é a quantidade de água na camada do solo na capacidade de campo (mm),

A equação utilizada para calcular a quantidade de água que percola para a camada seguinte é:

$$W_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \times \left(1 - \exp \times \left[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right] \right) \quad (26)$$

em que, $W_{perc,ly}$ é a quantidade de água que percola para a próxima camada em um determinado dia (mm), $SW_{ly,excess}$ é o volume drenável de água na camada de solo (mm), Δt é a duração do passo de tempo (horas) e TT_{perc} é o tempo de propagação na camada do solo (horas).

No entanto, a percolação não é permitida quando:

$$SW_{ly+1} \leq FC_{ly+1} + 0.5 \times (SAT_{ly+1} - FC_{ly+1}) \quad (27)$$

em que, SW_{ly+1} é a quantidade de água na camada subjacente (mm), FC_{ly+1} é a quantidade de água relativa à capacidade de campo na camada de solo subjacente (mm), e SAT_{ly+1} é a quantidade de água na camada de solo subjacente quando completamente saturada (mm).

O tempo de propagação para a percolação é exclusivo para cada camada. É calculado por:

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}} \quad (28)$$

em que, TT_{perc} é o tempo de propagação para a percolação (hrs), SAT_{ly} é a quantidade de água na camada do solo quando completamente saturado (mm), FC_{ly} é a quantidade de água na camada do solo na capacidade de campo (mm), K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada na camada do solo ($mm.h^{-1}$).

A água que infiltra para fora da camada mais baixa do solo entra na zona vadosa, uma zona insaturada que fica entre o solo e a parte superior do aquífero.

3.2.2.4 Aquífero raso

O balanço no aquífero raso é dado pela equação:

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchr,sh} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{pump,sh}$$

em que, $aq_{sh,i}$ é a quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia i (mm), $aq_{sh,i-1}$ é a quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia $i-1$ (mm), $w_{rchr,sh}$ é a quantidade de recarga no aquífero raso no dia i (mm), Q_{gw} é o fluxo de águas subterrâneas, ou fluxo de base, para o canal principal no dia i (mm), w_{revap} é a quantidade de água em movimento na zona do solo em resposta às carências de água no dia i (mm), e $w_{pump,sh}$ é a quantidade de água retirada do aquífero raso por bombeamento no dia i (mm).

Recarga

A água que se move passando da menor profundidade do perfil do solo por percolação ou pelo desvio do fluxo entra e flui através da zona vadosa antes de se tornar recarga do aquífero raso e/ou profundo. O atraso entre o momento em que a água sai do perfil do solo, e entra no aquífero raso irá depender da profundidade do lençol e das propriedades hidráulicas e de formações geológicas das zonas vadosa e subterrânea.

Uma função exponencial do decaimento proposto por Venetis (1969) e utilizado pelo Sangrey et al. (1984) em um modelo de resposta de precipitação/água subterrânea é utilizado no SWAT para calcular o tempo de atraso da recarga. A função de atraso acomoda situações em que a recarga para o aquífero não é instantânea, isto é, 1 dia ou menos. A recarga de ambos os aquíferos num dado dia é calculada por:

$$w_{rchrg,i} = (1 - \exp[-1/\delta_{gw}]) \times w_{seep} + \exp[-1/\delta_{gw}] \times w_{rchrg,i-1} \quad (29)$$

em que, $w_{rchrg,i}$ é a recarga ao aquífero em um dia i (mm), δ_{gw} é o tempo de atraso, ou o tempo de drenagem das formações geológicas (dia), w_{seep} é a quantidade total de água que sai da parte inferior da perfil do solo no dia i (mm), e $w_{rchrg,i-1}$ é a quantidade de recarga dos aquíferos no dia $i-1$ (mm).

Da recarga total diária uma fração pode ser encaminhada para o aquífero raso e outra para o aquífero profundo.

A quantidade de água que será desviada do aquífero raso para o aquífero profundo em um determinado dia é:

$$w_{deep} = \beta_{deep} \times w_{rchrg} \quad (30)$$

em que, w_{deep} é a quantidade de água que se move para o aquífero profundo no dia i (mm), β_{deep} é o coeficiente de percolação do aquífero e w_{rchrg} é a quantidade de recarga entrw ambos os aquíferos no dia i (mm).

A quantidade de recarga para o aquífero raso é:

$$w_{rchrg,sh} = w_{rchrg} - w_{deep} \quad (31)$$

em que, $w_{rchrg,sh}$ é a quantidade de recarga do aquífero raso no dia i (mm).

Fluxo de Base

O aquífero raso contribui para o fluxo de base do canal principal da sub-bacia. O fluxo de base é permitido apenas se a quantidade de água armazenada no aquífero raso exceder um valor limite especificado pelo modelador, $aq_{shthr,q}$.

A resposta do estado estacionário de percolação da água para recarga é dada de acordo com Hooghoudt, (1940):

$$Q_{gw} = \frac{8000 \times K_{sat}}{L_{gw}^2} \times h_{wtbl} \quad (32)$$

em que, Q_{gw} é o fluxo de águas subterrâneas, ou fluxo de base, para o canal principal no dia i (mm), K_{sat} é a condutividade hidráulica do aquífero (mm/dia), L_{gw} é a distância da sub-bacia que divide o sistema de águas subterrâneas para o canal principal (m), e h_{wtbl} é a altura do lençol freático (m).

3.2.3 - Aprimoramentos

Por se tratar de um modelo de domínio público, alguns pesquisadores vêm aprimorando particularidades, principalmente que se faz pertinente, em suas áreas de estudo.

Pela capacidade da modelagem pelo SWAT se limitar a simulação de fluxo de hora em hora, Jeong *et al.* (2010) desenvolveram um modelo chuva-vazão subhorário para o SWAT, modificando os algoritmos para o cálculo de infiltração, escoamento superficial, encaminhamento do fluxo, represamento e um atraso do escoamento permitindo simulações de até um minuto. A evapotranspiração, o conteúdo de água no solo, o fluxo de base e o fluxo lateral continuaram sendo estimados em uma base. A modelagem diária (T= 1 dia), horária (T= 1 hora) e subhorária (T= 15 minutos) foi testada e comparada na bacia hidrográfica do córrego Lost, de 1,9 km² (70% subdesenvolvido), próximo a Austin, no Texas, EUA. A análise de sensibilidade mostrou que os parâmetros de fluxo do canal são mais sensíveis nas simulações subhorária, enquanto parâmetros de fluxo de base são mais importantes em simulações diárias. Esse estudo de caso mostrou que o modelo SWAT de simulação subhorária reproduziu razoavelmente o hidrograma de vazão em vários eventos

de chuvas. A vazão calibrada para o período de um ano, com simulações de 15 min apresentou melhor desempenho em comparação com a simulação diária para o mesmo período. A análise estatística realizada pelos autores mostrou que essa melhora no desempenho do modelo é devida, principalmente, à melhoria na previsão de picos. Em suma, a versão subhorária do SWAT se mostrou uma ferramenta promissora para a hidrologia e fonte de estudos de avaliação de poluição difusa, embora ainda sejam necessários maiores desenvolvimentos na modelagem da qualidade da água.

O SWAT-VSA foi elaborado por Easton *et al.* (2008) com o objetivo de prever o escoamento superficial gerado por áreas variáveis de afluência (*Variable Source Areas - VSA*), que são áreas propensas a gerar escoamento superficial mais rapidamente e podem ser consideradas hidrológicamente sensíveis em relação ao potencial de transportar contaminantes aos corpos d'água. No estudo, o SWAT foi reconceituado para distribuir o escoamento superficial de forma consistente nas VSAs. Ambos, SWAT e SWAT-VSA foram aplicados a uma sub-bacia na bacia do Cannonsville em Nova York para comparar as previsões do modelo de respostas integradas e distribuído, incluindo o escoamento superficial, a profundidade do lençol freático raso, e cargas de fósforo. O escoamento foi simulado igualmente bem para o SWAT-VSA e o SWAT. No entanto, a distribuição da profundidade do lençol freático raso foi melhor prevista pelo SWAT-VSA e são essas águas rasas que regem a VSA. A simulação da exportação do fósforo dissolvido também foi melhor prevista pelo SWAT-VSA, presumivelmente porque a distribuição das áreas de origem de escoamento foi melhor prevista, particularmente em áreas onde adubações são aplicadas. Os autores expõem a importância disso para a utilização de modelos para avaliar e orientar a gestão das bacias hidrográficas, porque prever corretamente onde o escoamento é gerado é fundamental para encontrar as melhores práticas de gestão para controlar a poluição não pontual.

O chamado SWAT-WB é uma versão modificada do SWAT que foi desenvolvido com o objetivo explícito de modelar com precisão a geração de escoamento superficial sem usar o método Curva Número (CN) (White *et al.*, 2009). No lugar do método CN é utilizado para todos os dias da simulação o balanço hídrico de base física (WB). Isso resulta em uma versão qual o escoamento gerado é estritamente resultante de processos de excesso da saturação do solo, ou seja, o escoamento superficial não será gerado com o SWAT-WB até que o solo se torne suficientemente saturado. Portanto, esta versão do SWAT é destinada ao uso em bacias hidrográficas em que o escoamento por saturação do solo é o mecanismo predominante para a sua geração. Para comparar o SWAT-WB e o

SWAT, White (2009) modelou duas bacias hidrográficas, uma na cabeceira do rio Nilo Azul na Etiópia e um nas montanhas de Catskill no Estado de Nova Iorque. As previsões de vazões do SWAT-WB foram significativamente melhores do que SWAT na primeira bacia. Na segunda bacia o SWAT-WB apresentou melhor desempenho durante a calibração do que no SWAT, mas não foi tão preciso durante a validação. Além disso, o SWAT-WB forneceu uma distribuição espacial muito mais realista das áreas produtoras de escoamento. Em suma, o autor sugere que o novo modelo melhora significativamente as previsões do modelo em climas de monções, fornece níveis aceitáveis de precisão sob condições típicas dos Estados Unidos, e ao mesmo tempo, melhora muito a capacidade de prever a distribuição espacial das áreas de contribuição de escoamento superficial.

Tanto o SWAT-WB e o SWAT-VSA foram desenvolvidos por estudos realizados no *Soil and Water Laboratory* da Universidade de Cornell – EUA.

O trabalho desenvolvido por Kim *et al.* (2008) sugere uma nova abordagem para a integração do modelo SWAT, com o modelo de água subterrânea totalmente distribuído MODFLOW. Como o modelo SWAT tem características semidistribuídas, a sua componente de águas subterrâneas não considera os parâmetros distribuídos, como a condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento. A fim de resolver este problema, os autores propuseram um método em que as características das unidades de resposta hidrológicas (HRUs) no modelo SWAT são trocadas pelas células do modelo MODFLOW. Ao utilizar esta interface SWAT-MODFLOW na Bacia do Musimcheon na Coreia, os autores concluíram que o aplicativo é capaz de simular a distribuição espaço-temporal das taxas de recarga de água subterrânea, evapotranspiração e os níveis do aquífero. Também permitiu uma interação entre o aquífero saturado e o canal, desempenhando um papel importante na geração de descarga das águas subterrâneas na bacia, especialmente durante o período de baixo fluxo. Inclusive a integração dos modelos reproduziu com sucesso o rebaixamento e a redução do fluxo corrente através de bombeamento com vários poços.

O SWAT-BF foi desenvolvido por Gautam (2012) com o objetivo de adequar o modelo SWAT para simular os processos hidrológicos que ocorrem em bacias hidrográficas de florestas boreais, especificamente no Canadá. Resultados satisfatórios foram conseguidos pelo estudo, no entanto, verificou-se que o modelo subestima os fluxos máximos diários em todos os estudos de caso. Potenciais fontes de erro do modelo vêm sendo discutidos.

O trabalho desenvolvido por Chen e Wu (2012) apresenta um estudo sobre a integração dos modelos SWAT e TOPMODEL com o objetivo de proporcionar recursos para melhorar a representação física de processos hidrológicos. No SWAT, o escoamento superficial, o escoamento de base, a re-evaporação das águas subterrâneas e a percolação do aquífero profundo são modelados por meio de um conjunto de equações empíricas. Para substituir estas equações e modelar as influências da topografia e variação do lençol freático na geração da vazão, o modelo SWAT-TOP foi desenvolvido. No novo modelo, o processo de percolação do aquífero profundo foi removido, o conceito de re-evaporação das águas subterrâneas foi refinado, e os processos de escoamento superficial e escoamento de base foram melhorados. Conseqüentemente, três parâmetros do SWAT foram descartados, e dois novos parâmetros para refletir as características do TOPMODEL foram introduzidos. Além dessa reformulação, o modelo SWAT-TOP e o SWAT foram aplicados para a bacia do *East River* no sul da China pelos autores e os resultados revelaram que o novo modelo pode fornecer uma simulação mais razoável dos processos hidrológicos de escoamento superficial, as águas subterrâneas re-evaporação e escoamento de base, em comparação com o SWAT.

A ferramenta SWAT_LUC foi desenvolvida por Pai & Saraswat (2011) e permite a inserção de múltiplos conjuntos de usos do solo no SWAT. A ferramenta geoespacial foi testada em uma bacia hidrográfica em processo de urbanização em Arkansas, EUA, por meio de três camadas temporais de usos do solo adquiridos ao longo de 1999, 2004 e 2006. Os resultados mostram que a ferramenta melhora significativamente as respostas hidrológicas espaciais e temporais do modelo SWAT.

O SWAT-CUP é também uma ferramenta a parte do modelo SWAT, foi desenvolvido por Abbaspour, 2007, e é um programa de domínio público para a calibração dos modelos desenvolvidos com o uso do SWAT. O programa faz a junção dos algoritmos, GLUE, ParaSol, SUFI2, MCMC e PSO, possibilitando a realização de análise de sensibilidade, calibração, verificação e análise de incerteza dos modelos para um desses cinco algoritmos. Yang *et al.* (2008), Setegn *et al.* (2008) e Ferrigo *et al.* (2013) aplicaram o SWAT para estudos em bacias hidrográficas na China, na Etiópia e no Brasil, implementando diferentes técnicas multicritérios e multiobjetivo na calibração, validação e análise de incerteza e sensibilidade do modelo SWAT.

Outros exemplos de adaptações, aprimoramentos e modificações do modelo são: SWAT-DEG (*Time rate of channel degradation in watersheds*); SWAT-K (*Multiple modified modules for Korean conditions including interfaces with MODFLOW and SWIM*

models); SWAT-WH (*Effects of water harvesting systems in southeast Tunisia*); SWAT-N (*Modified nitrogen cycling routine based on approach used in the DNDC model*); SWAT-M (*Improved tile drainage routine, incorporated in standard version*).

Algumas pesquisas vêm sendo realizadas na conexão de respostas de modelos hidrológicos, ou seja, os resultados (*outputs*) de um modelo sendo enquadrados como entradas (*inputs*) de outro modelo. Um exemplo disso foi o trabalho desenvolvido por Debele *et al.* (2006) integrando o modelo SWAT e o modelo CE-QUAL-W2 para simular os processos combinados de quantidade e qualidade da água pelos modelos. Os resultados indicaram que os dois modelos são compatíveis e podem ser usados para avaliar e gerir os recursos hídricos em bacias hidrográficas complexas.

3.2.4 - Inputs

O SWAT é um modelo abrangente e exige uma diversidade de dados e informações para ser executado.

A documentação Input/Output (Arnold *et al.*, 2012b) fornece uma visão geral das entradas e saídas do modelo. O documento é separado por capítulos que são organizados por tema e são enfatizados para diferenciar as entradas obrigatórias de entradas opcionais. A partir disso o usuário precisa identificar as entradas que devem ser definidas para o seu trabalho e objetivo em particular. Cada capítulo lista as variáveis e discute os métodos utilizados para medir ou calcular os valores para os parâmetros de entrada.

Os arquivos de entrada para o SWAT são definidos em três diferentes níveis de detalhe: bacia hidrográfica, sub-bacia, ou HRU. Características únicas como reservatórios ou fontes pontuais devem ter dados de entrada fornecidos para cada recurso individual incluído na simulação de bacias hidrográficas.

Os níveis de entradas de bacias hidrográficas são usados para modelar processos em toda a bacia hidrográfica. Por exemplo, o método selecionado para modelar a evapotranspiração potencial será usado em todas as HRUs na bacia. O nível de entradas por sub-bacia são as entradas ligadas com o mesmo valor para todas as HRUs na sub-bacia. Pelo motivo de existir um canal por sub-bacia, os dados de entrada para os canais principais é definido no nível de sub-bacia também. Um exemplo de dados em nível de sub-bacia é precipitação e a temperatura. Entradas em nível de HRU são entradas que

podem ser definidas em valores únicos para cada HRU na bacia. Um exemplo de uma entrada HRU é o cenário de manejo.

3.2.5 - SWAT-CUP

A calibração automática de um modelo exige que seus parâmetros sejam sistematicamente alterados. Em seguida, o modelo é executado, e os *outputs* necessários são extraídos dos arquivos de saída e comparados com os valores observados correspondentes. A principal função de uma interface é fornecer essa ligação entre a entrada/saída de um programa de calibração com o modelo.

O SWAT-CUP é uma interface que foi desenvolvida para o SWAT. O programa foi desenvolvido por Abbaspour *et al.* (2007), e é um programa de domínio. Com o programa disponibilizado, é possível realizar as análises de sensibilidade e incerteza, calibração e verificação, com cinco diferentes algoritmos: SUFI2, GLUE (Beven, 1998), ParaSol (van Griensven *et al.*, 2006), PSO (Kennedy e Eberhart, 1995), e MCMC (Kuczera e Parent, 1998).

O algoritmo SUFI-2, de maior uso para a calibração do SWAT, é descrito, de forma simplificada, no item a seguir, com base em Abbaspour *et al.* (2012).

3.2.5.1 SUFI2 - *Sequential Uncertainty Fitting*

Para a análise de incerteza no SUFI-2, levam-se em consideração todas as possíveis fontes, como a incerteza em variáveis de entrada, os conceitos e simplificações do modelo, as incertezas dos parâmetros e dados medidos. O grau para o qual todas as incertezas são contabilizadas é quantificado por uma medida referida como o *P-factor*, que é a porcentagem dos dados medidos delimitados pela incerteza de predição de 95% (95PPU). O 95PPU é calculado nos níveis de 2,5% e 97,5% da distribuição cumulativa de uma variável de saída obtida pela amostragem *Latin hypercube*, não permitindo que 5% das simulações sejam ruins.

Outra medida que busca quantificar a eficiência de uma análise de calibração e incerteza é o *R-factor*, que é a espessura média da banda 95PPU dividida pelo desvio padrão dos dados medidos. O SUFI-2 tenta lidar com uma banda menor possível de incerteza. O conceito subjacente à análise de incerteza do algoritmo SUFI-2 está representada graficamente na Figura 6.

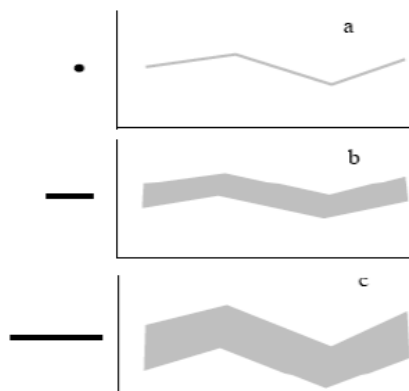


Figura 6 - Ilustração conceitual da relação entre as incertezas dos parâmetros e a incerteza na simulação (Fonte: Abbaspour *et al.*, 2007).

É possível observar que um valor de parâmetro único (mostrada por um ponto) leva a uma resposta de um modelo único (Figura 6a), enquanto que a propagação da incerteza em um parâmetro (mostrado por uma linha) conduz aos 95PPU ilustrados pela região sombreada na Figura 6b. À medida que aumenta a incerteza dos parâmetros, a incerteza de saída também aumenta (não necessariamente de forma linear) (Figura 6c).

A confiabilidade do ajuste e do grau de eficiência do modelo calibrado para as incertezas são avaliados pelo *P-factor* e *R-factor*. Teoricamente, o valor para o *P-factor* varia entre 0 e 100%, enquanto que o *R-factor* varia entre 0 e infinito. O *P-factor* de 1 e o *R-factor* de 0 indicam uma simulação que corresponde exatamente aos dados medidos.

A distância desses números pode ser utilizada para avaliar a eficácia da calibração. Por isso, muitas vezes um equilíbrio entre os dois valores deve ser atingido. Quando os valores aceitáveis de *R-factor* e *P-factor* são alcançados, as incertezas dos parâmetros são os intervalos gerados. Além disso, o quão bom o modelo está, pode ser quantificado pelo R^2 e/ou coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) entre os valores observados e os valores simulados no final da “melhor” simulação.

A descrição do algoritmo SUFI-2 é apresentada em Abbaspour *et al.* (2012) e resumida a seguir.

No primeiro passo a função objetivo é definida. A literatura mostra muitas maneiras diferentes de formular uma função objetivo (por exemplo, Legates e McCabe, 1999; Gupta *et al.*, 1998). Cada formulação pode conduzir a um resultado diferente, portanto, os intervalos de parâmetros finais são sempre condicionadas na forma da função objetivo.

O segundo passo é estabelecer faixas mínimas e máximas fisicamente significativas para os parâmetros que estão sendo otimizados. Devido aos intervalos dos parâmetros desempenhar um papel limitante, estes devem ser tão grande quanto possível, mas fisicamente significativos.

A terceira etapa envolve a *análise de sensibilidade individual* para os parâmetros nos estágios iniciais de calibração. Abbaspour *et al.*, (2012) ressalva que nenhuma rotina de otimização automatizada pode substituir a visão da compreensão física e o conhecimento dos efeitos dos parâmetros na resposta do sistema. A análise de sensibilidade feita variando cada parâmetro dentro do intervalo atribuído na etapa anterior, mantendo constantes nos valores reais todos os outros. A plotagem e a análise dos resultados dessas simulações dão uma visão geral sobre os efeitos das mudanças dos parâmetros na função objetivo e em relação a variável observada.

No quarto passo, faixas de incerteza iniciais são atribuídos próximo aos valores dos parâmetros para a primeira rodada da amostragem de *Latin hypercube*, ou seja:

$$b_j: [b_{j,min} \leq b_j \leq b_{j,max}] \quad j = 1, m \quad (33)$$

Em geral, os intervalos acima são menores do que os intervalos absolutos são subjetivos, e dependem de experiência. A análise de sensibilidade pode ser um guia valioso para a seleção de faixas apropriadas. Embora importantes essas estimativas iniciais não são cruciais, pois são atualizadas e permitidas a alterar dentro dos limites determinados.

Na quinta etapa, a amostragem *Latin Hypercube* (McKay *et al.*, 1979) é realizada levando a n combinações de parâmetros, em que n é o número de simulações desejados. Este número deve ser relativamente grande (cerca de 500 a 1000). O programa de simulação é então executado n vezes e a(s) variável(is) de saída simulada(s) de interesse correspondente às observadas, são guardadas.

O sexto passo corresponde à avaliação das simulações, em que a função objetivo, g , é calculada.

Na sétima etapa uma série de medidas é calculada para avaliar cada rodada de amostragem. Em primeiro lugar, a matriz de sensibilidade, J , de g (b) é calculada usando:

$$J_{ij} = \frac{\Delta g_i}{\Delta b_j} \quad i = 1, \dots, C_2^n, \quad j = 1, \dots, m, \quad (34)$$

em que, C_2^n é o número de linhas na matriz de sensibilidade (igual a todas as combinações possíveis de duas simulações), e j é o número de colunas (número de parâmetros).

Em seguida, equivalente a uma matriz Hessiana, H , é calculado seguindo o método de Gauss-Newton e desprezando as derivadas de ordem-superior como:

$$H = J^T J$$

Com base no teorema de Cramer-Rao (Press *et al.*, 1992) uma estimativa do limite inferior da matriz do parâmetro de covariância, C , é calculado a partir de:

$$C = s_g^2 (J^T J)^{-1}$$

em que, s_g^2 é a variância dos valores da função objetivo resultantes das n simulações. O desvio padrão estimado e o intervalo de confiança de 95% de um parâmetro b_j é calculado a partir dos elementos da diagonal de C (Press *et al.*, 1992) a partir de:

$$s_j = \sqrt{C_{jj}} \quad (35)$$

$$b_{j,lower} = b_j^* - t_{v,0.025} s_j \quad (36)$$

$$b_{j,upper} = b_j^* + t_{v,0.025} s_j \quad (37)$$

em que, b_j^* é o parâmetro b para uma das melhores soluções (ou seja, os parâmetros que produzem o melhor valor da função objetivo) e v são os graus de liberdade ($n - m$). As correlações dos parâmetros podem ser avaliadas usando os termos da diagonal e fora da diagonal da matriz de covariância da seguinte forma:

$$r_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sqrt{C_{ii}}\sqrt{C_{jj}}} \quad (38)$$

É importante notar que a matriz de correlação r quantifica a mudança na função objetivo como um resultado de uma alteração no parâmetro i , em relação a mudanças nos outros parâmetros j .

Como todos os parâmetros podem ser alterados, a correlação entre dois parâmetros é muito pequena.

A sensibilidade dos parâmetros foi computada por meio do cálculo do seguinte sistema de regressão múltipla, que regressa os parâmetros gerados pelo hipercubo latino versus os valores da função objetivo:

$$g = \alpha + \sum_{i=1}^m \beta_i b_i \quad (39)$$

Um *t-test* é então realizado para identificar a significância relativa de cada parâmetro b_i . Enfatiza-se que a sensibilidade resultante da equação 39 é diferente da sensibilidade obtida no terceiro passo apresentado.

A sensibilidade dada pela equação 39 é estimada pelas variações na função objetivo, resultante das mudanças em cada parâmetro, enquanto todos os outros parâmetros também são alterados.

Entretanto, resulta-se numa sensibilidade relativa baseada na aproximação linear, e por isso, somente fornece informações parciais sobre a sensibilidade da função objetivo em relação aos parâmetros do modelo.

Além disso, as sensibilidades relativas dos diferentes parâmetros, indicado pelo *t-test*, dependem dos intervalos dos parâmetros e, portanto, o ranking da sensibilidade dos parâmetros pode mudar a cada interação.

No oitavo passo, a avaliação das incertezas é calculada. Os processos estatísticos como, erro percentual, R^2 , e Nash-Sutcliffe, não são aplicáveis. Para isso, o SUFI-2 que é um processo estocástico, calcula os 95% de previsão de incertezas (95PPU) para todas as variáveis na função objetivo. Como mencionado anteriormente, este é calculada pelos percentis de distribuição cumulativa de cada ponto simulado nas posições 2,5 (X_L) e 97,5 (X_U). A qualidade do ajuste é, portanto, avaliada pelas medidas de incerteza calculada a partir do percentual dos dados medidos enquadrados pela banda 95PPU, e a distância média, \bar{d} , entre o valor mais alto e mais baixo do intervalo 95PPU (ou o grau de incerteza) determinado a partir de:

$$\bar{d}_x = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k (X_U - X_L)_l \quad (40)$$

em que, k é o número de pontos de dados observados. O melhor resultado é quando 100% das medições são agrupadas pelo 95PPU, e \bar{d} é próximo de zero. No entanto, devido a erros de medição e as incertezas do modelo, os valores ideais geralmente não são alcançados.

Uma medida razoável para \bar{d} , com base experiência dos desenvolvedores, é calculada pelo *R-factor*, expressado como:

$$Rfactor = \frac{\bar{d}_x}{\sigma_x} \quad (41)$$

em que, σ_x é o desvio padrão da variável observada (x). Um valor menor que 1 é um resultado desejável para o *R-factor*.

Devido que as incertezas dos parâmetros são inicialmente altas, o valor de \bar{d} tende a ser bastante elevado durante a primeira simulação. Por isso, novas simulações são necessárias, com intervalos de parâmetros atualizados e calculados a partir de:

$$b'_{j,min} = b_{j,lower} - \text{Max} \left(\frac{(b_{j,lower} - b_{j,min})}{2}, \frac{(b_{j,max} - b_{j,upper})}{2} \right) \quad (42)$$

$$b'_{j,max} = b_{j,upper} + \text{Max} \left(\frac{(b_{j,lower} - b_{j,min})}{2}, \frac{(b_{j,max} - b_{j,upper})}{2} \right) \quad (43)$$

em que, b' indica valores atualizados. Os parâmetros da melhor simulação são usados para calcular $b_{j,lower}$ e $b_{j,upper}$. Os critérios acima, quanto à definição de intervalos de parâmetros mais estreitos para as iterações subsequentes, garantem que esses novos intervalos sejam sempre centrados nas melhores estimativas. Nessa formulação, a incerteza dos parâmetros sensíveis reduz mais rapidamente do que dos parâmetros não sensíveis, devido, principalmente, à inclusão do intervalo de confiança, que é maior para os parâmetros menos sensíveis.

4 - MATERIAL E MÉTODOS

4.1 - CARACTERIZAÇÃO DAS SUB-BACIAS DE ESTUDO

A caracterização ambiental foi uma etapa fundamental no processo de levantamento de dados e informações e no conhecimento da área estudada.

A caracterização da área de estudo foi realizada abordando os principais componentes influentes no ciclo hidrológico e de certa forma indispensáveis para a modelagem com o SWAT.

Fez-se inicialmente a delimitação das sub-bacias afluentes ao lago Descoberto e as análises referentes às áreas de drenagem.

Como um segundo passo realizou-se a caracterização climática incluindo o diagnóstico de disponibilidade dos dados. A avaliação se fez da análise da precipitação, temperaturas máximas, médias e mínimas e umidade relativa do ar.

Além disso, as sub-bacias foram caracterizadas conforme os tipos de solo e relevo. Foram também relatadas as informações referentes aos pontos outorgados de usos de água superficiais dentro de cada sub-bacia e os pontos de monitoramento mensal e diário das cotas altimétricas.

Em relação ao mapa de uso e ocupação do solo, este foi elaborado manualmente na escala de 1:3000 por meio do software ArcGIS 10.1. A confecção dos polígonos foi realizada sobre a ortofoto de abril de 2013 disponibilizada pela Terracap. A ortofoto apresenta uma resolução espacial de 24 cm.

O reconhecimento da área foi feito também em três saídas a campo para familiarização e identificação de 19 diferentes classes de uso de solo característico da bacia, descritas na Tabela 1, onde é incluída também uma pequena explicação sobre cada uso e ocupação do solo, além de uma pequena imagem da bacia como exemplo.

Tabela 1 - Caracterização dos diferentes usos e ocupação do solo na BHL D.

	<p>Áreas Urbanizadas Alta Densidade</p>	<p>Áreas de urbanização que apresentam mais de 70% de impermeabilização.</p>
	<p>Áreas Urbanizadas Alta / Média Densidade</p>	<p>Áreas de urbanização que apresentam entre 50 e 70% de impermeabilização.</p>
	<p>Áreas Urbanizadas Baixa / Média Densidade</p>	<p>Áreas de urbanização que apresentam entre 30 e 50% de impermeabilização.</p>
	<p>Áreas Urbanizadas Baixa Densidade</p>	<p>Áreas de urbanização que apresentam menos que 30% de impermeabilização.</p>
	<p>Vias Pavimentadas</p>	<p>Rodovias e vias urbanas que apresentam sua superfície de rolamento com pavimento asfáltico ou de concreto.</p>
	<p>Vias Não Pavimentadas</p>	<p>Rodovias, vias urbanas e vias rurais que não apresentam pavimento asfáltico ou de concreto.</p>

Tabela 1 – Continuação







	<p>Áreas Preservadas/Cerrado</p>	<p>Áreas de cerrado e cerradão, de vegetação nativa com predomínio de espécies arbustivas e herbáceas, e vegetação nativa de porte arbóreo apresentando dossel contínuo.</p>
	<p>Reflorestamento de Pinus</p>	<p>Áreas de plantio de árvores (silvicultura) com finalidade comercial ou de preservação, com espécies do gênero <i>Pinus</i>.</p>
	<p>Reflorestamento de Eucalipto</p>	<p>Áreas de plantio de árvores (silvicultura) com finalidade comercial ou de preservação, com espécies do gênero <i>Eucalyptus</i>.</p>
	<p>Culturas Anuais / Olericultura</p>	<p>Talhões de plantações de culturas temporárias e de ciclo anual.</p>
	<p>Culturas Perenes / Fruticultura</p>	<p>Área de cultura de plantas frutíferas, de ciclo perene.</p>
	<p>Mata de Galeria</p>	<p>Áreas de vegetação típica ao longo das linhas de drenagem, localizando-se geralmente nos fundos dos vales, não apresentando caducifólia durante a estação seca e que apresenta uma superposição das copas.</p>

Tabela 1 - Continuação








	<p>Campo Limpo</p>	<p>Áreas com vegetação predominantemente herbáceo-arbustiva, com arbustos e subarbustos esparsos e algumas árvores.</p>
	<p>Áreas Vegetadas</p>	<p>Áreas de vegetação com altura média do estrato arbóreo entre 10 e 30 m, apresentando uma superposição das copas de modo a fornecer cobertura arbórea de 60 a 100%.</p>
	<p>Solo Exposto</p>	<p>Áreas com retirada total da cobertura vegetal, incluindo solos em pousio.</p>
	<p>Pastagem</p>	<p>Áreas com vegetação predominantemente herbáceo e algumas árvores esparsas,</p>
	<p>Áreas Degradadas / Cascalheiras</p>	<p>Áreas degradadas por intervenção antrópica. As cascalheiras são áreas de exploração de materiais de origem mineral.</p>
	<p>Água / Pequenos Lagos / Açudes</p>	<p>Áreas que contém permanentemente uma quantidade variável de água.</p>

Tabela 1 - Continuação

	<p>Áreas Alagáveis / Campos de Murundus</p>	<p>Áreas predominadas por murundus (pequenas porções mais elevadas com espécies vegetais típicas do cerrado) e a porção rebaixada topograficamente, predominada por uma vegetação graminóide que sofre influência de inundações periódicas.</p>
---	---	---

4.2 - PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

Para a elaboração dos mapas foi utilizado o software ArcGIS 10.1 *for Desktop Advanced*, incluindo o uso das extensões: *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, California, EUA.

Para a modelagem foi utilizada a interface do SWAT – ArcSWAT - *Soil and Water Assessment Tool* versão 2012, desenvolvido pelo *Blackland Research Center Texas Agricultural Experiment Station* e *Agricultural Research Service*.

A análise de sensibilidade e calibração foi realizada pelo software SWAT-CUP 2009 versão 4.3.7.1, software desenvolvido por Abbaspour *et al.* (2011) adaptado ao SWAT 2012.

A organização dos resultados e a análise gráfica foram feitas utilizando o programa Excel versão 2013, desenvolvido pela *Microsoft Corporation* e o programa STATISTICA versão 7.0 desenvolvido pela *Inc. StatSoft*.

Para a representação do ciclo hidrológico foi utilizado o programa Corel Draw Versão 12.0.0.458 desenvolvido pela *Corel Corporation*.

4.3 - DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS PARA AS BASES DE DADOS DO MODELO

Com base na caracterização da área e nos objetivos propostos pelo trabalho vislumbrou-se a necessidade da parametrização das bases de dados, que consiste na

definição de valores das propriedades físicas de cada componente essencial para a modelagem. Nesse caso, foi feita a parametrização para cada classe de solo, fertilizantes, tipos de uso do solo e clima utilizados na modelagem do presente trabalho.

Esse módulo foi realizado com base na obtenção dos valores dos parâmetros por cálculos efetuados e recomendados, pesquisas na literatura e em buscas nas instituições responsáveis que puderam ceder dados relevantes para o estudo, entre elas ADASA, EMBRAPA, EMATER e CAESB.

A parametrização do solo foi feita com base no estudo desenvolvido por Lima *et al.* 2013, em que apresenta o desenvolvimento da base de dados de solos do bioma cerrado para aplicação no modelo SWAT.

Referente aos usos do solo, a parametrização foi feita pelo complemento da base de dados obtida do sistema MapWindow-SWAT, interface MWSWAT.

Os valores de CN foram adaptados à classificação hidrológica de solos brasileiros (Sartori *et al.*, 2005; Sartori *et al.*, 2005b e Sartori, 2010).

Os dados de clima, utilizados pelo componente de gerador de tempo no modelo, foram calculados conforme recomendação do manual Input/Output (Arnold *et al.*, 2011b).

As informações referentes aos fertilizantes utilizados na bacia foram constatadas de forma informal conjuntamente com a EMATER e ao GT do plano de manejo da APA do Descoberto.

A base de dados completa será disponibilizada caso haja interesse, para isso é necessário que o usuário entre em contato com o programa de pós-graduação pelos endereços disponíveis no site do programa: <http://www.ptarh.unb.br>.

4.4 - MODELAGEM INICIAL COM O SWAT

A modelagem inicial, sem calibração, foi avaliada pela comparação gráfica e computação dos coeficientes de eficiência NSE e do coeficiente de determinação R^2 , de modo a avaliar visualmente e estatisticamente o comportamento da vazão simulada pelo modelo perante a vazão observada em campo.

Essa avaliação pode indicar que o modelo apresenta resultados satisfatórios dispensando o processo de calibração. No entanto, também pode indicar que o modelo e a parametrização inicial são insuficientes para gerar respostas aceitáveis estatisticamente.

Portanto, a análise inicial da simulação foi realizada afim de interpretar o comportamento hídrico simulado, apoiando assim a construção do arranjo das melhorias que exigiam ser feitas e da seleção de parâmetros influentes que minimizassem essas falhas.

4.5 - SELEÇÃO DOS PARÂMETROS E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO

O primeiro passo para o processo de calibração e verificação do modelo é a determinação dos parâmetros mais sensíveis para a bacia hidrográfica em estudo, que deve ser realizada com base em opinião especializada e/ou análise de sensibilidade (Arnold *et al.*, 2012a).

Sendo assim, a seleção dos parâmetros para análise de sensibilidade e calibração foi feita a partir da avaliação da modelagem inicial (Item 4.4 -), com base em diversos estudos publicados sobre a influência de cada parâmetro no ciclo hidrológico (Arnold *et al.*, 2012a; Pechlivanidis *et al.*, 2011; van Griensven *et al.*, 2006), e também de acordo com os estudos já realizados em uma das sub-bacias em questão (Ferrigo, 2011; Ferrigo *et al.*, 2011; Ferrigo *et al.*, 2012; Ferrigo *et al.*, 2013).

Para todos os parâmetros selecionados foi indicado seu valor estabelecido utilizado na modelagem inicial.

A análise de sensibilidade neste estudo buscou investigar como o modelo computacional responde a diferentes variações dos valores dos parâmetros de entrada. Essa avaliação permitiu identificar os parâmetros que influenciam quantitativamente e qualitativamente nos resultados.

A análise de sensibilidade foi realizada com diversos parâmetros que o SWAT utiliza para os cálculos de estimativa de vazão diretamente ou indiretamente, permitindo identificar quais parâmetros influenciam significativamente na dinâmica hidrológica. A escolha dos parâmetros foi feita com base, principalmente, em estudos e experiências anteriores na bacia, que fundamentaram o conhecimento do comportamento hidrológico e da modelagem na área de estudo.

Ainda, a hierarquização dos parâmetros sensíveis pôde auxiliar em um melhor entendimento do processo em estudo, e uma melhor estimativa dos seus valores levou a uma melhor e mais rápida aproximação dos dados simulados aos dados medidos.

A análise de sensibilidade foi realizada automaticamente pelo uso da ferramenta SWAT-CUP 2009 versão 4.3.7.1, software desenvolvido por Abbaspour *et al.* (2011). Essa ferramenta ainda não havia sido atualizada para o modelo SWAT versão 2012 no início do estudo, assim, fizeram-se necessárias algumas modificações na ferramenta para obter a compatibilidade entre as diferentes versões dos programas, indicadas pelo desenvolvedor do programa.

Os parâmetros utilizados na análise e sua respectiva função são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados na Análise de Sensibilidade, descrição, função e respectivos intervalos mínimo e máximo de variação.

Parâmetro	Descrição / Função	Unidade	Intervalo Possível de Variação	
			Mín	Máx
CN2	Curva número na condição II: Esse parâmetro é importante no cálculo do escoamento superficial quando utilizado o método SCS <i>Curve Number</i> para seu cálculo. O CN é um número adimensional e é obtido em função da permeabilidade, do tipo de solo, do uso e da condição antecedente de umidade no solo. Ou seja, os valores de deflúvio na bacia são proporcionais ao parâmetro CN.	adim	0	100
ALPHA_BF	Constante de recessão do fluxo de base: Esse parâmetro é um indicador direto da resposta do fluxo subterrâneo para as mudanças na recarga. Quanto maior o valor desse parâmetro maior será a recarga do aquífero e menor o fluxo de base. Os valores variam 0,1 - 0,3 para solos com a resposta lenta para recarga e 0,9 - 1,0 para solos com uma resposta rápida.	adim	0	1
GW_DELAY	Intervalo de tempo para a recarga do aquífero: Esse parâmetro é importante no cálculo da recarga do aquífero e é dependente da formação geológica. O GW_DELAY é inversamente proporcional a recarga.	dias	0	50
GWQMN	Profundidade limite de água no aquífero raso necessária para o fluxo de retorno ocorrer: Quanto maior o valor desse parâmetro uma porção maior do fluxo de base é retardada. Ou seja, para valores baixos desse parâmetro é produzido mais fluxo de base e um alto fluxo fluvial. O fluxo das águas subterrâneas para o canal é permitido somente se a profundidade da água no aquífero raso for igual ou maior do que o GWQMN.	mm	0	5000
GW_REVAP	Coefficiente de ascensão da água à zona não saturada: esse parâmetro é designado como uma constante de proporcionalidade para o cálculo da quantidade máxima de água que se move no solo em resposta às deficiências de água.	adim	0,02	0,2

Tabela 2 - Continuação

Parâmetro	Descrição / Função	Unidade	Intervalo Possível de Variação	
			Mín	Máx
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo: É um parâmetro importante no processo de evapotranspiração. Os valores desse parâmetro representam um percentual aplicado à evaporação da camada superior do solo, de modo que percentuais elevados significam maior evaporação na camada superior do solo.	adm	0	1
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo: Esse parâmetro é importante no processo de movimentação da água no solo e é utilizado para calcular o conteúdo de água no solo disponível para a vegetação. É dado pela diferença entre a capacidade de campo e o ponto de murcha.	adim	0	1
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo: É um parâmetro influente no processo de movimentação da água no solo e é necessário para calcular o tempo de percolação da água numa dada camada do solo. O fluxo de base aumenta quando esse parâmetro está entre valores baixo e médio e diminui quando o parâmetro está entre médio e alto.	mm/h	0	100
SOL_BD	Densidade aparente do solo: A densidade do solo expressa a relação entre a massa das partículas sólidas e o volume total do solo, $\rho_b = MS / VT$. A densidade do solo é inversamente relacionada a porosidade do mesmo solo, ou seja, maior porosidade quanto menor o valor da densidade do solo.	mg/m ³ ou g/cm ³	0,9	2,5
SHALLST	Profundidade inicial do aquífero raso	mm	0	1000
GWHT	Altura inicial da água subterrânea	m	0	25
DEEPST	Profundidade inicial de água no aquífero profundo	mm	0	3000
REVAPMN	Profundidade limite da água no solo para a ocorrência da ascensão da água à zona não saturada: É um parâmetro importante no processo de contribuição de água subterrânea e define o limite do nível de água no aquífero raso para que o movimento da água dentro do solo em resposta as deficiências de água ocorra. É utilizado no cálculo da estimativa da quantidade máxima de água que será removida do aquífero num dado dia. Ou seja, o movimento da água do aquífero raso para a zona insaturada é permitido somente se o volume de água no aquífero raso for igual ou maior do que o REVAPMN.	mm	0	500
ANION_EXCL	Fração de porosidade (espaços vazios).	adim	0,01	1,00

*adim: adimensional

A *análise de sensibilidade global* foi realizada para a identificação dos parâmetros mais sensíveis e a significância de cada parâmetro. A *análise individual* foi realizada para

analisar de modo ilustrativo essa sensibilidade obtida pelo método anterior para os parâmetros mais sensíveis e sua respectiva sensibilidade na variável avaliada.

4.5.1 - Análise de Sensibilidade Global

Pela *análise de sensibilidade global*, a determinação da sensibilidade dos parâmetros é determinada pelo cálculo do sistema linear de regressão múltipla.

Um *t-test* é então usado para identificar a significância relativa de cada parâmetro e a sensibilidade é estimada pelas mudanças médias na função objetivo, resultante das alterações em cada parâmetro, enquanto todos os outros parâmetros também são alterados. Essa sensibilidade relativa determinada é baseada numa aproximação linear e, conseqüentemente, fornece somente informações parciais sobre a sensibilidade dos parâmetros do modelo na função objetivo (Abbaspour *et al.*, 2007)

O SWAT CUP apresenta dois resultados em relação à análise de sensibilidade global: (1) o *t-stat*, que fornece a medida da sensibilidade, em que quanto maior for o seu valor mais sensível é o parâmetro; e (2) o *p-value* que determina a significância da sensibilidade, e um valor próximo à zero indica maior significância. Ambos os resultados foram avaliados.

4.5.2 - Análise de Sensibilidade Individual

A *análise de sensibilidade individual* mostra a sensibilidade das mudanças do parâmetro na variável em análise, enquanto todos os outros parâmetros são mantidos constantes.

O problema desse método é que o usuário não sabe qual é o valor constante dos outros parâmetros. Isso é uma importante consideração quando a sensibilidade de um parâmetro depende do valor de outro. O exemplo abaixo (Figura 7) ilustra esse ponto.

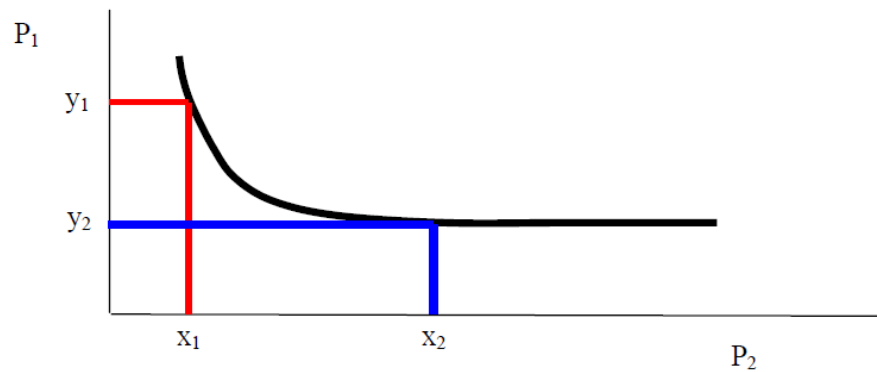


Figura 7 – Avaliação da sensibilidade de um parâmetro (P_2) de acordo com a posição em que outro parâmetro (P_1) é mantido constante (Fonte: Abbaspour *et al.* 2007)

Se o valor do parâmetro P_1 for mantido constante em y_1 , então uma pequena mudança no parâmetro P_2 fará mudanças significativas na função objetivo e indicará que P_2 é um parâmetro bastante sensível. No entanto, se o valor do parâmetro P_1 for mantido constante em y_2 , as mudanças no parâmetro P_2 em torno de x_2 indicarão que P_2 não é um parâmetro sensível. Portanto, os valores em que os outros parâmetros foram fixados podem fazer diferença na sensibilidade do parâmetro em análise.

A análise de sensibilidade individual foi realizada com os quatro parâmetros mais sensíveis obtidos da resposta da análise de sensibilidade global.

4.6 - CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO

A calibração é o ajuste dos parâmetros de um modelo para que se obtenha uma concordância aceitável entre os dados observados e simulados (Arnold *et al.*, 2012a).

A calibração automática do modelo SWAT foi feita apenas para a sub-bacia do rio Descoberto (SBRD) durante o período diário dos anos hidrológicos de outubro de 2005 a setembro de 2010.

Para avaliar a eficiência do modelo em representar a realidade foram utilizados o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) e o coeficiente de determinação (R^2) (Tabela 3).

A função objetivo é um elemento muito importante na calibração de modelos hidrológicos, sendo a métrica utilizada pelo algoritmo de otimização para determinar a qualidade da simulação hidrológica. De acordo com Gupta *et al.* (1999), a função objetivo pode ser definida como uma equação utilizada para medir a “distância” entre os valores simulados pelo modelo e os valores observados em campo.

Tabela 3 - Funções objetivo e respectivas equações

Funções Objetivo	
Índice de Eficiência de <i>Nash-Sutcliffe</i>	$\left[1 - \frac{\sum(Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \right]$
R ² - Coeficiente de Determinação	$\left[\frac{\sum_{i=1}^n [(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2} \right]$

Q_{obs} : vazão observada; Q_{sim} : vazão simulada pelo modelo; n : quantidade de dados na série de vazões observadas; e $Q_{obs}(t)$: vazão média observada do dia de referência do período simulado.

O índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual quando comparado com a variação dos dados de medição. O índice varia entre $-\infty$ a 1, sendo que valores menores do que zero indicam que a média dos dados observados prevê melhor do que a simulação pelo modelo, enquanto valores próximos a um indicam um ajuste ótimo. Segundo Moriasi *et al.* (2007), valores entre 0 e 1 são geralmente vistos como níveis aceitáveis de performance do modelo, enquanto que valores menores que 0 indicam um desempenho inaceitável do modelo.

A utilização do NSE para a avaliação do desempenho do modelo é recomendável por Moriasi *et al.* (2007) por duas razões principais: (1) é recomendado para o uso pela ASCE (1993) a Legates e McCabe (1999); e (2) é comumente utilizado em todo o mundo, o que fornece extensas informações dos valores reportados.

O coeficiente de determinação mostra o grau de colinearidade entre os valores observados e simulados, descrevendo a proporção da variância entre esses valores. O R² varia entre 0 e 1, em que valores mais próximos a 1 indicam menor variância do erro.

A calibração da vazão foi realizada automaticamente pelo uso da ferramenta SWAT-CUP 2009 versão 4.3.7.1 adaptada para o SWAT 2012, software desenvolvido por Abbaspour (2011). Os parâmetros calibrados e respectivos intervalos definidos foram determinados com base na análise de sensibilidade previamente executada e de acordo com as características físicas da bacia em estudo. Para a calibração do modelo foi utilizado o algoritmo SUFI-2.

A verificação foi realizada para a SBRD no período de outubro de 2010 a agosto de 2013. Para as demais sub-bacias, a verificação foi feita para os períodos de 2005 a 2010 e 2010 a 2013. Foram avaliados os resultados diários e mensais.

4.7 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

A calibração dos parâmetros foi realizada apenas para a sub-bacia do rio Descoberto (SBRD). A posterior verificação foi feita para as demais sub-bacias em estudo, podendo assim ser avaliada a possibilidade da reprodução da calibração de uma bacia hidrográfica para outras bacias.

Ao fim dos processos de análises e da aplicação propriamente dita do modelo e da geração dos resultados simulados pôde-se avaliar estatisticamente e graficamente a dinâmica do balanço hídrico nas sub-bacias.

Os resultados foram apresentados em forma de tabelas, gráficos, figuras, ou espacializados em mapas, fornecendo melhor compreensão e visualização.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do lago Descoberto (BHL D) está incluída na região hidrográfica do Paraná fazendo parte da bacia hidrográfica do rio Descoberto (DF e GO). Sua localização geográfica é apresentada na Figura 8.

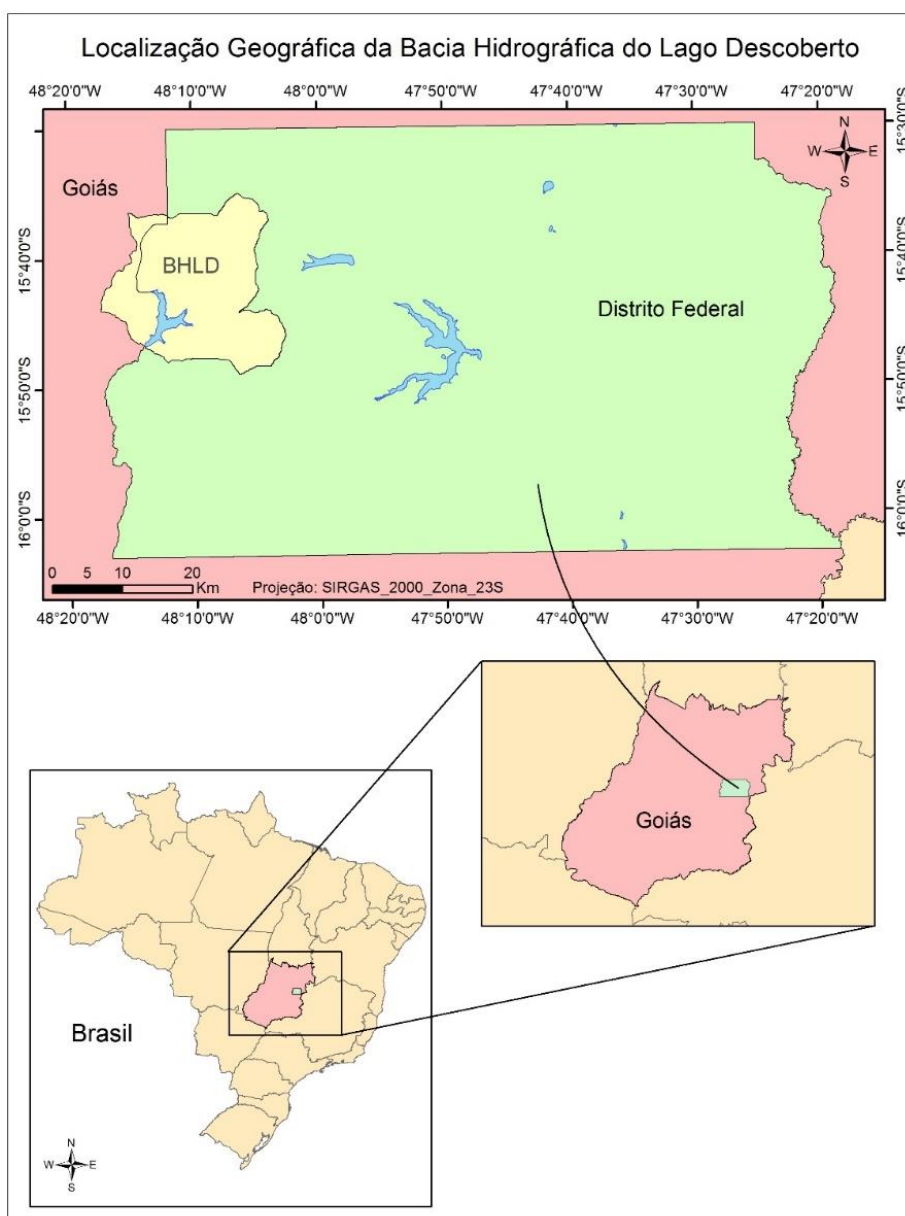


Figura 8 - Localização geográfica da bacia hidrográfica do lago Descoberto (BHL D).

A BHL, com seu exutório na barragem que represa o rio Descoberto e forma o lago, apresenta uma área de 452 km², sendo que aproximadamente 30% da área está no estado de Goiás (GO) e 70% no Distrito Federal (DF).

As sub-bacias da BHL que fizeram parte desse estudo estão apresentadas na Figura 9. São elas: (SBRD) Sub-bacia do Rio Descoberto, (SBCC) Sub-bacia do Córrego Chapadinha, (SBCO) Sub-bacia do Córrego Olaria, (SBCR) Sub-bacia do Córrego Rodeador, (SBCCC) Sub-bacia do Córrego Capão Comprido e (SBRP) Sub-bacia do Ribeirão das Pedras.

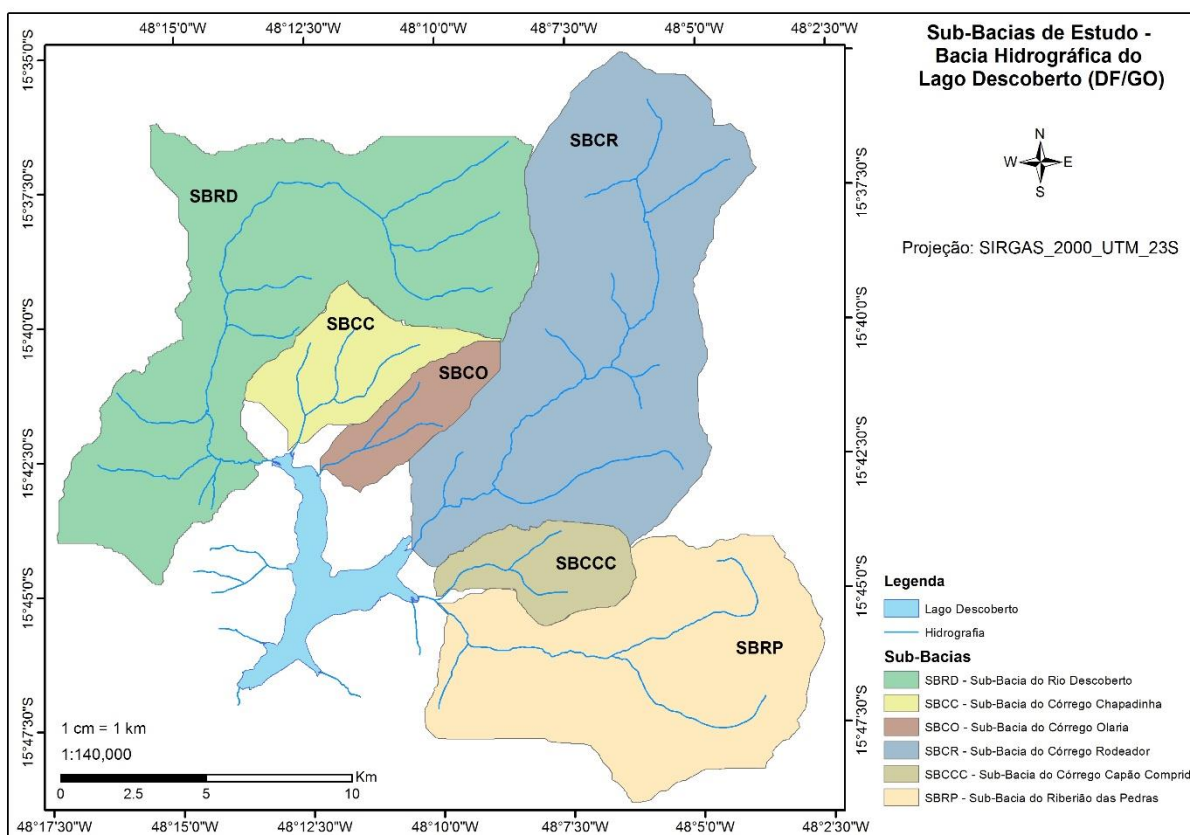


Figura 9 - Sub-bacias de estudo da bacia do Lago Descoberto.

A Tabela 4 apresenta as áreas de drenagem e respectivas percentagens de ocupação das sub-bacias em relação à BHL.

Tabela 4 - Área de drenagem das sub-bacias de estudo e respectiva percentagem de ocupação na BHL D.

Sub-Bacia	Código	Área de Drenagem	
		Km ²	% da BHL D
Sub-bacia do Rio Descoberto	SBRD	114,41	25,31
Sub-bacia do Córrego Chapadinha	SBCC	20,47	4,53
Sub-bacia do Córrego Olaria	SBCO	13,26	2,93
Sub-bacia do Córrego Rodeador	SBCR	113,46	25,10
Sub-bacia do Córrego Capão Comprido	SBCCC	16,23	3,59
Sub-bacia do Ribeirão das Pedras	SBRP	80,43	17,79
TOTAL		358,26	79,26

5.1.1 - Clima

De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região é tropical de altitude do tipo Cwa.

A precipitação média anual na BHL D oscila entre 1200 a 1800 mm. A estação seca é bastante rigorosa e se estende aproximadamente de maio a setembro. A estação chuvosa vai de outubro a abril e apresenta maior pluviosidade no verão (dezembro a março), quando se concentram mais de 80% do total anual de chuvas.

Inseridas e próximas à BHL D existem sete estações pluviométricas, das quais seis são operadas pela Companhia de Saneamento do Distrito Federal (CAESB) e uma operada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), esta última sob responsabilidade da Agência Nacional de Água (ANA). Na Tabela 5 são expostas as informações básicas de localização das estações. A disposição das estações é apresentada na Figura 10.

Tabela 5 - Informações básicas sobre as estações pluviométricas.

Código	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)
1548007	ETA Brazlândia	15° 41' 3"	48° 12' 27"	1098
1548000	Brazlândia Quadra 18	15° 40' 16"	48° 13' 19"	1106
1548008	Descoberto	15° 46' 49"	48° 13' 49"	1061
1548006	Taguatinga ETA RD	15° 47' 23"	48° 06' 46"	1269
1548009	Jatobazinho	15° 42' 43"	48° 5' 33"	1205
1548013	Fazenda Santa Elisa	15° 35' 48"	48° 2' 35"	1205
1547018	Jockey Club	15° 48' 21"	47° 59' 53"	1103

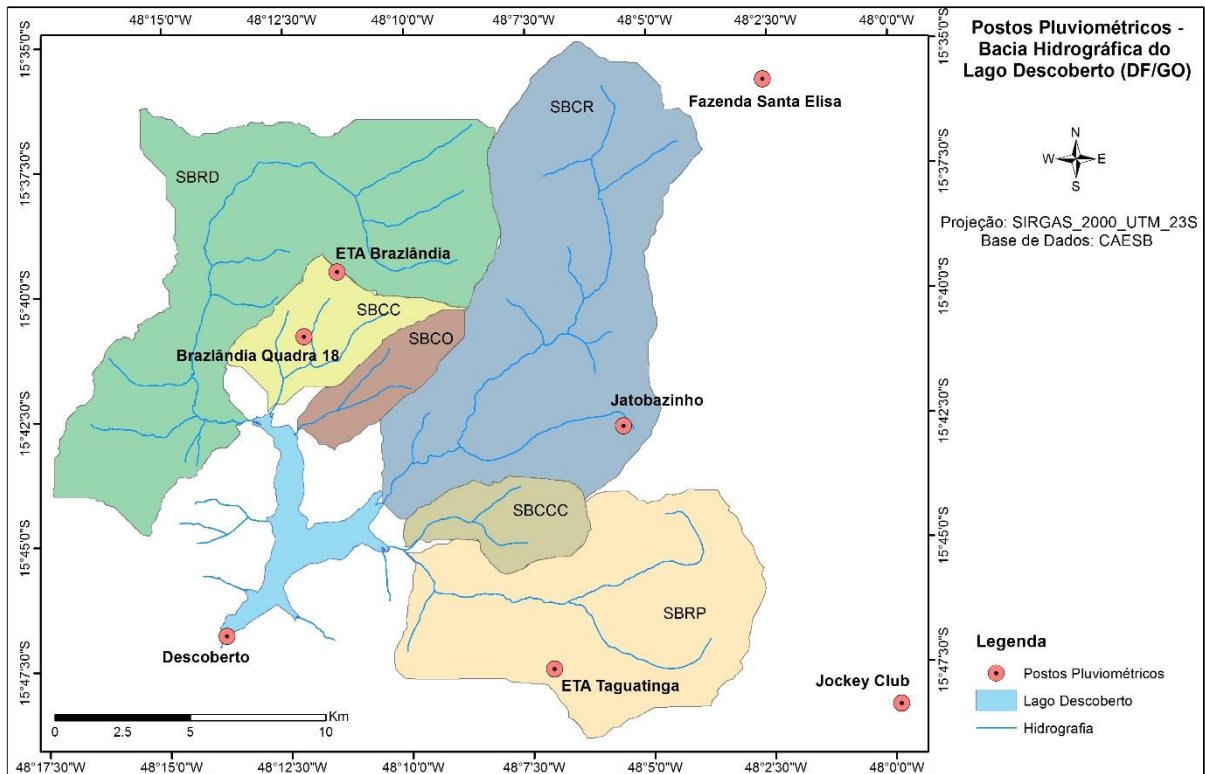


Figura 10 - Disposição dos postos pluviométricos inseridos e próximos as sub-bacias de estudo.

A disponibilidade dos dados de precipitação varia no tempo de acordo com a estação, atualmente apenas 4 estações ainda estão em operação. Na Figura 11 é possível observar a espacialização no tempo da disponibilidade dos dados de precipitação de cada estação analisada. Vale ressaltar que as séries históricas analisadas apresentaram falhas nas informações em períodos diários, mensais e até anuais, que não estão visíveis neste gráfico.

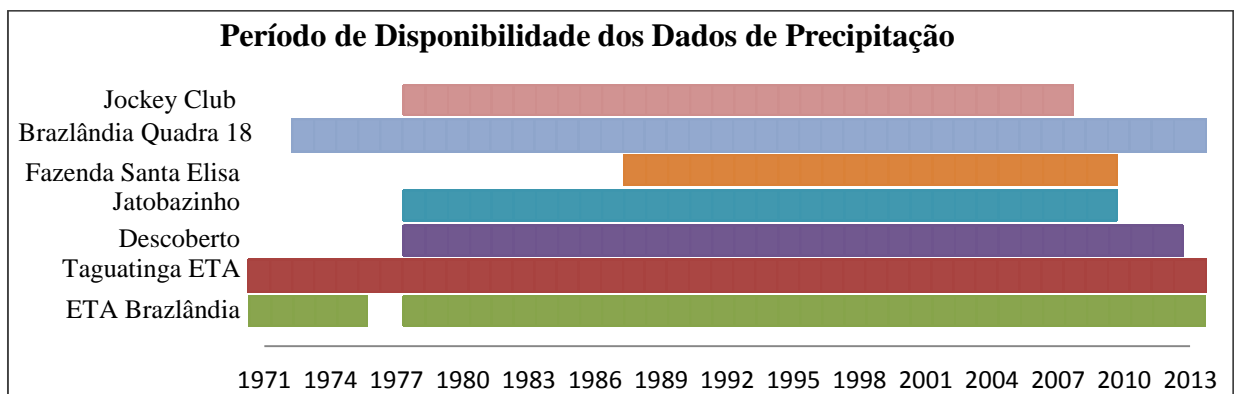


Figura 11 - Espacialização da disponibilidade de dados de precipitação das estações pluviométricas no tempo.

A chuva na BHL D é caracterizada por uma grande aleatoriedade espacial, possível de ser observada nas Figura 12 e Figura 13, que demonstram a dinâmica da precipitação

média mensal das estações e a precipitação média anual, respectivamente. Para a análise foi considerada uma série histórica de 42 anos.

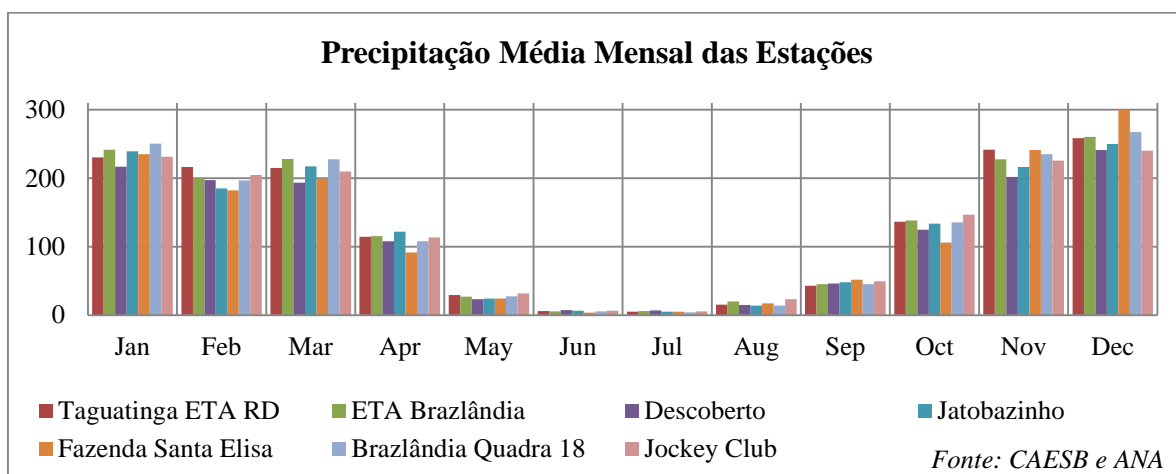


Figura 12 - Precipitação média mensal das estações pluviométricas (1971-2013).

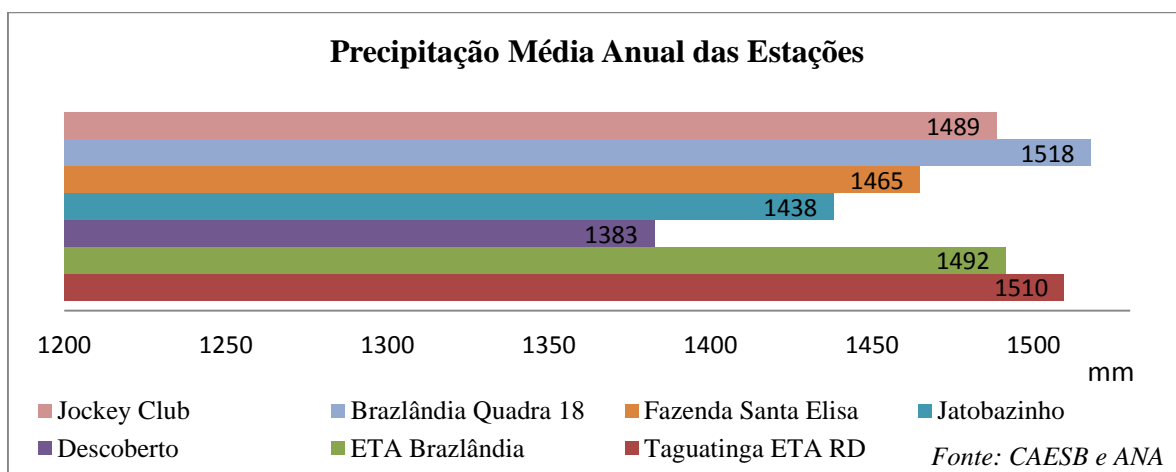


Figura 13 - Precipitação média anual das estações (1971-2013).

É possível observar diferenças significativas em relação à altura precipitada de cada posto pluviométrico, chegando a 135 mm de diferença na precipitação média anual quando comparadas as estações Brazlândia Quadra 18 e Descoberto, que estão localizadas a uma distância de 14 km uma da outra.

Em relação às diferenças observadas na distribuição da chuva mensal, no mês de dezembro por exemplo, a variação encontrada alcança 60 mm entre as chuvas captadas pelas estações da fazenda Santa Elisa e do Jockey Club, localizadas a uma distância de aproximadamente 23 km.

A área referenciada à estação de Brazlândia Quadra 18 apresenta maior média anual de precipitação. O contrário acontece na área de influência da estação Descoberto, a jusante da bacia hidrográfica do Lago Descoberto.

O método de polígonos de Thiessen foi utilizado para definir a área de influência de cada posto pluviométrico dentro da bacia hidrográfica, considerando a não uniformidade dos postos na área.

A estimativa da precipitação média nas sub-bacias de estudo foi feita após o cálculo da área de influência de cada posto pluviométrico em cada sub-bacia. A precipitação média diária foi estimada com base na série histórica disponível.

A Figura 14 mostra as áreas de influência de cada estação pluviométrica sobre as sub-bacias pelo método dos polígonos de Thiessen. Na Tabela 6 são apresentados os valores das áreas de influência de cada posto pluviométrico em cada sub-bacia.

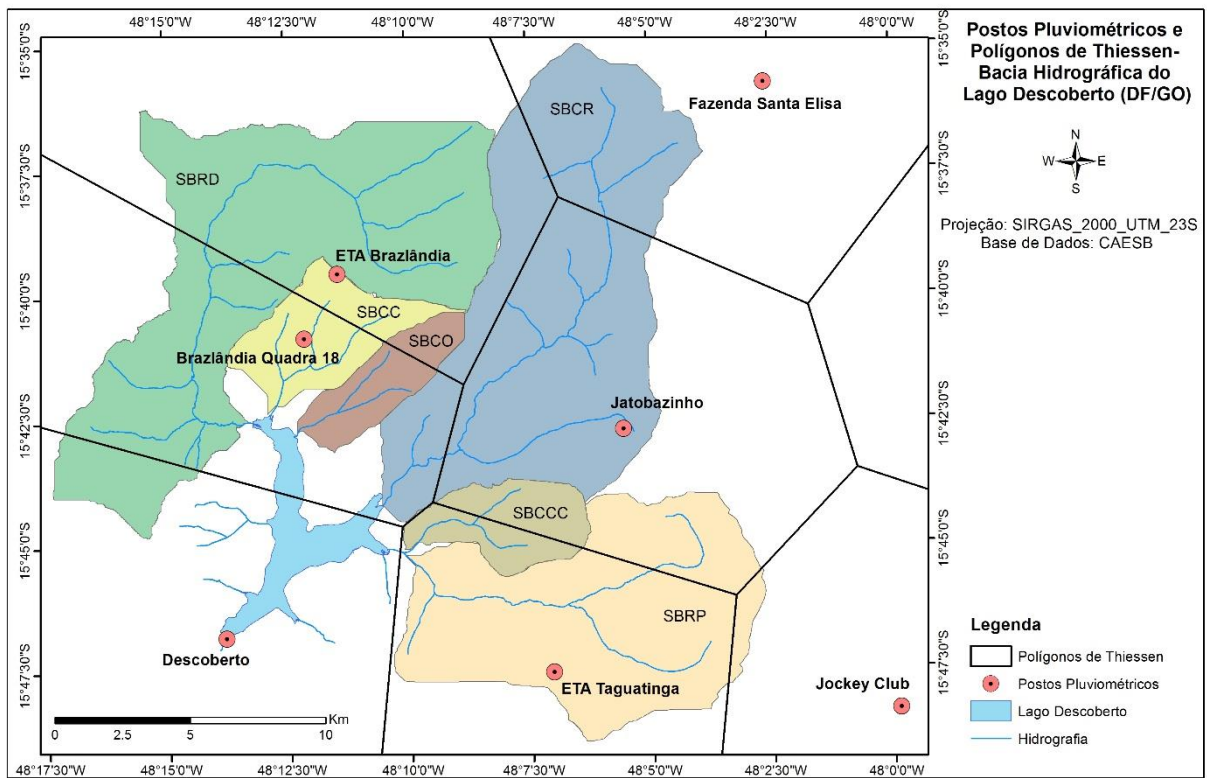


Figura 14 - Polígonos de Thiessen na BHL.D.

Tabela 6 - Área de influência das estações pluviométricas em cada sub-bacia de estudo.

Sub-Bacia	Área de Influência (km ²)						
	ETA Braz.	Braz. Q. 18	Descob.	Taguat.	Jatobaz.	Faz. Sta Elisa	Jockey
BHLD	58,2	103,4	63,13	82,5	23,4	88,91	2,1
SBRD	68,38	35,27	10,55	-	-	-	-
SBCC	6,89	13,48	-	-	-	-	-
SBCO	3,52	9,52	-	-	-	-	-
SBCR	14,5	10,81	-	-	60,16	29,23	-
SBCCC	-	-	-	8,14	8,36	-	-
SBRP	-	-	-	62,23	16,03	-	2,59

A Figura 15 apresenta a precipitação média mensal na BHLD, juntamente com a média mensal de precipitação de cada sub-bacia de estudo, com base na influência da pluviosidade medida em cada estação pluviométrica e calculada pelo método de polígonos de Thiessen.

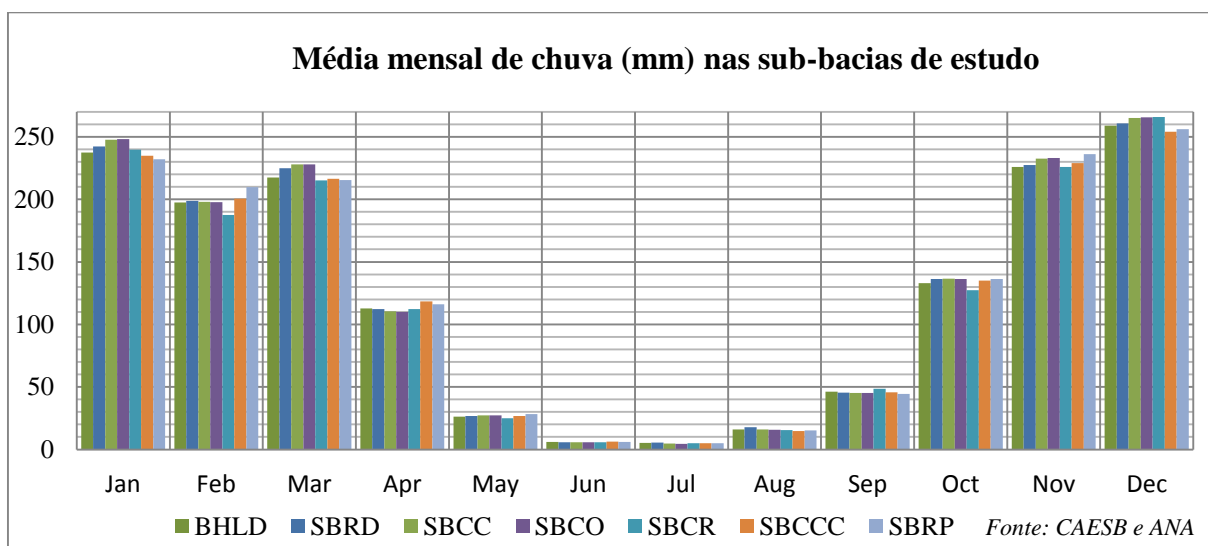


Figura 15 - Precipitação média mensal na BHLD e nas sub-bacias de estudo de acordo com a influência da pluviosidade medida em cada estação pluviométrica (1971-2013) e calculada pelos polígonos de Thiessen.

Para a avaliação das séries históricas climáticas referentes às temperaturas máximas e mínimas, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar, foram extraídos dados da estação Brasília. Essa estação de código 83377 é operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e seus dados são disponibilizados por meio do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). O banco abriga dados meteorológicos horários, diários e mensais em forma digital, referentes às medições feitas de acordo com as normas técnicas internacionais da Organização Meteorológica Mundial.

A análise da temperatura média mensal ao longo da série histórica de 42 anos é mostrada na Figura 16.

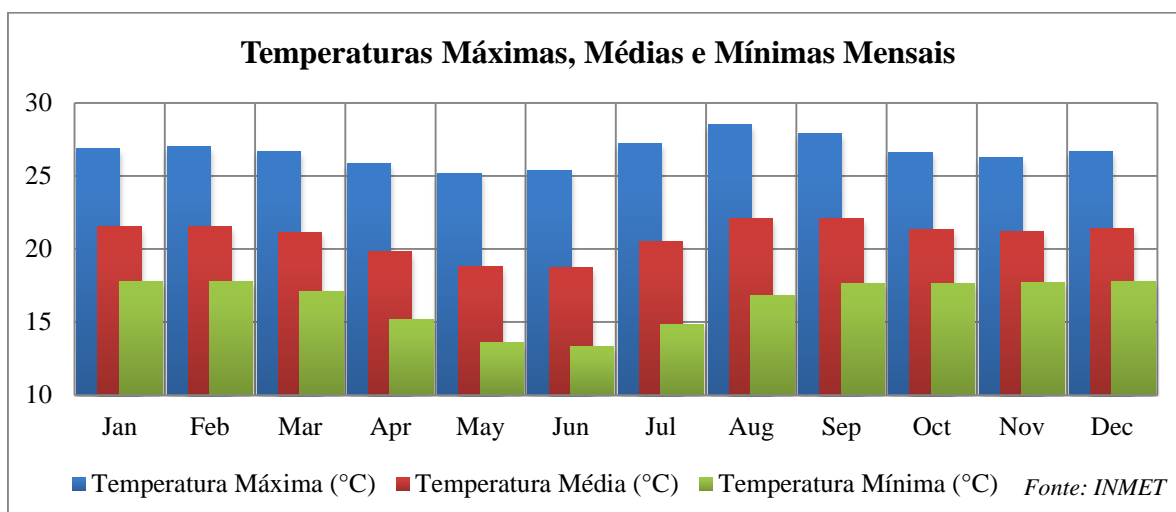


Figura 16 - Temperaturas máximas, médias e mínimas mensais referentes à série histórica disponível de 1962 a 2013.

De acordo com os dados históricos, os maiores picos de temperatura diária, que chegaram a 35,8 °C, ocorrem no mês de outubro. Porém, conforme mostra o gráfico acima, a média mensal da temperatura máxima diária é maior nos meses de agosto e setembro, chegando a 28,5 °C e 27,9 °C, respectivamente.

Ainda, nota-se que a diferença entre a maior e a menor média da temperatura máxima, registradas nos meses de agosto e maio respectivamente, é de 3,3 °C.

Em relação à média mensal da temperatura mínima diária tem-se um comportamento regular descendente até o mês de junho e ascendente até dezembro. No mês de junho, a temperatura mínima é mais baixa em até 4,4 °C em comparação a temperatura mínima de toda a estação de verão.

Com base em toda série histórica, a média anual da temperatura máxima é de 26,68 °C, enquanto a média anual da temperatura mínima é de 16,42 °C. Entre essas oscilações diárias de temperatura, tem-se que a temperatura média anual é de 20,8 °C.

Na Figura 17 é mostrado o comportamento médio mensal da umidade relativa ao longo da série histórica analisada.

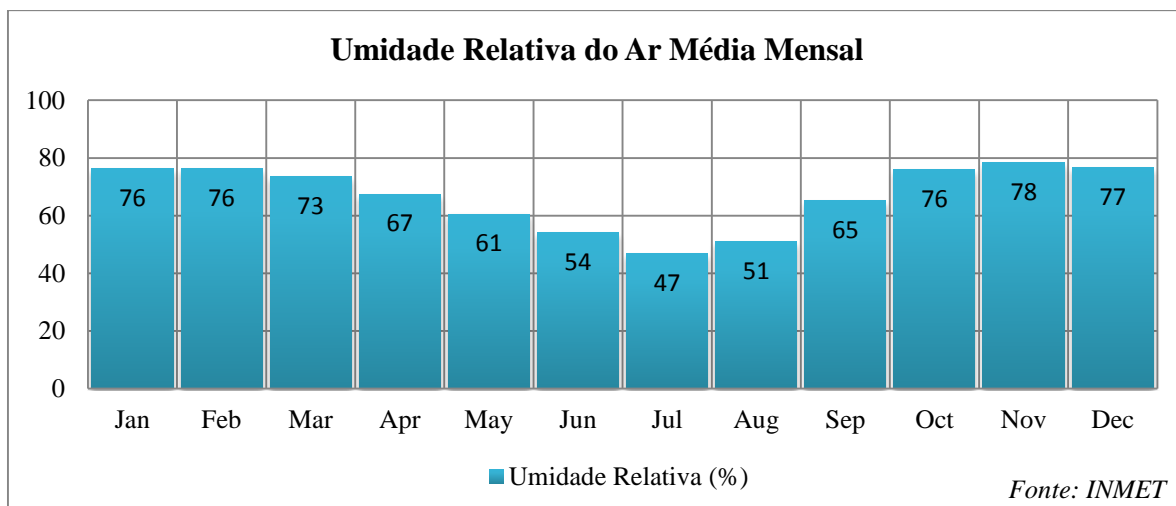


Figura 17 - Umidade relativa do ar média mensal referente à série histórica disponível de 1962 a 2013.

A umidade relativa média do ar (UR) é de aproximadamente 67%, porém pode chegar aos 15% ou menos no período de estiagem e não supera 80% em nenhum dos meses do ano. A UR apresenta média máxima de 76 a 78% nos meses de outubro a fevereiro, e chega à média mínima de 47% no mês de julho. Vale ressaltar que mesmo julho apresentando a menor média mensal, são nos meses de agosto e setembro que se registram os dias mais secos do ano, aproximando-se a 10% de umidade em diversos registros ao longo da série histórica.

5.1.2 - Tipos de solos

Os tipos de solos que predominam na região, correspondentes a aproximadamente 71% da área da BHL, são o LATOSSOLO VERMELHO (LV) (34,09%) e o LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO (LVA) (36,58%), que apesar de serem solos bem estruturados e com boa drenagem, quando se encontram desnudos, tornam-se altamente suscetíveis à erosão (EMBRAPA, 2006).

Aproximadamente 14% da área é representada por CAMBISSOLO (C), que ocupa as porções mais elevadas da paisagem, associadas a relevos mais movimentados. É um solo que apresenta um horizonte subsuperficial submetido a pouca alteração física e química, porém suficiente para o desenvolvimento de cor e estrutura. Geralmente apresenta minerais primários facilmente intemperizáveis e teores mais elevados de silte.

O GLEISSOLO HÁPLICO (GX), que perfaz 3,38% da bacia, caracteriza-se por ser um solo hidromórfico e ocupa, geralmente, as depressões da paisagem sujeitas à inundação. É um solo mineral hidromórfico, com séria restrição à percolação de água, encontrado em situações de alagamento temporário e, portanto, escoamento lento (Reatto *et al.*, 2003).

A bacia ainda apresenta 1,58% de GLEISSOLO MELÂNICO, 1,11% de PLINTOSSOLO, 0,5% de NEOSSOLO FLÚVICO, 0,24% NITOSSOLO HÁPLICO, 0,17% de NEOSSOLO QUARTZARÊNICO.

O mapa de solos utilizado no estudo foi disponibilizado pela Embrapa Cerrados (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). O mapa é resultado de um trabalho feito em conjunto com o Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, e foi desenvolvido em 2003 o levantamento de reconhecimento de solos de alta intensidade do alto curso do rio Descoberto, DF/GO em escala 1:50.000 (Reatto *et al.*, 2003) com base no levantamento feito em 1978 pela própria EMBRAPA (EMBRAPA, 1978). O mapa de solo das sub-bacias de estudo é apresentado na Figura 18. As respectivas áreas e percentagem de cada tipo de solo em cada sub-bacia são mostradas na Tabela 7.

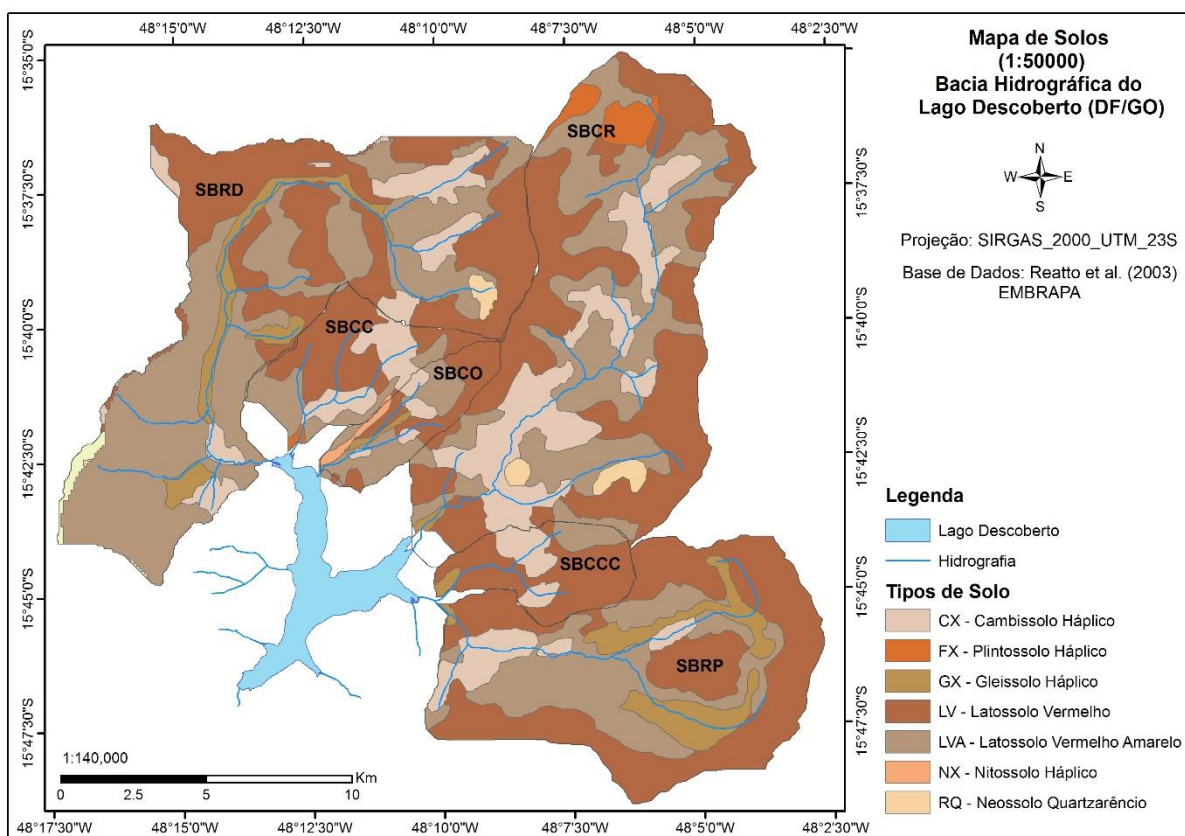


Figura 18 - Tipos de solos presente na bacia do lago Descoberto.

Tabela 7 - Áreas e respectivas porcentagens de cada tipo de solo em cada sub-bacia de estudo

Sub-Bacia	Tipos de Solo													
	LV		LVA		CX		NX		RQ		FX		GX	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
SBRD	41,7	36,4	55,4	48,4	9,1	8,0	-	-	0,9	0,8	-	-	7,3	6,4
SBCC	10,2	49,9	4,9	23,8	5,0	24,5	-	-	-	-	27,4	1,3	0,1	0,4
SBCO	5,0	37,9	5,5	41,5	1,5	11,4	0,1	0,7	0	0	68,1	5,8	0,4	3,4
SBCR	46,3	40,8	38,9	34,3	22,1	19,5	-	-	2,0	1,8	372,5	3,3	0,4	0,4
SBCCC	10,7	65,6	1,9	11,5	3,3	20,2	-	-	-	-	-	-	0,4	2,7
SBRP	41,7	51,9	22,9	28,5	6,0	7,4	-	-	-	-	-	-	9,8	12,2

5.1.3 - Relevo

O Modelo digital de elevação que representa o relevo de forma real e assegura a convergência do escoamento superficial para a rede de drenagem mapeada foi gerado a partir de curvas de nível espaçadas em 5 metros disponibilizadas pela TERRACAP (2009). A elaboração do DEM foi feita pelo ArcGIS 10.1, com base no uso da extensão 3D Analyst v. 1.0.

De forma subsequente ao DEM foi elaborado o mapa de declividade das sub-bacias, e de acordo com a classificação de Uberti *et al.* (1991) foram estabelecidas três classes de declividade: (1) de 0 a 8 %, incluindo as classes de relevo plano e suavemente ondulado; (2) de 8 a 20%, representando a classe de relevo ondulado; e (3) acima de 20%, reunindo as classes de relevo ondulado, fortemente ondulado, montanhoso e escarpado.

O mapa de declividade e as classes de relevo das sub-bacias estudadas são expostos na Figura 19. A superfície ocupada, em relação à área e porcentagem de cada classe em cada sub-bacia, é mostrada na Tabela 8.

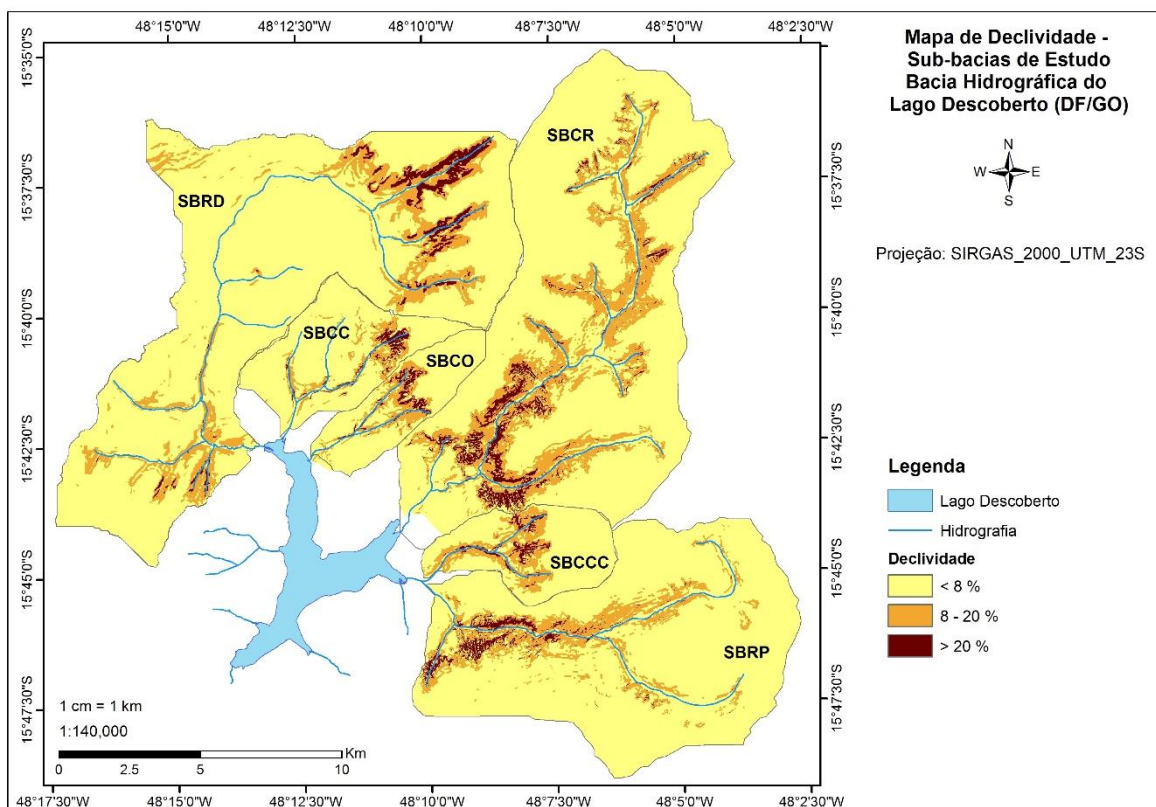


Figura 19 - Mapa de declividade da bacia do lago Descoberto.

Tabela 8 - Classes de declividade e respectivas áreas e porcentagens em cada sub-bacia de estudo

Sub-Bacia	Declividade					
	< 8 %		8 - 20 %		> 20 %	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
SBRD	96,28	84,14	14,89	13,02	3,25	2,84
SBCC	17,46	85,30	2,31	11,30	0,69	3,39
SBCO	10,29	77,57	2,28	17,17	0,70	5,26
SBCR	85,82	75,64	23,29	20,52	4,35	3,83
SBCCC	11,67	71,89	3,81	23,50	0,75	4,61
SBRP	68,72	85,44	9,92	12,33	1,80	2,23

5.1.4 - Uso do solo

A bacia do lago do Descoberto é uma área utilizada para abastecimento de água às populações urbanas do Distrito Federal e de produção de hortifrutigranjeiros originada a partir do Projeto Integrado de Colonização Alexandre de Gusmão - PICAG, que foi implantado pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária - INCRA na década de 1960, objetivando a fixação de agricultores não absorvidos pela mão de obra na

construção civil e a instalação de um cinturão verde nas proximidades das cidades satélites. Em 1983 foi criada pelo Decreto Federal nº 88.940 a Área de Proteção Ambiental da bacia do rio Descoberto-DF/GO (APA do Descoberto), abrangendo uma área de 39.100 hectares, com a finalidade de assegurar condições ecológicas satisfatórias aos mananciais (Brasil, 1983). Desse modo, a BHLD, além de áreas de proteção, caracteriza-se principalmente pelas atividades agrícolas onde são exploradas a agricultura e pecuária em pequenas propriedades rurais, resultando em diversos pontos de urbanização de baixa densidade (chácaras).

O mapa de uso do solo atual (2013) foi elaborado manualmente na escala de 1:3000 por meio do software de geoprocessamento ArcGIS 10.1. A confecção dos polígonos foi feita sobre a Ortofoto de abril de 2013, de resolução espacial de 24 cm e disponibilizada pela Terracap.

O mapa de uso e ocupação do solo das sub-bacias de estudo é apresentado na Figura 20. Na Tabela 9 a seguir, são expostas as áreas e os respectivos percentuais de ocupação de cada uso do solo em cada sub-bacia de estudo.

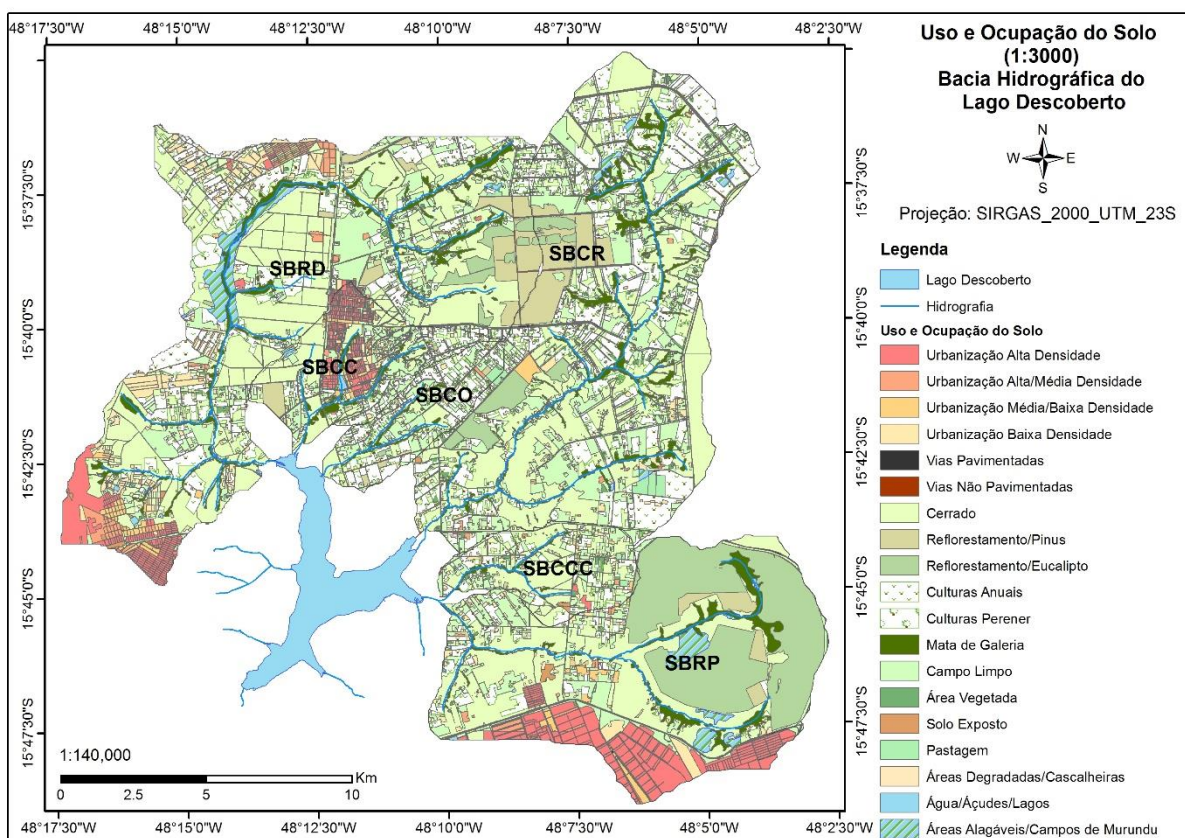


Figura 20 - Mapa de uso e ocupação do solo das sub-bacias em estudo desenvolvido para a presente modelagem.

Tabela 9 - Áreas e respectivos percentuais dos usos e ocupação do solo em cada sub-bacia de estudo

Sub-Bacia	Áreas Urbanas Alta Densidade		Áreas Urbanas Alta/Média Densidade		Áreas Urbanas Baixa/Média Densidade		Áreas Urbanas Baixa Densidade		Vias Pavimentadas	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
SBRD	483,9	4,2	192,7	1,7	168,5	1,5	629,8	5,5	44,6	0,4
SBCC	192,9	9,4	18,4	0,9	42,1	2,1	120,6	5,9	154,4	7,5
SBCO	-	-	5,4	0,4	5,6	0,4	78,8	5,9	6,7	0,5
SBCR	9,9	0,1	22,8	0,2	54,2	0,5	318,2	2,8	49,0	0,4
SBCCC	15,5	1,0	3,3	0,2	15,9	1,0	89,9	5,5	26,8	1,7
SBRP	943,3	11,7	74,3	0,9	114,0	1,4	239,0	3,0	196,9	2,5
Sub-Bacia	Vias Não Pavimentadas		Áreas Preservadas / Cerrado		Reflorestamento Pinus		Reflorestamento Eucalipto		Agricultura / Plantas Anuais / Olericultura	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%	ha	%	Ha	%
SBRD	306,3	2,7	4372,9	38,2	511,8	4,5	234,3	2,5	1871,0	16,4
SBCC	61,3	3,0	484,9	23,7	80,0	3,9	36,1	1,8	273,7	13,4
SBCO	32,5	2,5	206,1	15,5	8,2	0,6	29,9	2,3	446,5	33,7
SBCR	304,5	2,7	3638,2	32,1	542,4	4,8	380,7	3,4	2921,4	25,8
SBCCC	34,4	2,1	709,4	43,7	13,9	0,9	8,8	0,5	258,5	15,9
SBRP	62,0	0,8	2031,0	25,3	210,0	2,6	2457,7	30,6	341,7	4,3
Sub-Bacia	Agricultura / Plantas Perenes / Fruticultura		Mata de Galeria		Campo Limpo		Áreas Vegetadas / Vegetação Alterada		Solo Exposto	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%
SBRD	224,7	2,0	564,1	4,9	1398,4	12,2	81,0	0,7	33,5	0,3
SBCC	33,2	1,6	101,0	4,9	386,2	18,9	30,9	1,5	13,0	0,6
SBCO	114,8	8,7	45,4	3,4	304,7	23,0	22,4	1,7	-	-
SBCR	237,7	2,1	616,3	5,4	1937,6	17,1	146,6	1,3	3,8	-
SBCCC	82,8	5,1	52,0	3,2	250,7	15,4	34,7	2,1	12,7	0,8
SBRP	36,2	0,5	385,3	4,8	687,2	8,5	15,4	0,2	22,9	0,3
Sub-Bacia	Pastagem		Áreas Degradadas / Cascalheiras		Água / Pequenos Lagos / Açudes		Áreas Alagáveis / Campos de Murundu			
	Ha	%	Ha	%	Ha	%	ha	%		
SBRD	7,3	0,1	36,7	0,3	24,5	0,2	255,8	2,2		
SBCC	-	-	1,3	0,1	17,4	0,9	-	-		
SBCO	17,9	1,4	0,1	0,0	1,3	0,1	71,1	0,6		
SBCR	75,4	0,7	0,5	0,0	15,6	0,1	-	-		
SBCCC	11,5	0,7	-	-	2,9	0,2	-	-		
SBRP	1,4	0,0	6,3	0,1	9,2	0,1	209,3	2,6		

5.1.5 - Uso da água

As outorgas concedidas pela ADASA para uso de água superficial dentro das sub-bacias de estudo e que incluem captações de água para abastecimento, irrigação, criação de

animais, indústria e irrigação paisagística são apresentadas na Figura 18. Em seguida apresenta-se a Tabela 10 com as respectivas vazões outorgadas em cada ponto.

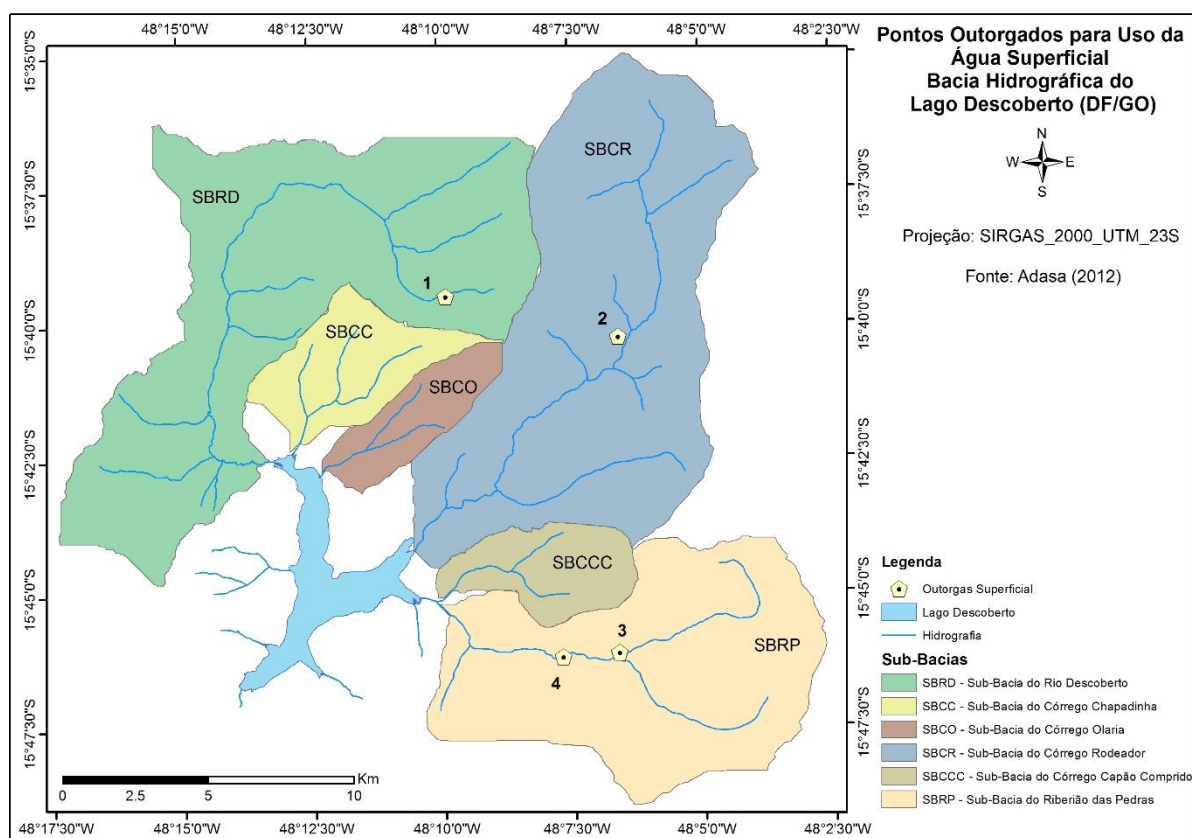


Figura 21 - Pontos de captação de água superficial e subterrânea outorgados na bacia do lago Descoberto.

Tabela 10 - Vazões de retirada de água superficial outorgada nas sub-bacias de estudo

Sub-Bacia	SBRD	SBCR	SBRP	SBRP	
Ponto	1	2	3	4	
Uso da Água (l/s)	Jan	106	500	0,5	2,78
	Fev	103	500	0,5	2,78
	Mar	104	500	0,5	2,78
	Abr	101	500	0,5	2,78
	Mai	78	500	0,5	2,78
	Jun	65	500	0,5	2,78
	Jul	49	500	0,5	2,78
	Ago	41	500	0,5	2,78
	Set	41	500	0,5	2,78
	Out	41	500	0,5	2,78
	Nov	56	500	0,5	2,78
	Dez	66	500	0,5	2,78

No ponto 1, na sub-bacia do rio Descoberto, a retirada de água é para abastecimento público, nesse caso para a cidade de Brazlândia com a outorga concedida à CAESB. No

ponto 2, na sub-bacia do córrego Rodeador, a outorga é referente a retirada de água para um canal de irrigação de aproximadamente 18 km presente na bacia, beneficiando 100 agricultores com aproximadamente até 5 l/s cada. A outorga desse ponto é de 1000 l/s, porém, segundo informações obtidas com a própria ADASA, são retirados apenas 500l/s em média durante o mês.

Nos pontos de retirada 3 e 4, na sub-bacia do Ribeirão das Pedras a outorga é concedida para abastecimento e retirada por caminhão pipa, respectivamente.

5.1.6 - **Dados Observados**

Os dados de vazão requeridos para a calibração e verificação foram disponibilizados pela CAESB. Todas as sub-bacias em estudo dispõem de estações fluviométrica de monitoramento diário próxima ao seu exutório. Além disso, a SBRD tem uma estação fluviométrica de monitoramento diário no córrego afluente Capão da Onça, o que possibilitou realizar a calibração e a verificação dessa sub-bacia em mais de um local. A disposição dos postos fluviométricos de medição diária ou mensal nas sub-bacias estudadas é mostrada na Figura 22.

No estudo, para calibração e verificação do modelo, foram consideradas apenas as estações fluviométricas de monitoramento diário.

Em relação aos sedimentos, apenas a sub-bacia do córrego Capão Comprido (SBCCC) apresenta valores observados de sedimentos em passos diários no ponto I da Figura 22. Esses valores foram obtidos em um estudo realizado no Programa de Pós Graduação em tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH) por Lopes (2010). Os dados de sedimentos são correspondentes ao ano hidrológico de 2008/2009 e a curva-chave de sedimentos foi desenvolvida com amostragens em intervalos de 15 minutos.

Todos os dados foram devidamente organizados para a análise de consistência e posterior análise de sensibilidade, calibração e verificação das simulações de acordo com as disponibilidades e os objetivos.

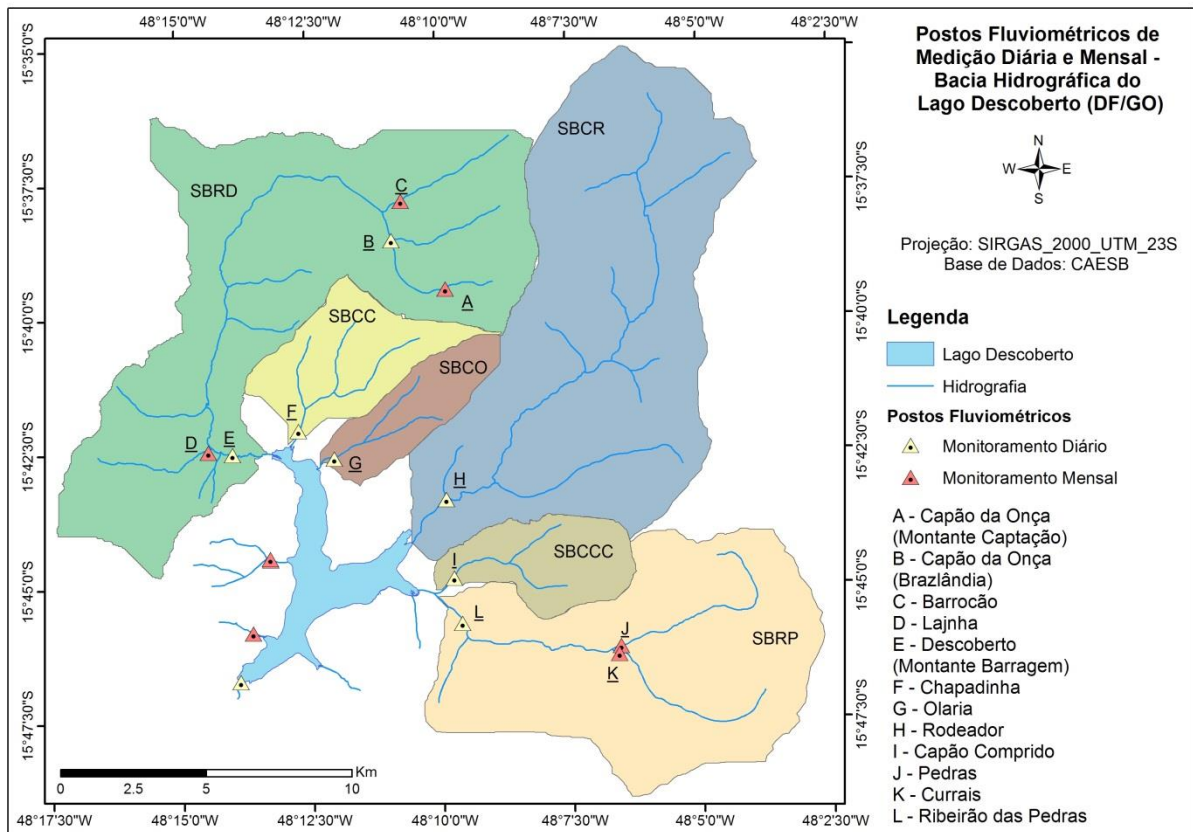


Figura 22 - Postos fluviométricos de medições diárias (pontos amarelos) e mensais (pontos vermelhos) na BHL.D.

5.1.7 - Sub-bacias e HRUs

No SWAT a bacia hidrográfica, nesse caso as sub-bacias estudadas, é dividida em sub-bacias de acordo com o relevo e com a rede de drenagem, e que podem ser subdivididas em Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs). As HRUs consistem em áreas homogêneas de uso do solo, tipos de solo e declividade.

Vale ressaltar, que não há interação entre as HRUs, apenas entre as sub-bacias. Ou seja, as cargas (escoamento, sedimentos, nutrientes, etc) não são transmitidas de uma HRU para outra dentro de cada sub-bacia. As cargas por HRU, são calculadas separadamente e depois somadas para determinar as cargas totais da sub-bacia, que a partir dessa são transpostas à sub-bacia seguinte. O benefício de trabalhar com as HRUs é o aumento da precisão que contribuem para a predição das cargas, em que a consideração da diversidade da cobertura vegetal, do crescimento e do desenvolvimento das espécies, pode tornar muito mais preciso o valor líquido das cargas de cada sub-bacia.

O modelo SWAT foi executado considerando todas as HRUs e sub-bacias. Essas divisões foram feitas e são apresentadas na Figura 23 e na Tabela 11.

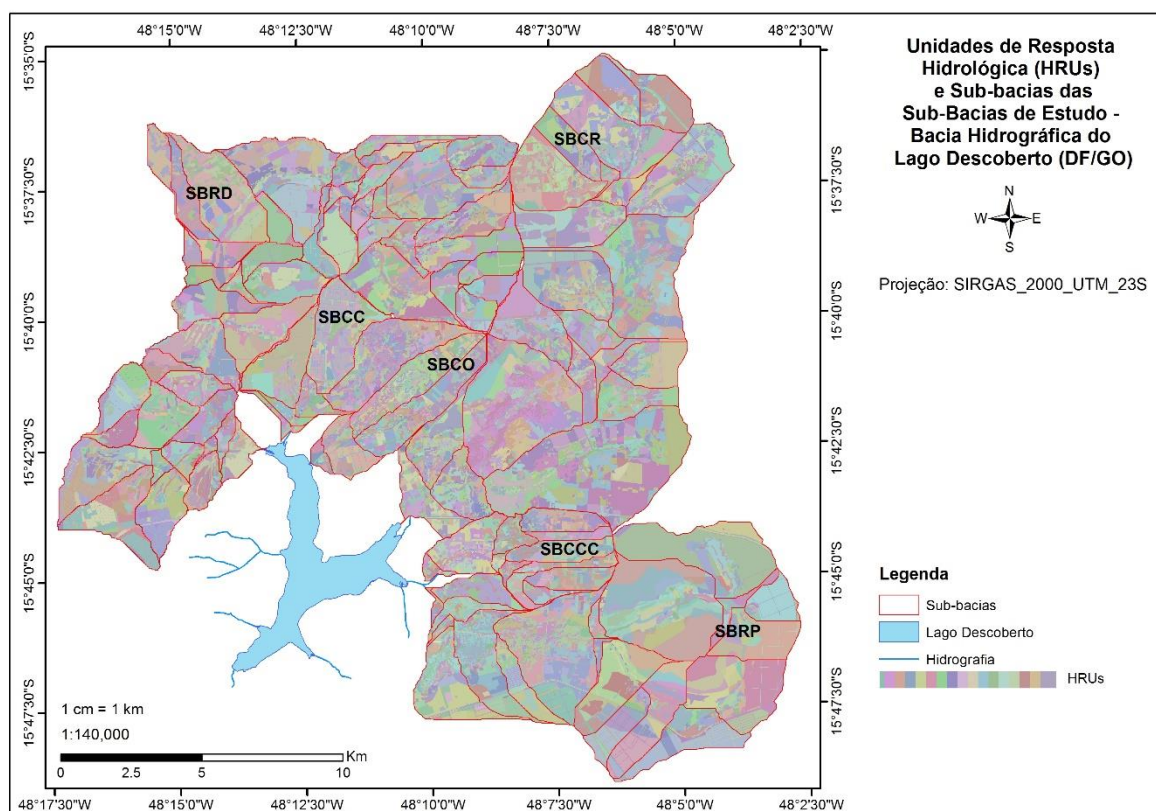


Figura 23 – Sub-bacias de drenagem e Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) das sub-bacias estudadas.

Tabela 11 – Número de sub-bacias de drenagem e de Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) nas sub-bacias estudadas.

Sub-bacias	Sub-Bacias de Drenagem	HRUs
SBRD	52	1435
SBCC	6	334
SBCO	4	311
SBCR	23	1277
SBCCC	12	426
SBRP	20	718

5.2 - AVALIAÇÃO DA MODELAGEM INICIAL NA SBRD

A SBRD foi selecionada para o estudo inicial e para a análise de sensibilidade e calibração por alguns fatores que a destacaram, sendo eles: apresentar mais de uma ponto de monitoramento diário de vazão; apresentar todos os tipos de solo, uso do solo e

declividade; ser uma das principais sub-bacias contribuintes do lago Descoberto; e por ser a sub-bacia de maior área de drenagem.

As demais sub-bacias foram consideradas similares a partir da análise de suas características, em que áreas de solo e relevo relativas a cada área das sub-bacias são similares. Apenas as áreas de uso do solo relativas não são similares nas sub-bacias, em que é possível observar a presença relevante de diferentes usos de solo em cada sub-bacia, mas, todas sub-bacias apresentam a mesma característica de uso de solo, em função de estarem incluídas no mesmo programa de colonização (PICAG) e na área da APA do Descoberto.

Como um primeiro passo e anteriormente à análise de sensibilidade e à calibração propriamente dita, fez-se a comparação gráfica das vazões observadas e simuladas na sub-bacia do rio Descoberto (SBRD) nos anos hidrológicos do período de 2005-2010 (Figura 24). Computou-se também o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e o coeficiente de determinação (R^2) (Figura 25).

Essa avaliação do comportamento inicial do modelo SWAT foi feita com o intuito de auxiliar na interpretação do sistema hidrológico modelado, apoiando assim a seleção dos parâmetros de modo a minimizar as falhas e categorizar as melhorias que exigiam ser feitas.

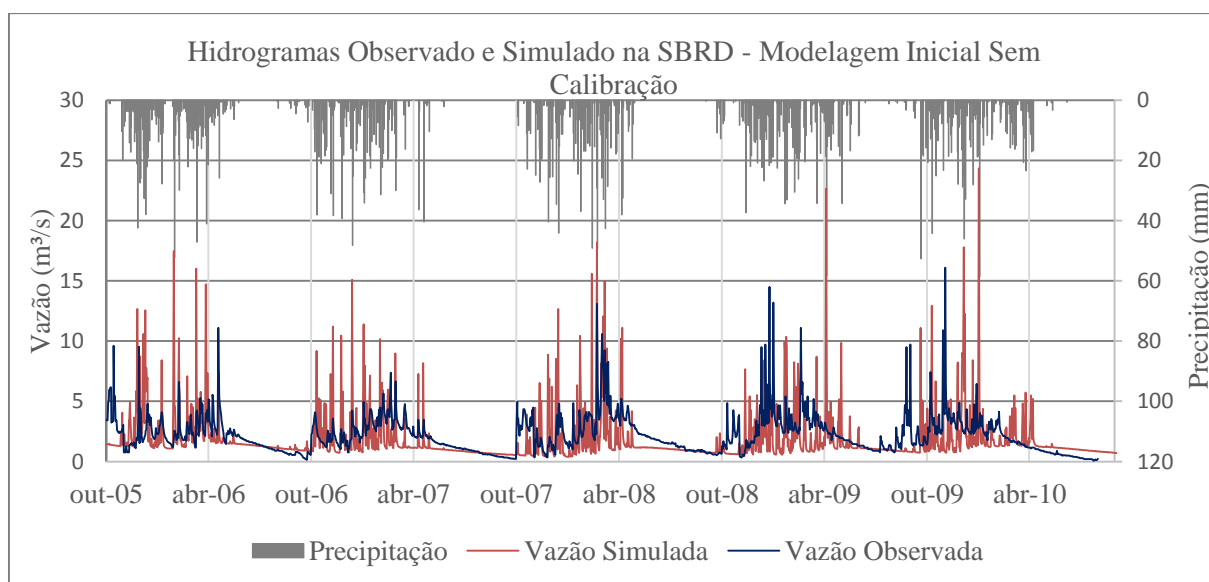


Figura 24 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado (sem calibração) da SBRD para os anos hidrológicos correspondentes ao período de 2005 a 2010.

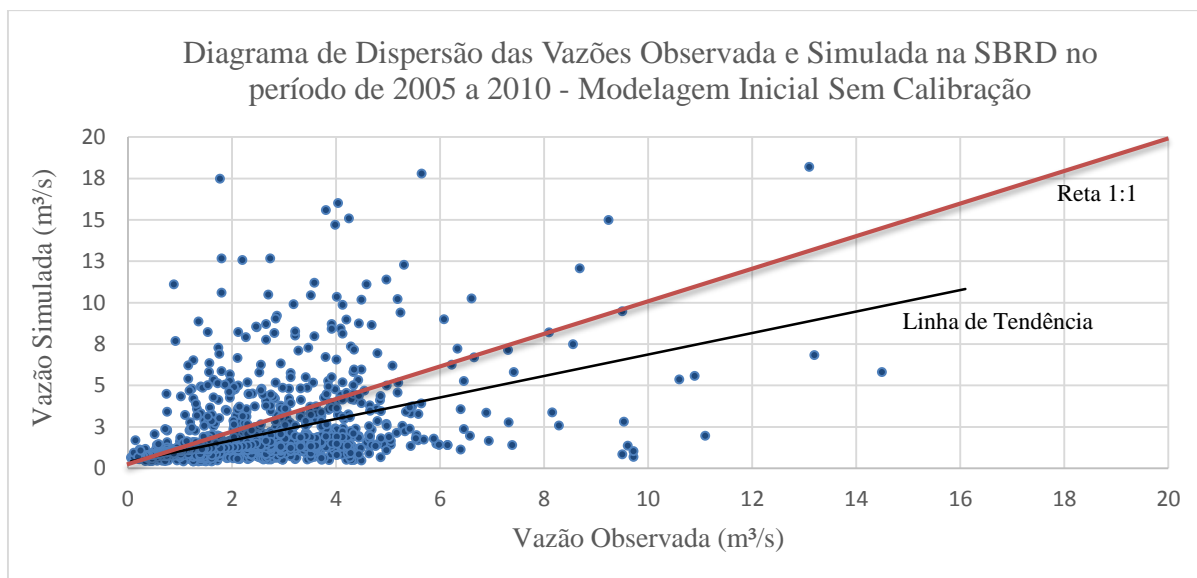


Figura 25 - Diagrama de dispersão das vazões observada (x) e simulada (y) inicialmente pelo modelo SWAT.

Inicialmente, para a série histórica, a simulação da vazão diária na SBRD não se mostrou capaz de representar satisfatoriamente a vazão observada no mesmo período. É possível observar que os picos foram superestimados, e o fluxo de base durante o período de chuva subestimado e durante o período de estiagem mantido praticamente constante.

Em relação às análises estatísticas do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) e do coeficiente de determinação (R^2), Green e Griesven (2008) consideram que, para uma calibração com dados diários, valores de NSE superiores a 0,4 e R^2 superiores a 0,5 são satisfatórios para a simulação. Santhi *et al.* (2001) e Van Liew *et al.* (2003) também consideram que valores maiores que 0,5 são aceitáveis. Segundo Moriasi *et al.* (2007), para a calibração mensal, valores de NSE acima de 0,5 são considerados satisfatórios, acima de 0,65 bons, e superiores a 0,75 muito bons.

As respostas de Nash-Sutcliffe e R^2 , respectivamente de -0,57 e 0,24 mostram estatisticamente que os resultados simulados pelo modelo foram pouco favoráveis, sendo esses valores, considerados insatisfatórios para a modelagem.

Além disso, observando a dispersão dos valores medidos e simulados, mostrada na Figura 25, é possível inferir que a simulação do fluxo durante as condições de vazão baixa e até, aproximadamente, 4,5 m^3/s foi expressivamente subestimada. Isso é evidenciado pelo distanciamento da linha de tendência e da reta $x=y$ (1:1) ocasionado pela maior dispersão dos pontos abaixo dessa reta nesse intervalo.

Desse modo, verificou-se a necessidade de realizar a calibração de alguns parâmetros para a obtenção de um melhor ajuste entre os valores de vazão observados e

simulados pelo modelo SWAT. Previamente realizou-se a seleção dos parâmetros de forma a obter um progresso na diminuição dessas falhas. Posteriormente se fez a análise de sensibilidade para determinar a taxa de mudança na vazão simulada ao que diz respeito às alterações nos parâmetros definidos.

5.3 - SELEÇÃO DOS PARÂMETROS E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

O primeiro passo para o processo de calibração e verificação do modelo SWAT é a determinação dos parâmetros mais sensíveis para uma bacia hidrográfica (Arnold *et al.*, 2012a).

Existem dois tipos de parâmetros: parâmetros físicos e parâmetros de processo. Os parâmetros físicos representam as propriedades físicas da bacia hidrográfica e são usualmente mensuráveis, tais como a área da bacia, a fração impermeável, a declividade, entre outros. Os parâmetros de processo representam as características da bacia que normalmente não são medidas, tais como a profundidade média da capacidade de armazenamento de água no solo, a taxa efetiva do interfluxo lateral, o coeficiente de não-linearidade da taxa de controle da velocidade de percolação para o armazenamento de águas subterrâneas, etc. (Sorooshian & Gupta, 1995).

Existem, porém, alguns parâmetros físicos, como a condutividade hidráulica e a porosidade, que são mensuráveis em teoria, mas de difícil medição na prática (Pechlivanidis *et al.*, 2011), e por isso tendem a ser calibrados. Além disso, os valores eventualmente medidos podem não ser representativos na escala da modelagem.

Segundo Arnold *et al.* (2012a), o usuário deve determinar quais parâmetros ajustar com base em opinião especializada e/ou na análise de sensibilidade.

Arnold *et al.* (2012a), reunindo 64 estudos de maior representatividade mundial com o SWAT, indicaram os parâmetros mais utilizados no processo de calibração. Em relação ao escoamento superficial são: CN2, AWC, ESCO, SURLAG, EPCO e OV_N; e em relação ao fluxo de base são: ALPHA_BF, GW_DELAY, GW_REVAP, RCHARG_DP, GWQMN e o REVAPMN. Ambos os grupos de parâmetros são aqui apresentados em ordem decrescente de importância e frequência nos processos de calibração analisados.

Previamente a análise de sensibilidade foi realizada com os 27 parâmetros de influência na simulação da vazão, recomendados por Arnold *et al.*, (2007). Porém, quando

comparados os hidrogramas observado e simulado obtiveram-se resultados visualmente inadequados e insatisfatórios.

Com base nesses e outros estudos, além das experiências com os problemas e dificuldades que vinham sendo identificadas em trabalhos anteriores com o SWAT na sub-bacia do córrego Capão Comprido (Ferrigo, 2011; Ferrigo *et al.*, 2011; Ferrigo *et al.*, 2012; Ferrigo *et al.*, 2013), foram selecionados 14 parâmetros determinados como relevantes para a diminuição dos erros na modelagem, de forma a resultar em uma melhoria na proximidade dos valores simulados em relação aos valores observados de vazão. A delimitação dos intervalos foi determinada de acordo com a avaliação da variação fisicamente possível de cada parâmetro, quando disponível e retratado na literatura (Tabela 12).

A análise de sensibilidade foi realizada com o intuito de buscar compreender melhor o sistema modelado, identificando quais parâmetros de entrada apresentam maior efeito sobre as respostas do modelo e, de certa forma, indicando quais parâmetros merecem a maior atenção no processo de calibração.

A análise foi obtida após 140 interações entre os parâmetros, dentro de cada intervalo limitado de acordo com a Tabela 12.

No método de multiplicação, um valor positivo no intervalo, por exemplo 0,2, indica que o parâmetro será aumentado em até 20%, entretanto, um valor negativo, por exemplo, -0,3 indica que o parâmetro poderá ser diminuído em até 30%. Vale ressaltar, também, o exemplo da condutividade hidráulica do solo, SOL_K, em que o intervalo de -1,95 e 0,8, indica que o valor do parâmetro poderá ser diminuído em 195% e aumentado em até 80%.

Como um primeiro passo, a *análise de sensibilidade global* foi conduzida apenas para a sub-bacia do rio Descoberto (SBRD), de modo a identificar e quantificar a sensibilidade dos parâmetros para subsequente calibração da mesma. A análise de sensibilidade foi realizada por meio do software SWAT-CUP para os anos hidrológicos do período 2005-2010.

A *análise de sensibilidade individual* foi conduzida de forma a se obter graficamente a influência dos parâmetros mais sensíveis na função objetivo de Nash-Sutcliffe.

Tabela 12 - Características dos parâmetros utilizados na Análise de Sensibilidade da Sub-bacia do Rio Descoberto (SBRD).

Parâmetro	Descrição	Unidade	Valores Iniciais	Método	Intervalo	
					Mínimo	Máximo
CN2	Curva número na condição II	adim*	50 (média)	x	-0,3	0,2
ALPHA_BF	Constante de recessão do fluxo de base	dias	0.0048	=	0	1
GW_DELAY	Tempo de retardo da água subterrânea	dias	31	+	-20	450
GWQMN	Limiar da profundidade da água no aquífero superficial necessária para o fluxo de retorno ocorrer	mm	0	=	0	1228
GW_REVAP	Coefficiente "revap" de água subterrânea	adim	0,02	=	0,02	0,1
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo	adim	0,95	=	0,4	1
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo	mm/mm	0,12 (média)	x	-0,2	0,5
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo	mm/h	932 (média)	x	-1,95	0,8
SOL_BD	Densidade aparente do solo	[g/cm ³]	0,95 (média)	x	-0,93	-0,6
SHALLST	Altura inicial da água no aquífero raso	mm	1000	=	1000	5000
GWHT	Altura inicial da água subterrânea	mm	12	=	0	25
DEEPST	Altura inicial da água no aquífero profundo	mm	2000	=	0	3000
REVAPMN	Profundidade em aquífero profundo para que aconteça o "revap"	mm	1	=	0	500
ANION_EXCL	Fração de porosidade (espaços vazios) a partir da qual os ânions são excluídos.	adim	0,5	=	0,1	1

*adim: adimensional; x: multiplicar; =: igualar; +: adicionar.

O resultado da análise de sensibilidade global da SBRD é apresentado na Figura 26.

O *t-stat* indica o grau da sensibilidade, em que quanto maior for o seu valor absoluto mais sensível é o parâmetro (Abbaspour *et al.*, 2011). Nesse caso é possível observar que os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade foram o SOL_K, CN2, SOL_AWC, SHALLST, e o ANION_EXCL, seguido do REVAPMN, ESCO, ALPHA_BF, SOL_BD, DEEPST, GW_REVAP, GWHT, GWQMN E GW_DELAY.

O valor de P (*P-Value*) determina a significância da sensibilidade dos parâmetros, em que valores próximos de zero apresentam maior significância na modelagem específica

(Abbaspour *et al.*, 2011). Dessa maneira, o *ranking* dos parâmetros mais sensíveis encontrado pelo *t-Stat* foi o mesmo para a significância da sensibilidade de cada parâmetro, e o SOL_K, CN2, SOL_AWC, SHALLST e ANION_EXCL foram os cinco parâmetros de maior relevância em termos de sensibilidade.

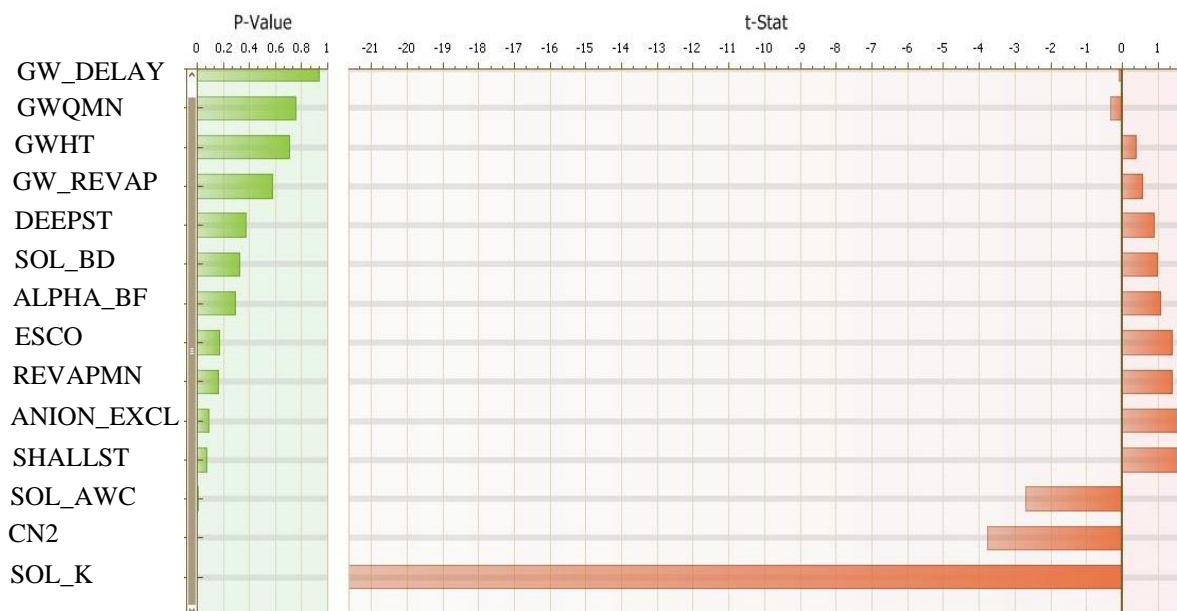


Figura 26 - Resultado da análise de sensibilidade global da SBRD ranqueando os parâmetros mais sensíveis em ordem crescente.

Na Tabela 13 são apresentados os valores de *t-Stat* e *P-Value* obtidos durante a análise de sensibilidade global da SBRD.

Tabela 13 - Valores de *t-Stat* e *P-Value* obtidos durante a análise de sensibilidade global da SBRD

Parâmetros	t-Stat	P-Value
SOL_K	-21,628	0,0000
CN2	-3,761	0,0003
SOL_AWC	-2,697	0,0079
SHALLST	1,781	0,0772
ANION_EXCL	1,716	0,0886
REVAPMN	1,396	0,1650
ESCO	1,386	0,1680
ALPHA_BF	1,062	0,2902
SOL_BD	0,987	0,3252
DEEPST	0,897	0,3711
GW_REVAP	0,561	0,5754
GWHT	0,374	0,7090
GWQMN	-0,313	0,7545
GW_DELAY	-0,079	0,9367

Com o intuito de observar graficamente os impactos das alterações feitas nos quatro parâmetros de maior sensibilidade e significância na função objetivo, apresenta-se a Figura 27 com a distribuição do valor do parâmetro atribuído (eixo x) e respectiva resposta na função objetivo Nash-Sutcliffe (eixo y), obtidas pela análise de sensibilidade individual.

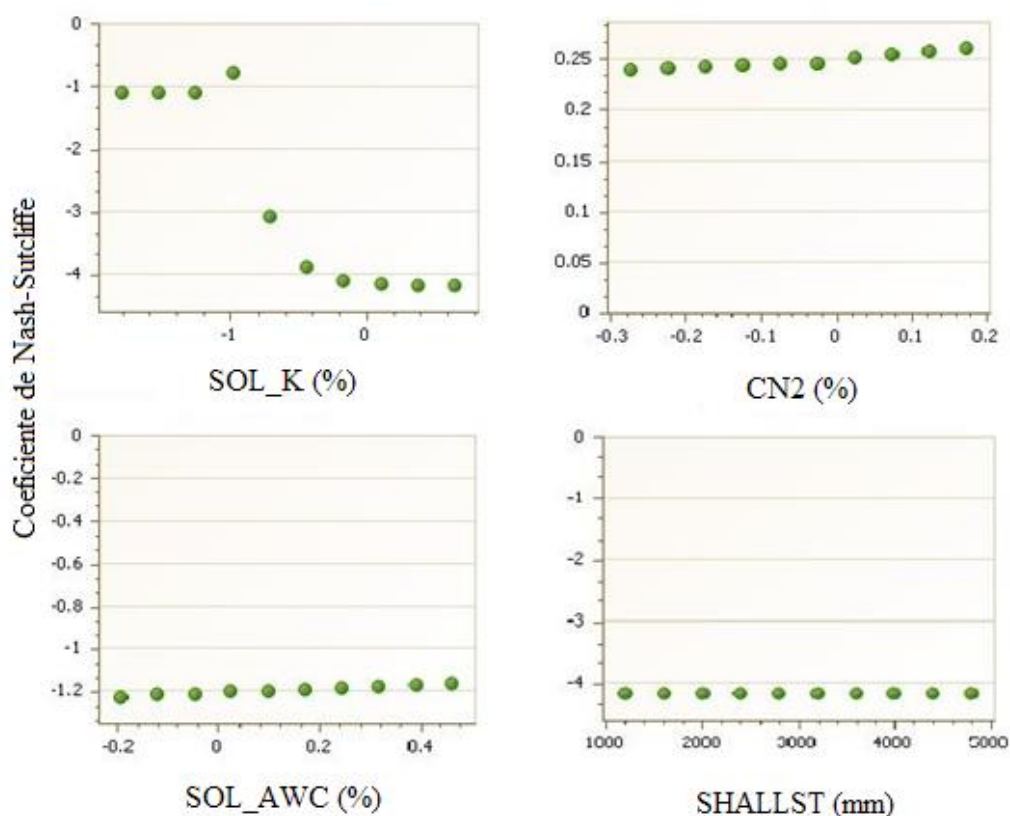


Figura 27 - Distribuição da relação do valor atribuído ao parâmetro (eixo x) versus a referente resposta no valor da função objetivo de Nash e Sutcliffe (eixo y).

É possível notar o comportamento da relação do valor atribuído ao parâmetro com o efeito na resposta da função objetivo, sendo isso considerado a sensibilidade do modelo ao parâmetro. Um parâmetro “sensível”, como o SOL_K, exibe uma grande variação nessa resposta, como pode ser observado. Para um parâmetro menos “sensível” esse retorno é menos expressivo. Como nessa análise não é levada em consideração a interdependência dos parâmetros avaliados em relação a outros, pelo motivo dos demais parâmetros serem mantidos constantes, apenas foi realizada com o intuito de verificar qualitativamente a importância do parâmetro na resposta da função objetivo.

Tabela 14 estão listados alguns dos trabalhos com o SWAT, nas diversas regiões brasileiras, que apresentaram avaliação da análise de sensibilidade.

Tabela 14 - Avaliação da sensibilidade dos parâmetros em estudos brasileiros.

Autor(es)	Posição dos parâmetros mais sensíveis na modelagem					Região	
	1	2	3	4	5		
Baldissera (2005)	ALPHA_BF	GWQMN	GW_REVAP	REVAPMN	CN2	Centro-Oeste	
Sarmento (2010)	CN2	SURLAG	RCHARG_DP	GWQMN	SOL_Z		
Strauch <i>et al.</i> (2010)	CN2	ALPHA_BF	CH_K2	ESCO	GW_DELAY		
Ferrigo (2011)	ESCO	ALPHA_BF	GW_DELAY	SOL_Z	CH_K2		
Ferrigo <i>et al.</i> (2012)	ALPHA_BF	CN2	GW_DELAY	GWQMN	GW_REVAP		
Salles (2012)	CN2	CH_K2	SURLAG	ALPHA_BF	ESCO		
Ferrigo <i>et al.</i> (2013)	SOL_AWC	GW_DELAY	GWHT	GW_REVAP	SOL_K		
	CN2	GW_REVAP	GW_DELAY	SOL_AWC	SOL_K		
	GW_REVAP	CN2	GW_DELAY	SOL_AWC	ALPHA_BF		
	GW_DELAY	SHALLST	GWQMN	GW_REVAP	SOL_K		
Castro (2013)	SURLAG	ALPHA_BF	CN2	GWQMN	SOL_K		
Herrera (2013)	SURLAG	CN2	CH_N2	CH_K2	ALPHA_BF		
Lopes (2008)	CN2	SURLAG	ESCO	SOL_K	SOL_Z		Sul
Lubitz (2009)	CANMX	CN2	ALPHA_BF	ESCO	SOL_K		
Paim & Menezes (2009)	ALPHA_BF	ESCO	SOL_Z	CANMX	SOL_AWC		
Lino (2009)	ALPHA_BF	CN2	ESCO	CANMX	SOL_AWC		
Garbossa <i>et al.</i> (2010)	ALPHA_BF	ESCO	CN2	REVAPMN	GWQMN		
Baltokoski <i>et al.</i> (2010)	CN2	SURLAG	ESCO	SOL_K	SOL_AWC		
Bonumá <i>et al.</i> (2010)	CN2	ESCO	ALPHA_BF	CH_K2	BLAI		
Bonumá (2011)	CN2	ESCO	ALPHA_BF	CH_K2	BLAI		
Bortolotto (2011)	CN2	ESCO	CANMX	REVAPMN	GW_REVAP		
Pacheco (2011)	SOL_AWC	CANMX	ESCO	BLAI	GWQMN		
Maluta (2012)	ALPHA_BF	ESCO	CN2	CANMX	BLAI		
Conceição <i>et al.</i> (2013)	ESCO	ALPHA_BF	GW_DELAY	GWQMN	SURLAG		
Adriolo <i>et al.</i> (2008)	SLOPE	SOL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K	Sudeste	
Durães (2010)	ESCO	ALPHA_BF	SOL_Z	GWQMN	GW_DELAY		
Rocha <i>et al.</i> (2010)	SOL_AWC	ESCO	SLOPE	SLSUBBSN	CN2		
Andrade (2011)	CN2	ALPHA_BF	RCHARG_DP	ESCO	SOL_Z		
Aguiar (2011)	SOL_K	CN2	GW_DELAY	GWQMN	SLOPE		
Lelis <i>et al.</i> (2012)	CN2	SLOPE	SOL_AWC	SOL_K	ESCO		
	SOL_AWC	SOL_Z	CN2	CANMX	ESCO		
	CANMX	SOL_AWC	SOL_Z	ESCO	EPCO		
	CN2	SOL_AWC	SLOPE	SOL_K	ESCO		
Melo Neto (2012)	ALPHA_BF	GWQMN	CN2	ESCO	SOL_AWC		
Pinto <i>et al.</i> (2013)	ALPHA_BF	CN2	SOL_K	GWQMN	SLOPE		
Aragão <i>et al.</i> (2013)	ALPHA_BF	CH_K2	CN2	SURLAG	SOL_Z	Nordeste	

Na Figura 28 são apresentados os parâmetros utilizados na análise de sensibilidade da SBRD e sua frequência de ocorrência em outros trabalhos na revisão feita anteriormente, nas posições 1, 2, 3, 4 e 5 do ranking de sensibilidade.

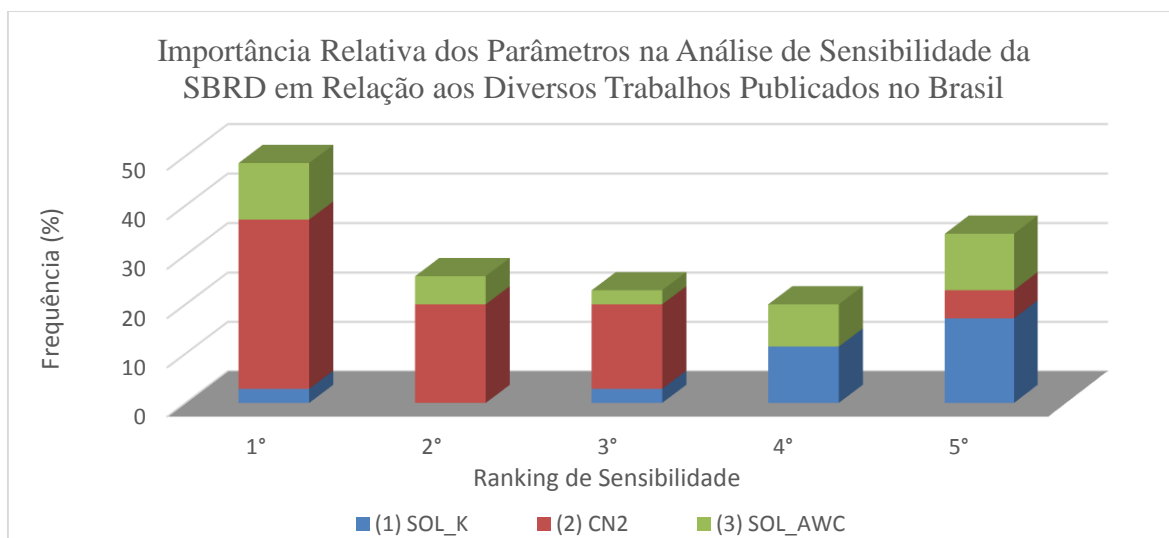


Figura 28 - Importância relativa dos parâmetros utilizados na análise de sensibilidade da SBRD em relação aos diversos trabalhos publicados no Brasil.

Constata-se assim que o parâmetro SOL_K, de maior sensibilidade no presente estudo, apresenta uma pequena frequência nas posições 1 e 3 dos rankings referentes a bibliografia, nula na posição 2, e de 12% e 18% nas posições 4 e 5 respectivamente. Somando, resulta-se em 7% de frequência do parâmetro entre as cinco posições no *ranking* levando em consideração todos os estudos analisados.

Segundo Neitsch *et al.* (2009) o SOL_K é um parâmetro necessário para calcular o tempo de percolação da água de uma dada camada do solo para uma camada inferior. O efeito desse parâmetro sobre o cálculo do escoamento superficial é pequeno e em geral o modelo é pouco sensível ao parâmetro.

A condutividade hidráulica saturada do solo (K_{sat}) se refere à taxa de fluxo de água do solo (densidade de fluxo), e é uma medida da facilidade da água se mover nas camadas do solo. De forma a analisar a abrangência do comportamento do SOL_K, apresenta-se na Tabela 15 o valor de K_{sat} em diversos materiais representativos no solo.

Tabela 15 - Condutividade hidráulica para diferentes materiais representativos (Adaptado de Távora, 2010 (Singhal e Gupta, 1999))

K_{sat} (ms^{-1})	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}	10^{-13}
	←		←		←		←		←		←		←	
	Muito alta		Alta		Moderada		Baixa		Muito Baixa					
Materiais Representativos														
Cascalho	←		←		←		←		←		←		←	
Areia	←		←		←		←		←		←		←	
Silte	←		←		←		←		←		←		←	
Argila	←		←		←		←		←		←		←	

Observa-se que o parâmetro pode variar em um amplo espectro de valores. Além disso, o parâmetro em geral apresenta uma elevada variabilidade espacial segundo diversos trabalhos publicados (Scherpinski *et al.*, 2010; Vogelmann *et al.*, 2008; Fiori *et al.*, 2010, etc.).

Kannan *et al.* (2007) mostram que existe uma relação direta entre a condutividade hidráulica do solo e a vazão nos rios. Um aumento no valor de K_{sat} ocasiona um aumento correspondente na vazão. Porém, o fluxo de base aumenta quando o valor de K_{sat} está entre baixo e médio, e diminui quando está entre médio e alto. Os autores também afirmam que o efeito desse parâmetro no escoamento superficial é muito baixo, podendo ser caracterizado como um parâmetro pouco sensível na modelagem com o SWAT.

Entretanto, considerando-se a variabilidade desse parâmetro, sua sensibilidade pode estar sendo, de certa forma, subestimada quando se observa o intervalo de variação testado na maioria dos trabalhos no Brasil. É possível observar que a maioria dos trabalhos limita a variabilidade desse parâmetro entre $\pm 25\%$ ou de 1 a 100 mm/h, segundo as recomendações feita por van Griensven *et al.* (2006) e de acordo com os valores de variação *default* da análise de sensibilidade no modelo.

O parâmetro SOL_K interfere no fluxo de base, pois é responsável pelo fluxo horizontal na zona saturada, e isso pode ser determinante na simulação da vazão em épocas de estiagem, influenciando principalmente na velocidade da drenagem do solo nessa época. Para trabalhos desenvolvidos no centro-oeste brasileiro, esse parâmetro realmente tende a ser importante e seu valor pode ser significativo na simulação do decaimento da vazão após o período chuvoso.

O CN2 é um parâmetro importante no cálculo do volume de escoamento superficial. É um número adimensional e é função da capacidade de infiltração, do tipo de solo, do uso do solo, e das condições antecedentes de umidade no solo.

Segundo Peterson & Hamlett (1998), o parâmetro mais sensível no modelo SWAT é o CN2 que reflete o potencial do escoamento direto que pode ser gerado a partir de um evento de precipitação.

Entre os trabalhos analisados o parâmetro CN2 é, de fato, o parâmetro que apresenta maior frequência nas primeiras posições de sensibilidade. Dos trabalhos avaliados, 35% apresentaram este parâmetro como o de maior sensibilidade. Quando não avaliado como o parâmetro mais sensível, em geral, se fez presente nas posições 2 ou 3. Assim, em 75% dos trabalhos avaliados o CN2 esteve entre os 5 parâmetros mais sensíveis.

É importante destacar que, mesmo adaptando os valores iniciais de CN2 para valores ajustados ao Brasil (Sartori, 2010), o parâmetro ainda mostrou-se sensível, conforme mostrado na Figura 27.

Kannan *et al.* (2007), avaliando a sensibilidade de alguns parâmetros nos componentes do balanço hídrico, observaram que o SOL_AWC, que representa a capacidade de armazenamento de água no solo, apresenta uma relação inversa com diversos componentes do balanço hídrico, ou seja, um aumento no valor de SOL_AWC diminui o fluxo de base e aumenta a infiltração.

Na análise individual do parâmetro SOL_AWC verifica-se que, em 40% dos trabalhos analisados, esse parâmetro foi posicionado nas cinco primeiras posições de sensibilidade.

Os parâmetros SHALLST, ANION_EXCL, SOL_BD, DEEPST e GWHT não são comumente avaliados e utilizados nos trabalhos porque a análise de sensibilidade normalmente tem sido feita automaticamente no próprio modelo SWAT, e este limita a análise a 27 parâmetros. Esses cinco parâmetros citados não estão incluídos entre os 27 parâmetros inicialmente incluídos na análise.

O SWAT_CUP permite que o usuário defina qualquer parâmetro para a análise, podendo-se incluir assim os parâmetros que influenciam na vazão como um todo, o que é importante porque essa será a variável a ser calibrada, e não apenas o escoamento superficial.

Os demais parâmetros, REVAPMN, ESCO, ALPHA_BF, GW_REVAP, GWQMN e GW_DELAY, apresentaram uma frequência relativa de ocorrência nos trabalhos brasileiros avaliados de 1,7%, 13,14%, 11,4%, 4%, 7% e 5,8%, respectivamente.

Segundo Kannan *et al.* (2007), uma mudança no fator de compensação de evaporação do solo (ESCO) afeta todos os componentes do balanço hídrico. Em geral a

predição da vazão torna-se próxima à vazão observada quando o valor de ESCO está próximo ao seu máximo.

Para valores altos de GWQMN, uma considerável porção do fluxo de base é atrasada e armazenada no solo. Para valores baixos desse parâmetro haverá maior fluxo de base. Com esse efeito no fluxo de base, esse parâmetro tem influência também na vazão. Valores baixos desse parâmetro são necessários para induzir valores diários de vazão mais altos.

5.4 - CALIBRAÇÃO DO MODELO SWAT PARA A SUB-BACIA DO RIO DESCOBERTO

A calibração automática dos 14 parâmetros escolhidos foi realizada com 1020 interações dentro dos intervalos adotados na análise de sensibilidade.

Nesse primeiro momento a calibração foi realizada apenas para a sub-bacia do rio Descoberto (SBRD).

Conforme pôde ser visto na Figura 22, no item 5.1.6 -, a SBRD apresenta dois pontos de monitoramento diário de cota fluviométrica. Assim, foi possível realizar a calibração com esses dois pontos de valores diários de vazão disponíveis.

A calibração foi realizada para os anos hidrológicos correspondentes ao período de outubro de 2005 a setembro de 2010. De acordo com a disponibilidade de cada ponto nesse período foi possível reunir 1766 valores diários observados no ponto próximo ao exutório da bacia (Descoberto Chácara 89) e 638 valores diários de vazão no ponto mais a montante na bacia, junto ao córrego Capão da Onça (Capão da Onça – Brazlândia).

Os valores dos parâmetros que apresentaram o melhor ajuste são apresentados na Tabela 16.

Na Figura 29 são apresentados os hidrogramas observado e simulado pelo SWAT após a calibração automática dos parâmetros, na SBRD (Descoberto Chácara 89).

Tabela 16 - Parâmetros, métodos, intervalos e valores resultantes da calibração da SBRD.

Parâmetro	Unidade	Valor Inicial	Método	Intervalo		Valor na Calibração
				Mínimo	Máximo	
CN2	adim*	50 (média)	x	-0,3	0,2	-0,2329
ALPHA_BF	dias	0,0048	=	0	1	0,2885
GW_DELAY	dias	31	+	-20	450	83,5151
GWQMN	mm	0	=	0	1228	1068,6439
GW_REVAP	adim*	0,02	=	0,02	0,1	0,0187
ESCO	adim*	0,95	=	0,4	1	0,9967
SOL_AWC	mm/mm	0,12 (média)	x	-0,2	0,5	-0,1835
SOL_K	mm/h	932 (média)	x	-1,95	0,8	-1,8887
SOL_BD	[g/cm3]	0,95 (média)	x	-0,93	-0,6	-0,4688
SHALLST	mm	1000	=	1000	5000	2926,2280
GWHT	mm	12	=	0	25	14,8761
DEEPST	mm	2000	=	0	3000	1183,7188
REVAPMN	mm	1	=	0	500	254,6911
ANION_EXCL	fração	0,5	=	0,1	1	0,2156

*adim: adimensional; x: multiplicar; =: igualar; +: adicionar.

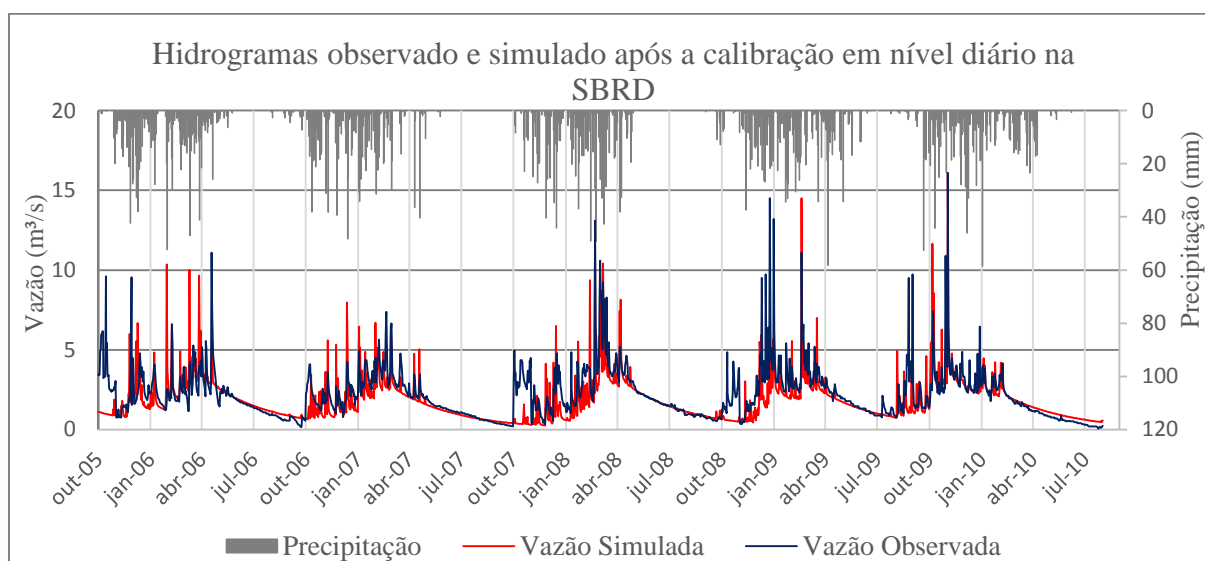


Figura 29 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado na SBRD (Descoberto Chácara 89) após a calibração dos parâmetros.

Constata-se uma expressiva melhora na representação do modelo na simulação da vazão, quando comparado aos valores obtidos sem calibração (Figura 24). Similarmente, essa evolução pode ser observada também na dispersão de seus valores, simulados e observados, apresentados no gráfico de dispersão na Figura 30, quando comparado com o gráfico da Figura 25.

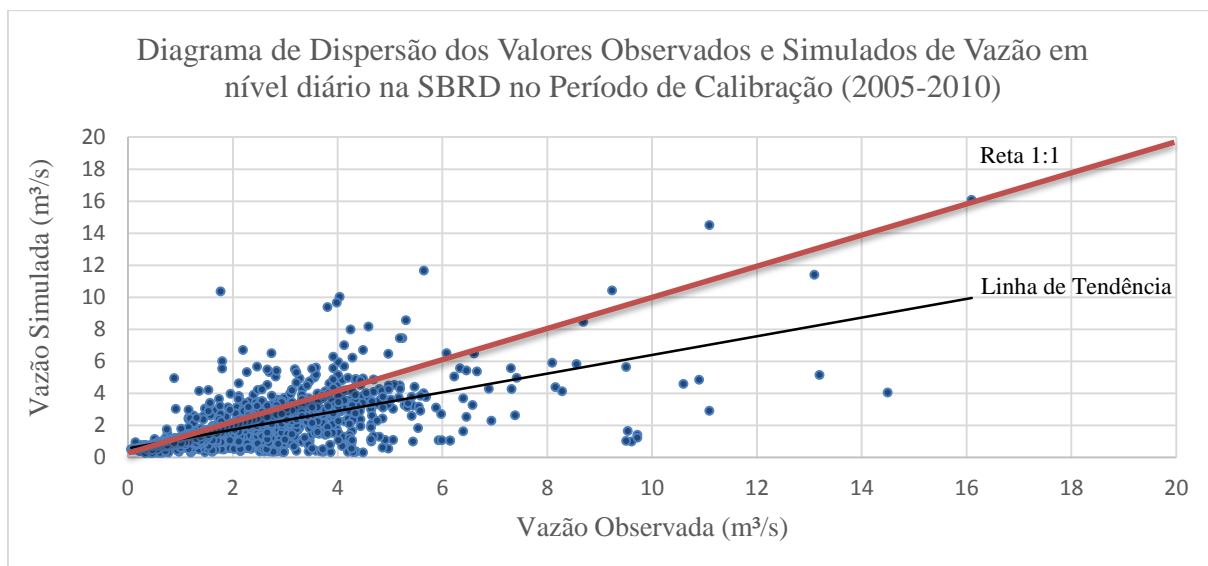


Figura 30 - Diagrama de dispersão dos valores observados e simulados de vazão após a calibração do modelo na SBRD (Descoberto Chácara 89).

Os valores do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e coeficiente de determinação (R^2) foram respectivamente de 0,40 e 0,44, indicando estatisticamente, a evolução em relação aos valores obtidos sem calibração (-0,57 e 0,24).

Em relação ao hidrograma apresentado na Figura 29 pode-se notar que o modelo não foi capaz de representar diversos picos de vazão observados durante o período chuvoso, e algumas vezes simulou picos maiores que os registrados.

De certa forma, a simulação de alguns picos que não foram observados pode ser explicada devido ao fato de que as medições feitas em campo são realizadas duas vezes ao dia, às 7h00 e as 17h00, e efetuada a média pela própria CAESB. Isso leva a impossibilidade de se saber se a cota foi medida antes, durante, ou depois da chuva, pois os dados de chuva são referentes à lâmina da água precipitada ao longo do dia, e o tempo de concentração da bacia é da ordem de poucas horas. Essas limitações devem ser consideradas relevantes nesse processo de avaliação do modelo, e cabe ponderar a real necessidade e importância de uma simulação diária para determinados objetivos.

Por outro lado, a subestimativa de picos observados pode se tratar da questão da espacialização da chuva na bacia e, mais que isso, a sua concentração em algumas horas do dia.

A Figura 31 apresenta os hidrogramas observado e simulado de apenas um ano hidrológico (2009/2010) do período de calibração, para melhorar a visualização do comportamento.

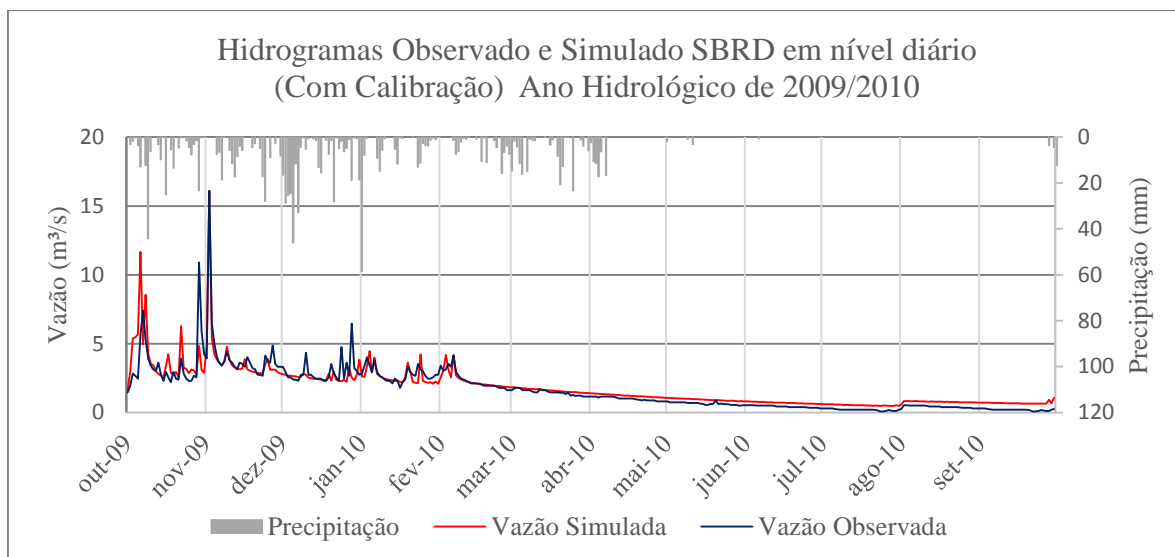


Figura 31 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado da SBRD (Descoberto Chácara 89) no ano hidrológico de 2009-2010 com calibração dos parâmetros.

É possível perceber um desempenho similar do modelo em relação ao comportamento observado durante o ano hidrológico. Porém, notam-se algumas divergências entre os valores observados e simulados, principalmente no que se trata do período de seca (junho a setembro).

O valor do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) nesse ano hidrológico foi de 0,78, enquanto o coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,79, sendo indicativos de uma adequada simulação.

Observando-se certas discrepâncias e com o intuito de avaliar o comportamento do SWAT após a calibração, elaborou-se o gráfico de dispersão residual percentual relativo à vazão observada, apresentado na Figura 32.

O erro absoluto é a diferença em módulo entre os valores observados e simulados. O erro relativo é a razão entre o erro absoluto e o valor de vazão observado. O erro percentual é a representação percentual do erro relativo.

A presente análise foi realizada com o total de 1766 valores de vazões diárias observados, equivalentes ao período entre Outubro de 2005 e Setembro de 2010.

Nesse intervalo de tempo, a média de erros absolutos foi de 0,74 m³/s, enquanto o percentual médio de erro em relação a vazão observada foi de 41,6%.

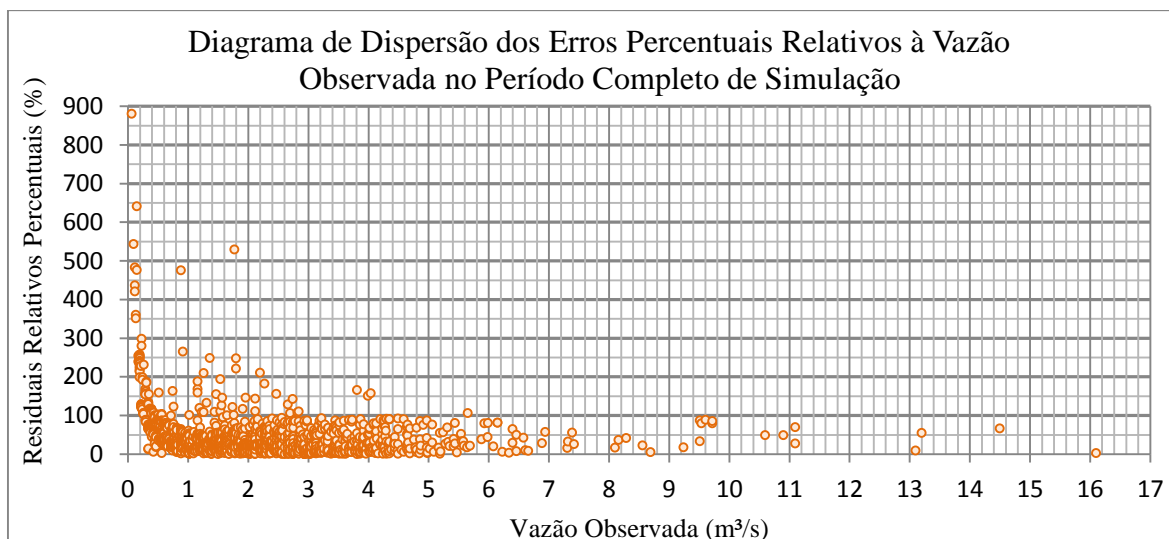


Figura 32 - Diagrama de dispersão residual no período completo em relação a vazão observada no período de 2005-2010 na SBRD (Descoberto Chácara 89).

A Tabela 17 foi elaborada com o intuito de verificar os pontos cruciais de erros do modelo. As vazões foram divididas em intervalos de 1 m³/s. Foram computados quantos valores de vazão observados estavam dentro de cada intervalo e a percentagem média de erro em relação a vazão observada.

Tabela 17 - Avaliação da percentagem residual na simulação da SBRD em relação aos valores de vazão observados.

Período de Outubro de 2005 à Setembro de 2010		
Intervalo de Vazão (m ³ /s)	Número de observações	Erro médio (%)
0 a 1	386	78,4
1 a 2	543	31,2
2 a 3	432	30,3
3 a 4	229	27,9
4 a 5	109	35,0
5 a 6	29	38,0
6 a 7	14	34,8
7 a 8	4	32,2
8 a 9	5	24,3
9 a 10	7	67,1
10 a 11	2	48,9
11 a 12	2	48,2
12 a 13	0	-
13 a 14	2	31,9
14 a 15	1	66,4
15 a 16	0	-
16 a 17	1	2,5

Nota-se um erro expressivo nas vazões mais baixas, ou seja, nos períodos de estiagem, evidenciando, por exemplo, a dificuldade do modelo na simulação do movimento da água subterrânea.

Similarmente, a análise foi feita para o período de chuva e de seca buscando detalhar os erros encontrados.

Na Figura 33 é apresentado o diagrama de dispersão dos erros percentuais relativos à vazão observada nos períodos de chuva, compreendendo os meses de novembro a março dos anos hidrológicos de 2005 à 2010.

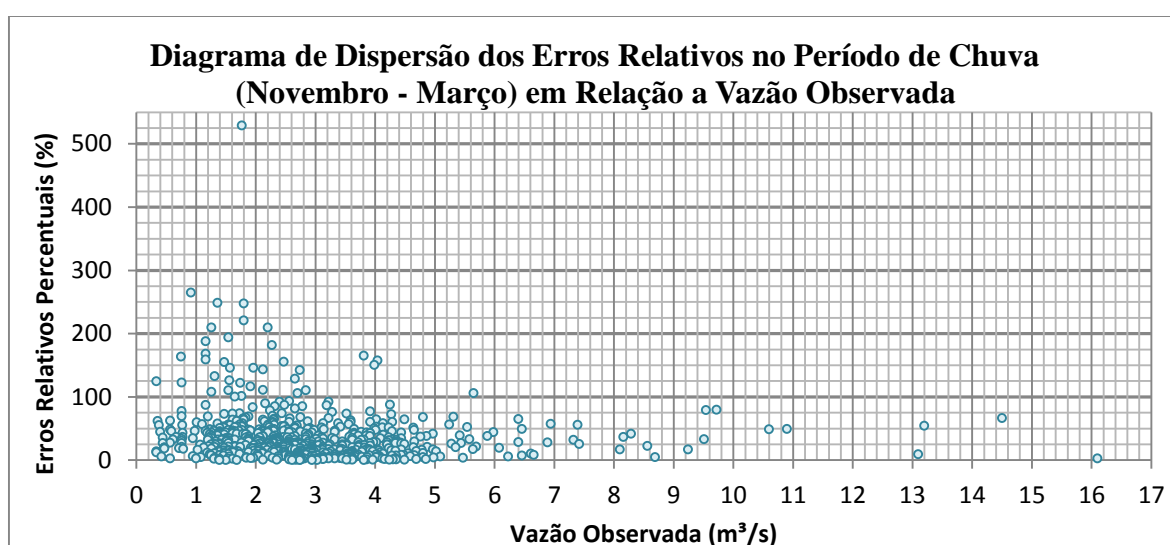


Figura 33 - Diagrama de dispersão residual no período de chuva (novembro a março) nos anos de 2005 a 2010 em relação à vazão observada na SBRD (Descoberto Chácara 89).

Nesse período foram avaliados 711 dias, sendo que, desses, 376 valores de vazão foram superestimados pelo modelo, enquanto 335 foram subestimados. O percentual médio do residual relativo foi de 35%, e a vazão média diária foi subestimada em 27,4% e superestimada em 41,8% durante os períodos de chuva avaliados.

Nota-se que entre as vazões 1 e 5 m³/s há maior distribuição entre os erros. A média do percentual residual relativo nesse intervalo foi de 34,2% (média de 630 valores), e a vazão foi superestimada em 40,1% (média de 343 valores que superestimaram a vazão) e subestimada em 26,5% (média de 287 valores que subestimaram a vazão).

Vale ressaltar que a vazão média observada nesse período foi de 2,89 m³/s, enquanto a média das vazões simuladas foi de 2,90 m³/s.

Avaliando isso, é possível inferir que o modelo SWAT, no período de chuva, em que a vazão variou de 0,45 a 16,1 m³/s, superestimou mais que subestimou os valores observados, porém manteve-se próximo a vazão média.

É possível observar ainda que nas vazões acima de 10 m³/s o modelo subestimou as vazões observadas em todo o período, e o erro médio foi de 38,5%.

Os coeficientes de eficiência de NSE e R² foram respectivamente de 0,28 e 0,42 para os períodos analisados, indicando uma simulação insatisfatória para os períodos de chuva quando analisados os coeficientes estatísticos.

Para períodos de estiagem entre os anos hidrológicos de 2005 a 2010, apresenta-se o diagrama de dispersão residual em relação à vazão observada na Figura 34.

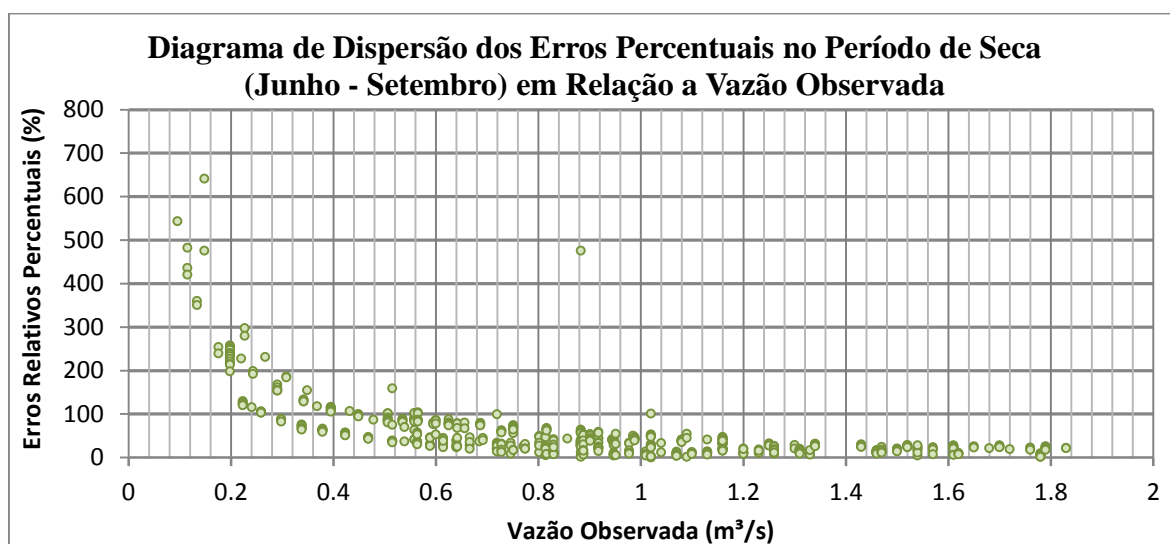


Figura 34 - Diagrama de dispersão residual no período de seca (junho a setembro) nos anos de 2005 a 2010 em relação à vazão observada.

A avaliação dos períodos de estiagem que compreenderam 611 valores resultou em 25 valores subestimados e 586 valores superestimados. Isso corresponde a 4,1 e 95,9% respectivamente.

A média do erro absoluto durante todo o período avaliado foi de 0,3 m³/s o que corresponde a 31,25% uma vez que a média observada no período foi de 0,96 m³/s e a simulada foi de 1,26 m³/s.

Os coeficientes de eficiência de NSE e R² apresentaram valores de 0,39 e 0,74 durante os períodos de estiagem avaliados, indicando uma simulação satisfatória em nível dessas análises estatísticas de eficiência de modelos analisadas.

Porém, vale ressaltar que a percentagem média do erro relativo foi de 55,6%, e a vazão foi subestimada em 19,3% (25 valores subestimaram a vazão) e superestimada em 56,5% (586 valores superestimaram a vazão).

A análise dos percentuais residuais foi feita com um intervalo de 0,2 m³/s da vazão observada, podendo assim verificar quais pontos de vazão foram críticos na simulação do fluxo de base pelo modelo SWAT. A Tabela 18 apresenta os resultados numéricos dessa análise.

Tabela 18 - Avaliação da percentagem residual na simulação da SBRD em relação aos valores de vazão observados no período de seca

Período de Seca – Junho a Setembro – 2005 a 2010		
Intervalo de Vazão (m³/s)	Número de observações	Erro médio (%)
0 a 0,2	26	331
0,2 a 0,4	57	122,2
0,4 a 0,6	69	70,5
0,6 a 0,8	81	47,4
0,8 a 1,0	117	35,9
1,0 a 1,2	80	24
1,2 a 1,4	58	18,4
1,4 a 1,6	45	19,19
1,6 a 1,8	45	18,6
1,8 a 2,0	16	14,4
2,0 a 2,2	9	8,8
2,2 a 2,4	3	20,1
2,4 a 2,6	10	52,2
2,6 a 2,8	1	14,8
2,8 a 3,0	2	12,1

Constata-se assim que os maiores erros estão nas simulações das vazões mais baixas, sendo expressivamente relevante até aproximadamente 1 m³/s, em que se mantém acima da média da percentagem do erro de todo o período.

O erro diminui gradativamente de acordo com o aumento da vazão, e subestimou em apenas 8,8% quando simulou as vazões de 2 a 2,2 m³/s.

Com o intuito de visualizar graficamente os erros nos períodos de estiagem ao longo dos anos avaliados, apresenta-se a Figura 35.

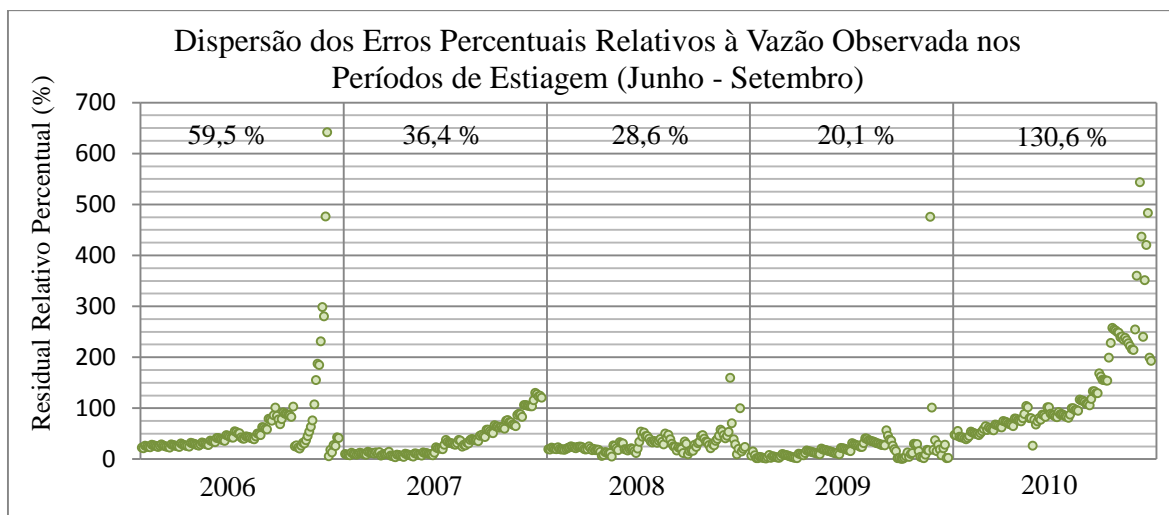


Figura 35 - Diagrama de dispersão dos resíduos nos períodos de estiagem (junho à setembro) ao longo dos anos hidrológicos de 2005 a 2010.

O período de estiagem que apresentou maior discrepância dos valores observados de vazão foi durante o ano de 2010, chegando a superestimar os valores do fluxo em uma média de 130,6%.

Também é possível visualizar que próximo ao final de cada período de estiagem os erros aumentam, justamente quando o corpo d'água apresenta os menores valores de vazão.

O único momento em que a simulação apresentou erros de subestimativa do fluxo foi durante o ano de 2009, em todos os outros anos os erros foram relativos a vazão observada estar sendo superestimada pelo modelo.

Essa concentração dos resíduos em relação aos valores mais baixos de vazão pode ter ocorrido porque o componente de águas subterrâneas do SWAT não considera parâmetros distribuídos, como a condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento, o que dificulta a representação detalhada da recarga e do comportamento das águas subterrâneas.

Segundo Neitsch *et al.* (2009), o módulo de águas subterrâneas em si é concentrado, e adicionalmente parâmetros distribuídos como a distribuição da condutividade hidráulica não são representados pelo modelo. Além disso, o modelo SWAT apresenta dificuldades ao expressar a distribuição espacial dos níveis de águas subterrâneas e as taxas de recarga (Kim *et al.*, 2008).

Com o propósito de avaliar as vazões diárias observadas e simuladas durante cada mês dos períodos de estiagem dos anos de 2005 a 2010, plotou-se o gráfico Box Plot apresentado na Figura 36.

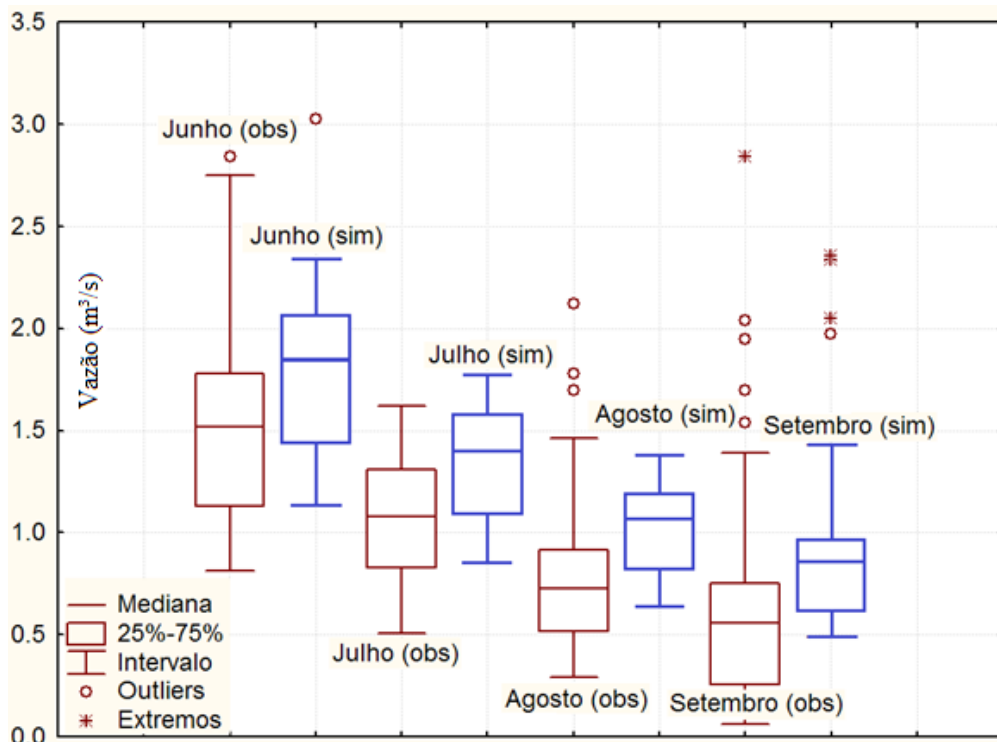


Figura 36 - Box plot das vazões médias diárias observada e simulada durante o período de estiagem (junho a setembro) referentes aos anos hidrológicos de 2005 a 2010

Em relação ao mês de junho observa-se que os valores de vazão observados são menores que 1,5 m³/s em 50% dos casos, porém isso acontece em praticamente apenas 25% dos valores simulados. Além de tudo, 25% dos valores observados estão entre 0,75 e aproximadamente 1,2 m³/s, já a simulação não apresenta nenhum resultado nesse intervalo, e todos os valores simulados para esse período estão acima de 1,2 m³/s. É possível observar também que o intervalo de variância dos valores simulados foi menor que do fluxo observado.

Para o mês de julho nota-se que o intervalo de variação entre as vazões observadas é menor, apresentando inclusive um comportamento normal sem identificar tendências entre as vazões de 0,5 e 1,6 m³/s. Constata-se que mesmo apresentando um comportamento similar, as vazões simuladas ficaram aproximadamente 25% maiores que o limite superior observado.

Durante os meses de agosto ocorreram 3 valores atípicos acima do intervalo superior de 1,5 m³/s. Aproximadamente 60% dos valores de fluxo foram superestimados e pouco menos que 50% dos valores observados ficaram abaixo do limite inferior de vazões simuladas.

Similarmente, durante os meses de setembro, aproximadamente 50% das vazões observadas ficaram abaixo do limite inferior simulado, o que caracteriza a superestimativa do fluxo observado.

Com relação a calibração no ponto de monitoramento no córrego Capão da Onça, a montante na SBRD, são apresentadas as Figura 37 e Figura 38, referentes aos hidrogramas observado e simulado e ao gráfico de dispersão. O NSE foi de 0,51 enquanto o R^2 de 0,44 para o período de calibração.

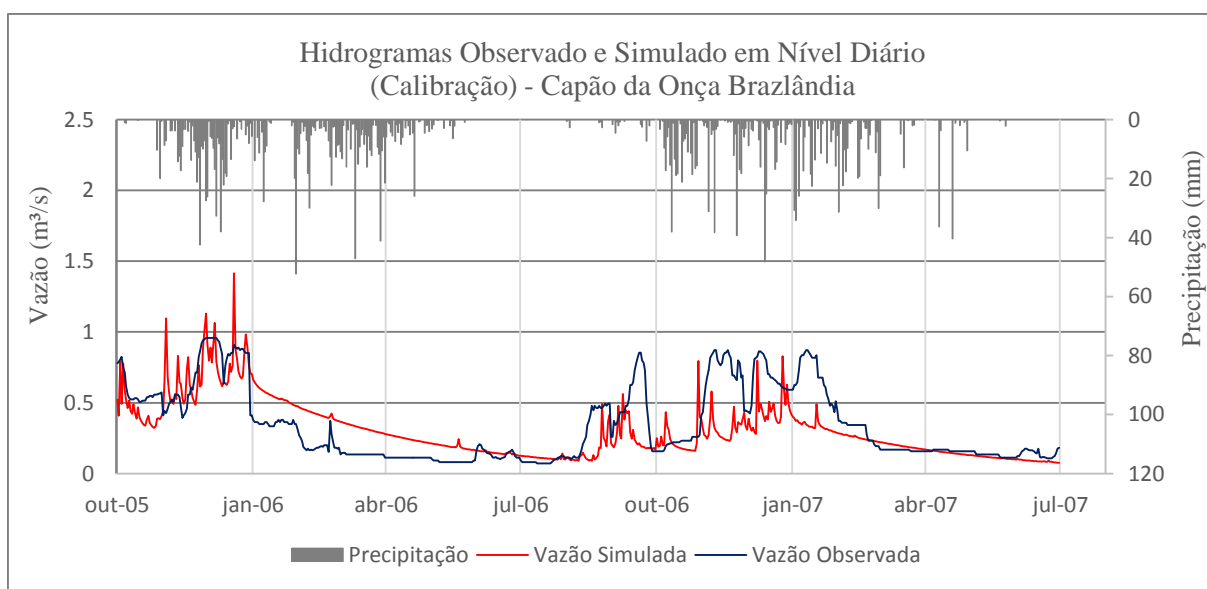


Figura 37 – Hietograma e hidrogramas observado e simulado pelo modelo SWAT no córrego Capão da Onça (SBRD) no período de calibração.

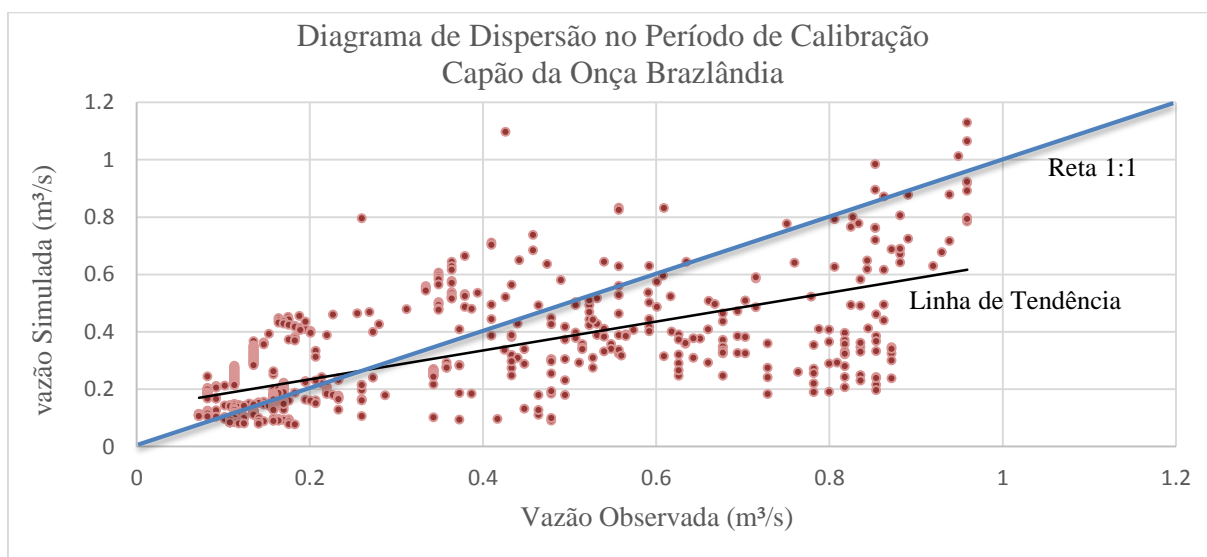


Figura 38 – Diagrama de dispersão dos valores observado e simulado de vazão no córrego Capão da Onça (SBRD) durante o período de calibração.

Similarmente ao ocorrido no exutório da SBRD, a vazão foi superestimada no período de seca, principalmente no primeiro ano hidrológico avaliado, e subestimada no período de chuva, apresentando maiores discrepâncias principalmente no segundo ano.

O erro percentual médio durante todo o período foi de 48,6%. Analisando os resíduos relativos no período de estiagem, computou-se um erro médio de 31,7% na vazão, em que o erro máximo foi no momento em que o modelo subestimou a vazão em 81,2%, e o erro mínimo foi superestimando-a em 0,29%. Avaliando os resíduos relativos no período de chuva, o erro médio nas vazões foi de 52,6%, variando entre erros percentuais de 0,3% a 172,4%.

Como se pode observar na figura acima, os valores de vazão observados não apresentam um comportamento típico de vazão diária, nem mesmo similar ao que se observou no hidrograma do ponto próximo ao exutório. Entrou-se em contato com a CAESB, responsável pelas medições, e constatou-se que a estação realmente apresenta erros, e hoje não se encontra mais em operação.

A avaliação média mensal é apresentada na Figura 36.

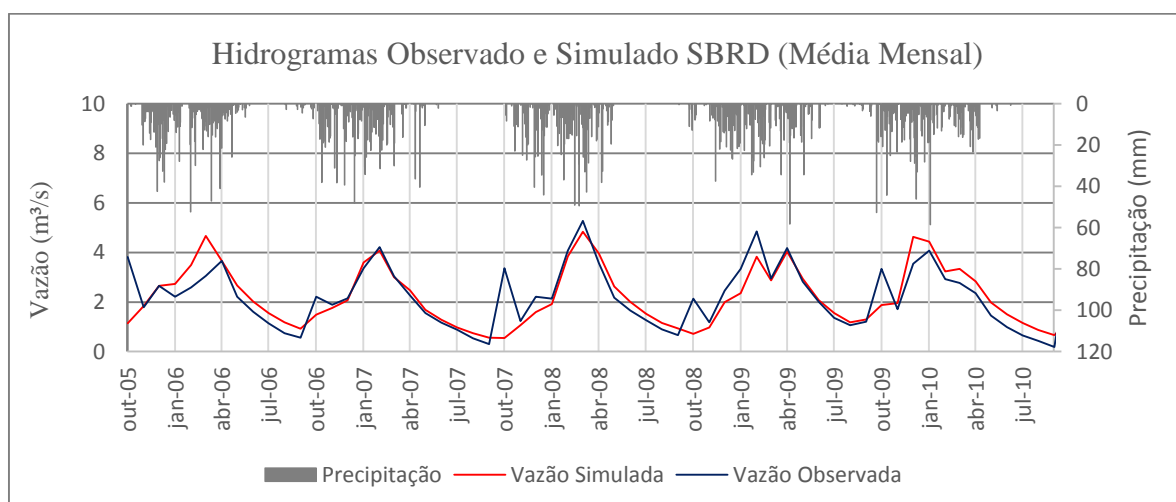


Figura 39 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado da vazão mensal da SBRD no período de calibração (2005-2010)

A análise estatística da série mensal resultou em um ENS de 0,65 e um R^2 de 0,66, indicando uma melhora expressiva na comparação entre os valores observados e simulados.

O diagrama de dispersão é apresentado na Figura 40.

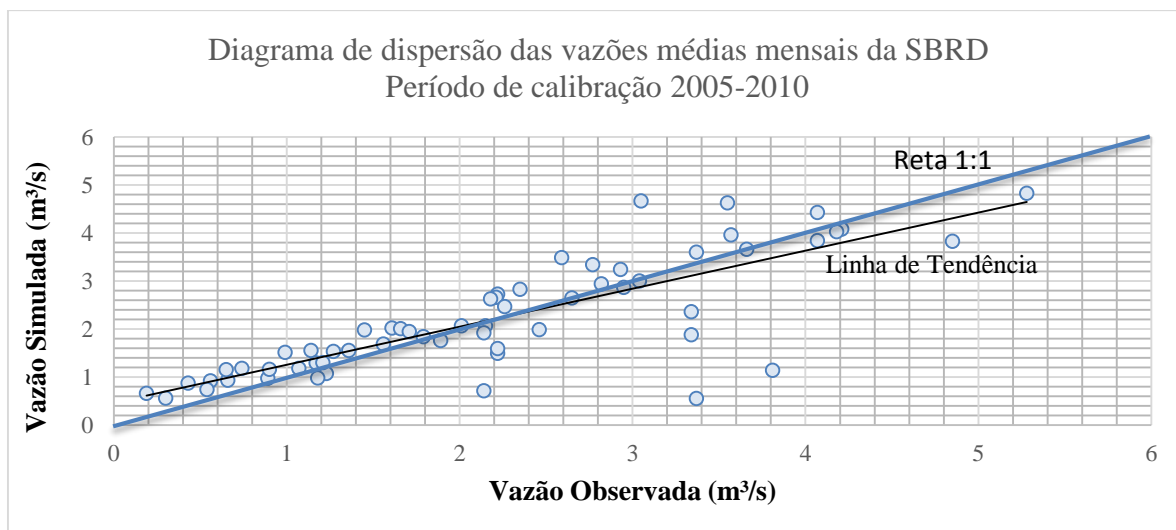


Figura 40 - Diagrama de dispersão das vazões médias mensais observadas e simuladas na SBRD no período de calibração (2005-2010).

Analisando uma revisão feita por Moriasi *et al.* (2007), a melhora nos valores de NSE são expressivas quando comparando as médias mensais.

Van Liew *et al.* (2003), aplicando o SWAT em oito bacias hidrográficas no sudeste de Oklahoma, verificou uma melhora do NSE de 0,56 a 0,58 (diário) para 0,66 a 0,79 (mensal). No período de validação o intervalo do NSE nas oito bacias foi de -0,37 a 0,72 (diário) para -1,05 a 0,89 (mensal), observando também uma melhora no coeficiente quando avaliado mensalmente durante a verificação.

Saleh e Du (2004) obtiveram um NSE de 0,17 avaliando diariamente e de 0,5 avaliando mensalmente na calibração da bacia do rio Bosque no Texas. No período de verificação o NSE mudou de 0,62 para 0,72 quando avaliado pela média mensal.

Barnez (2004), estudando algumas sub-bacias da BHL D durante os anos de 2002 e 2003, observa os erros relativos no cálculo de deflúvio e da vazão máxima com base no registro de dados a cada 15 min em comparação com as médias dos registros das 7h00 e 17h00, metodologia utilizada pela CAESB para o cálculo da vazão média diária. Ela relata que o método utilizado pela CAESB pode não ser suficiente para subsidiar estudos hidrológicos diários em pequenas bacias hidrográficas, em função do reduzido tempo de concentração. Para a SBRD, o estudo indicou um erro relativo de 66% na obtenção da vazão máxima com base na aplicação da média dessas duas leituras diárias. O erro relativo médio na obtenção do deflúvio mensal para essa sub-bacia foi de 3,9%, enquanto para o deflúvio anual foi de 3,8%.

5.5 - VERIFICAÇÃO DO MODELO SWAT

A verificação do modelo SWAT se fez em duas etapas principais: verificação diária e verificação mensal.

Após a calibração diária para o período de outubro de 2005 a setembro de 2010 na sub-bacia do rio Descoberto (SBRD), foi realizada a verificação dos ajustes dos parâmetros na simulação da vazão no período de outubro de 2010 a agosto de 2013 para essa mesma sub-bacia.

Posteriormente, a verificação foi feita para as demais sub-bacias em estudo (Chapadinha, Olaria, Rodeador, Capão Comprido e Ribeirão das Pedras) aplicando-se os parâmetros calibrados para a SBRD. Assim, pode-se verificar a potencialidade da utilização dos resultados da calibração para sub-bacias de características similares.

5.5.1 - Verificação do modelo para a sub-bacia do rio Descoberto (SBRD)

Os hidrogramas observado e simulado no período de verificação, compreendendo os anos hidrológicos de outubro de 2010 a agosto de 2013, são apresentados na Figura 38. O diagrama de dispersão dos valores de vazão observados versus simulados, juntamente com o coeficiente de determinação, são apresentados na Figura 39.

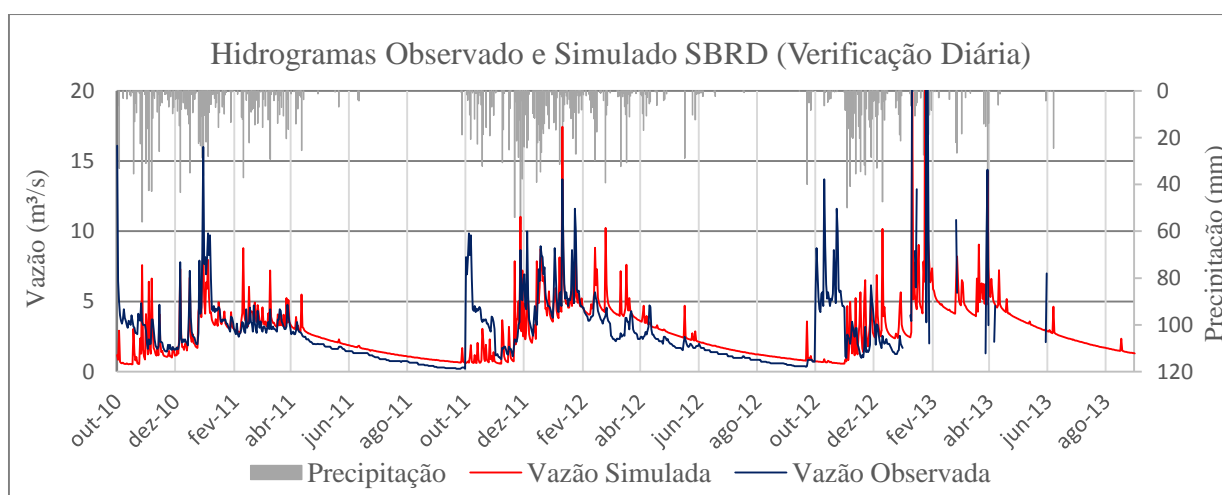


Figura 41 – Hietograma e hidrogramas observado e simulado da verificação diária na SBRD (2010-2013).

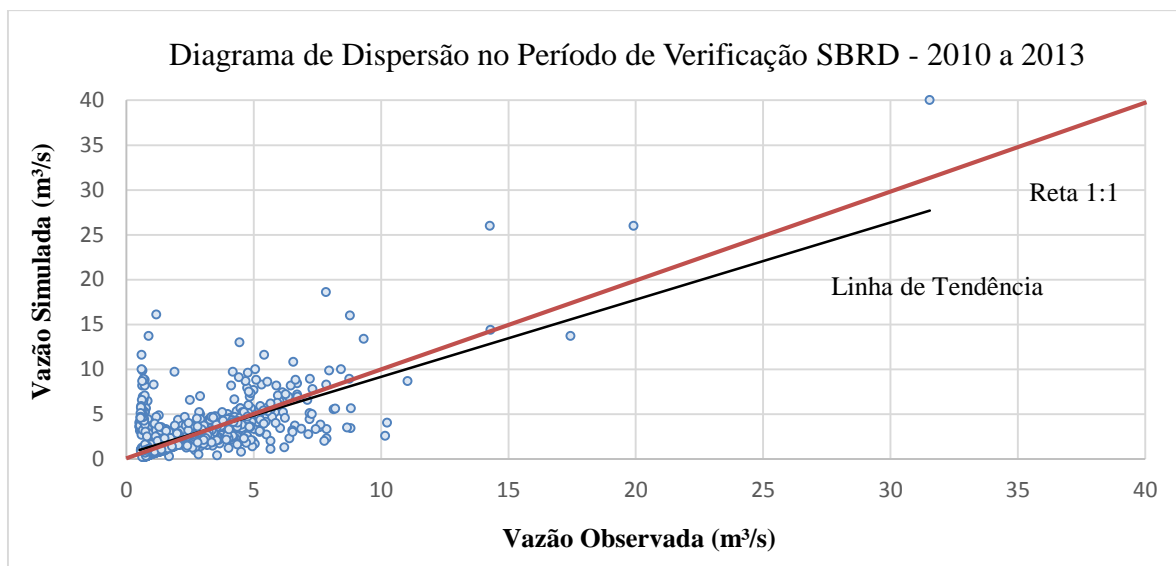


Figura 42 - Diagrama de dispersão dos valores observados de vazão (eixo x) versus valores simulados de vazão (eixo y) no período de verificação da SBRD.

O coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE) para esse período de verificação foi de 0,48, enquanto o coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,46. Tais resultados indicam uma verificação boa dos valores diários, em que o modelo SWAT se mostrou capaz de reproduzir um bom ajuste entre os valores observados e simulados fora do período de calibração.

Observando os gráficos apresentados pode-se constatar um comportamento similar ao mostrado e discutido na fase de calibração do modelo. Nota-se, porém, uma maior distância dos valores observados e simulados nos períodos de estiagem. Tal afastamento é evidenciado analisando-se os erros absolutos, relativos e percentuais em relação aos valores observados, quando se computou um erro médio de 81,16% nas vazões entre os meses de junho a setembro.

Na Figura 43 apresenta-se o diagrama de dispersão residual durante o período de verificação.

Foram avaliados 865 valores de vazão, nos quais a percentagem média dos erros relativos foi de 55,16% durante todo o período, variando de 0,13 a 851,5% de erro na estimativa da vazão.

No período de seca, como citado anteriormente, o erro médio aumentou sua proporção em relação ao período de calibração. Foram avaliados 280 valores e os erros variaram de 3,34 a 851,5% na simulação das vazões nesse período de baixas vazões, e o erro percentual médio foi de 81,16%.

Durante o período de chuva foram avaliados 394 valores, obtendo uma média de 38,7% de erro nas vazões, enquanto no período de calibração o erro médio foi de 35%.

Portanto, para a SBRD, mesmo sendo considerado satisfatório estatisticamente pelos coeficientes ENS e R^2 , o período de verificação apresentou pioras principalmente na simulação do escoamento de base durante o período de estiagem.

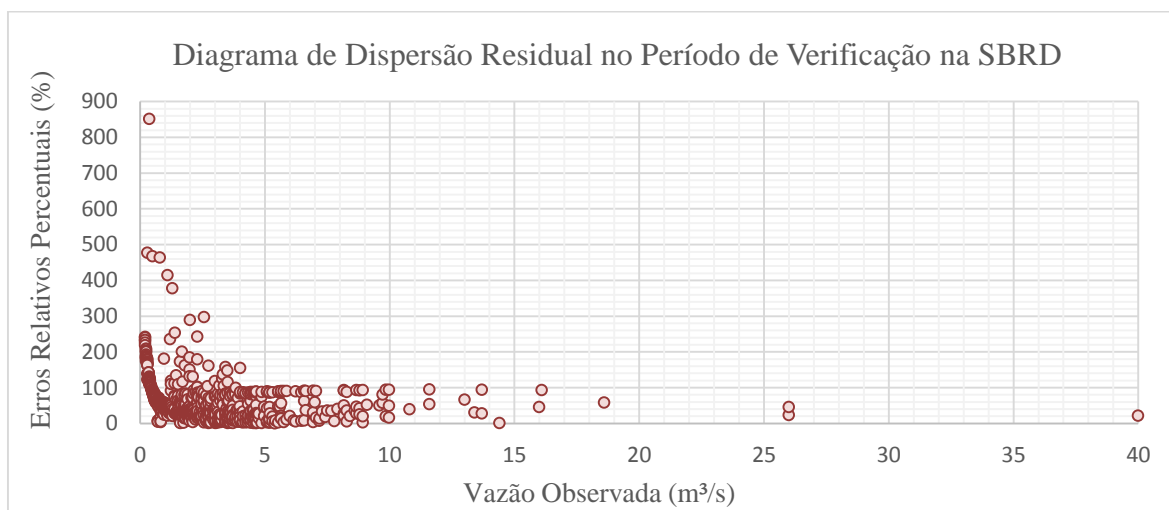


Figura 43 - Diagrama de dispersão residual no período de verificação (2010/2013) em nível diário na SBRD.

A verificação durante o mesmo período (2010-2013) foi feita com as médias mensais dos valores de vazão obtidos na simulação diária. Na Figura 44 é apresentado o hidrograma observado e simulado dessa análise em que se obteve um NSE de 0,24 e um R^2 de 0,34. O diagrama de dispersão é apresentado na Figura 45.

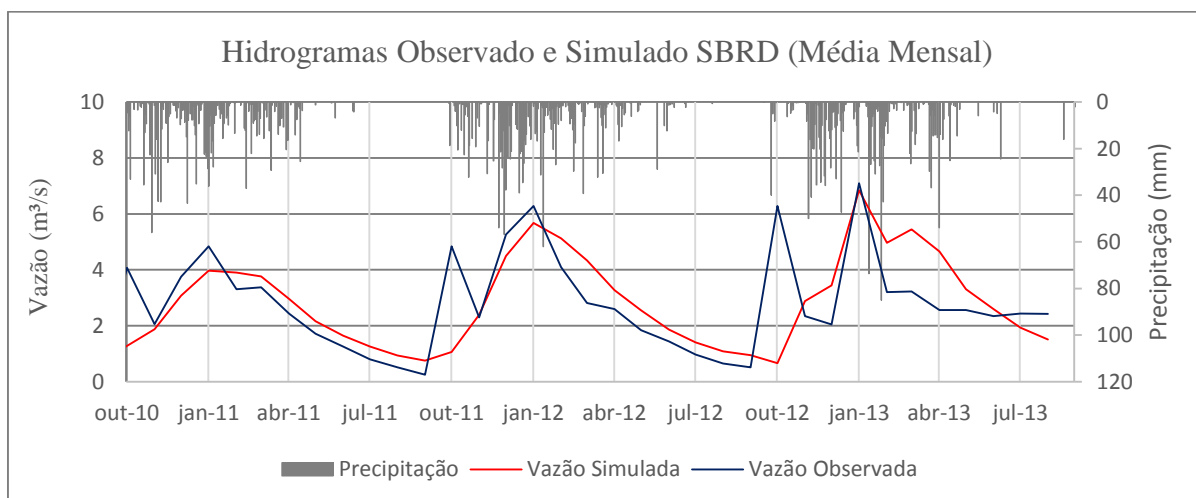


Figura 44 - Hidrogramas observado e simulado da verificação mensal na SBRD (2010-2013).

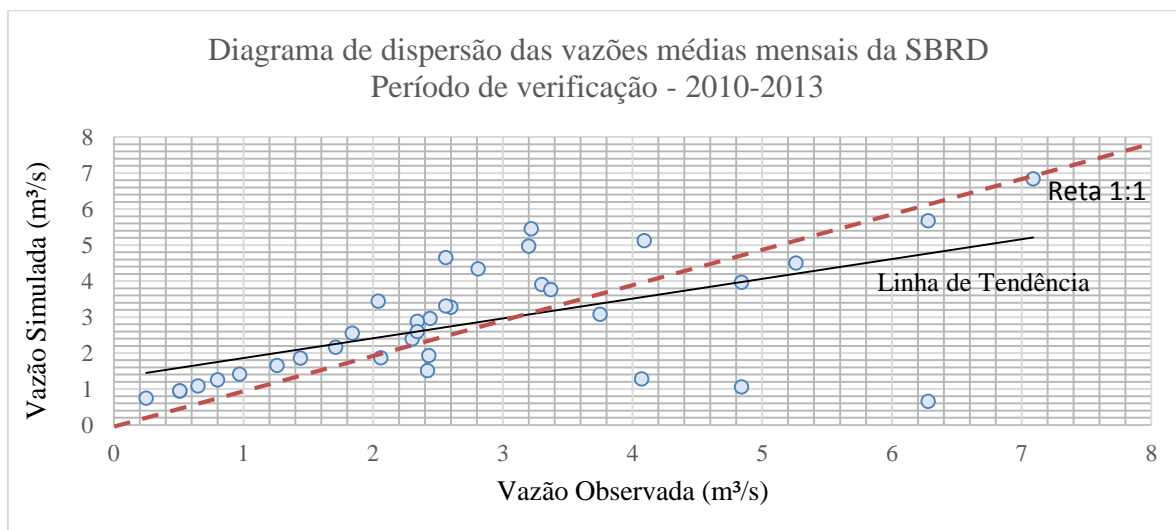


Figura 45 - Diagrama de dispersão das vazões médias mensais observadas e simuladas na SBRD no período de verificação (2010-2013)

5.5.2 - Verificação na sub-bacia do córrego Chapadinha (SBCC)

A verificação do modelo SWAT calibrado para a SBRD foi feita para a sub-bacia do córrego Chapadinha (SBCC) diariamente e em dois períodos: durante os anos hidrológicos de 2005 a 2010, correspondente ao período de calibração dos parâmetros na SBRD, e durante os anos hidrológicos de 2010 a 2013, correspondente ao período de verificação na SBRD.

A avaliação gráfica diária da verificação do modelo para a SBCC para todo o período analisado é apresentada pelo hidrograma exposto na Figura 46.

Pelos hidrogramas pode-se constatar que o modelo SWAT respondeu de forma positiva à verificação feita a partir da calibração em outra sub-bacia. Como se esperava, permaneceram problemas específicos na simulação de picos e da vazão no período de seca, mas a modelagem em si do comportamento geral do sistema pode ser considerada satisfatória.

Barnez (2004), avaliando o erro relativo na obtenção da vazão máxima pela metodologia da CAESB na SBCC, registrou um erro de 44,12%. Na obtenção do deflúvio mensal esse erro foi em média de 4,6%, enquanto na obtenção do deflúvio anual foi de 5,04%.

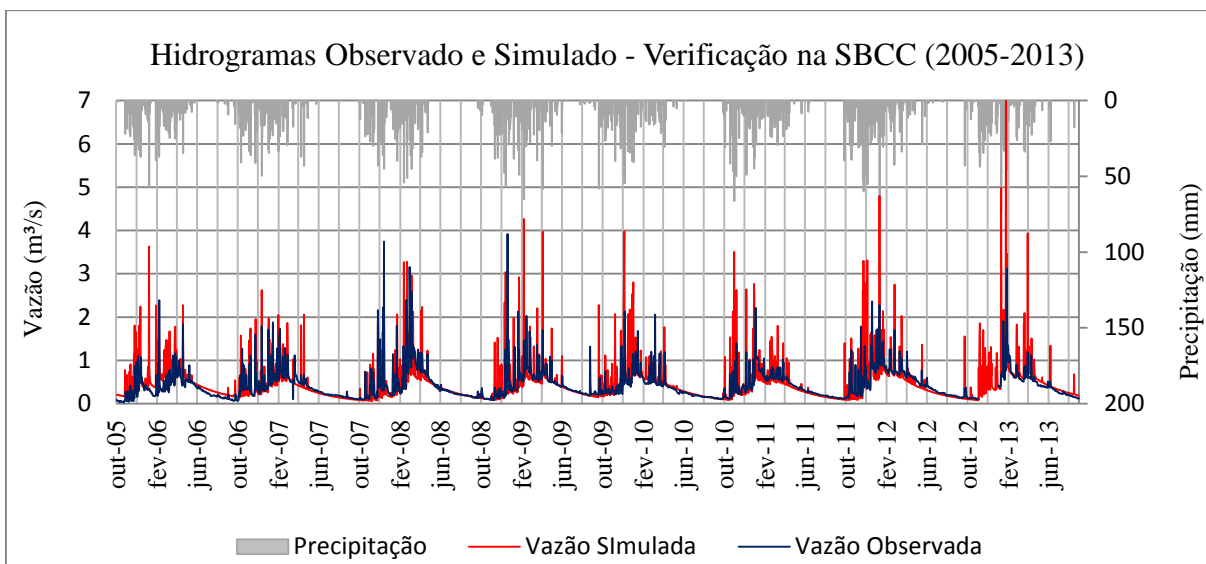


Figura 46 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado da verificação diária na SBCC (2005-2013) com o ajuste dos parâmetros calibrados na SBRD.

A fim de avaliar, então, o desempenho do modelo calibrado para a SBCC, foi analisada a média mensal dos valores diários. O hidrograma referente a essa análise é apresentado na Figura 47.

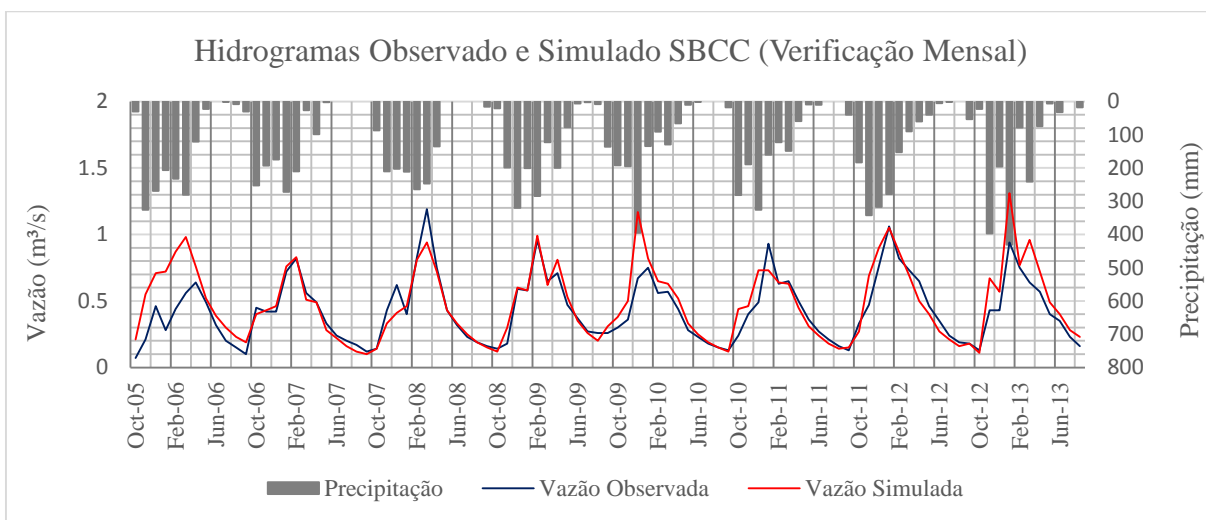


Figura 47 – Hietograma e hidrogramas observado e simulado da verificação mensal na SBCC (2005-2013) com o ajuste dos parâmetros calibrados na SBRD.

A avaliação estatística do coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE) e coeficiente de determinação (R^2) nos diferentes períodos (calibração e verificação) e nas diferentes avaliações (diária e mensal) são mostrados na Tabela 19.

Tabela 19 - Avaliação estatística do coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE) e do coeficiente de determinação (R^2) na verificação da SBCC

SBCC	2005 a 2010		2010 a 2013	
	NSE	R^2	NSE	R^2
Diária	-0,2	0,33	-0,5	0,43
Mensal	0,63	0,73	0,72	0,82

A avaliação estatística diária não se mostrou satisfatória para a aplicação do modelo na SBCC, apresentando um NSE negativo nos dois períodos. A média mensal dos valores diários, no entanto, obteve valores satisfatórios (Moriasi *et al.*, 2007) na modelagem referente aos dois períodos analisados.

Essa avaliação pode indicar que os parâmetros calibrados para a SBRD podem ser reproduzidos para a SBCC para a simulação mensal da vazão.

Vale ressaltar que a SBCC tem a região administrativa de Brazlândia incluída em sua área de drenagem. A cidade não tem galeria de drenagem urbana, o que possivelmente não foi uma limitação para a modelagem. De qualquer forma pode-se considerar que o modelo respondeu satisfatoriamente à simulação de áreas urbanas, pois estas correspondem a 18,3 % de ocupação na SBCC.

5.5.3 - Verificação da sub-bacia do córrego Olaria

O ajuste nos parâmetros feito na calibração do modelo SWAT na SBRD, quando aplicados à sub-bacia do córrego Olaria, resultou no hidrograma apresentado na Figura 48.

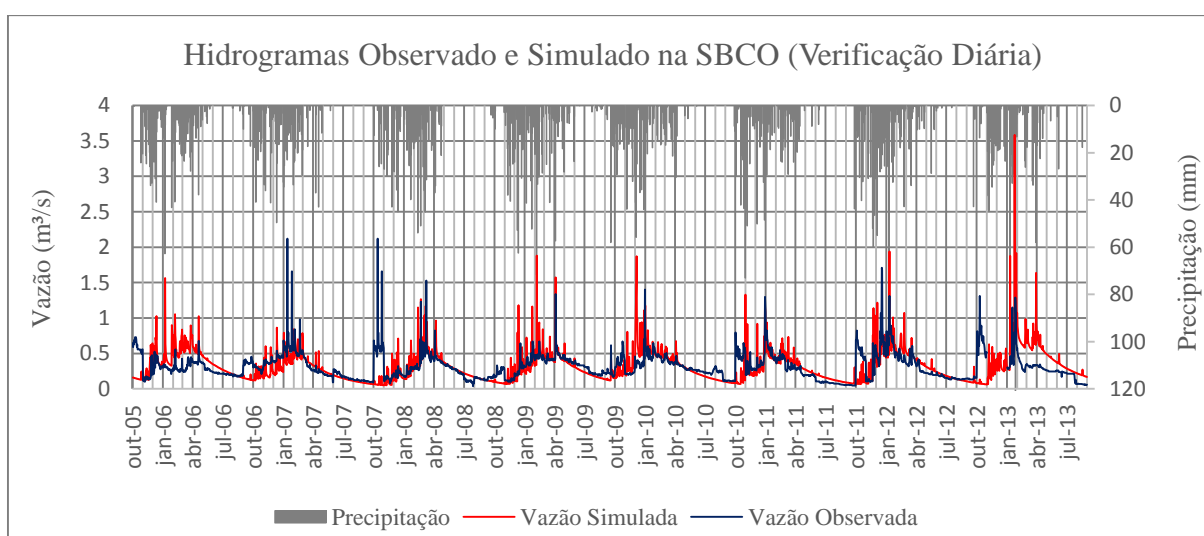


Figura 48 – Hietograma e hidrogramas observado e simulado da verificação diária na SBCO (2005-2013) com o ajuste dos parâmetros calibrados na SBRD.

Nota-se que o comportamento geral do sistema, constituído pelas recessões e ascensões dos anos hidrológicos no hidrograma, foi representado pelo modelo, porém em diversos momentos aconteceram maiores discrepâncias na simulação da vazão em comparação com os hidrogramas apresentados anteriormente. A média percentual dos erros relativos à vazão observada no período total foi de 41,7%. No período de 2010 a 2013 se observa maiores divergências entre os valores observados e simulados, mesmo porque se nota um comportamento atípico das vazões observadas ao longo do último ano hidrológico. Isso acarretou num erro médio percentual de 54,2% na simulação da vazão apenas nesse período.

O erro relativo médio em relação à obtenção da vazão máxima, obtido no estudo feito por Barnez (2004), foi de 83,15% na SBCO, o que de certa forma pode justificar o erro encontrado na simulação da bacia. Os erros relativos para a obtenção do deflúvio mensal e anual foram respectivamente de 3,11 e 4,1%.

Sendo assim foi feita a avaliação da média mensal do desempenho do modelo calibrado quando verificado na SBCO, apresentada no hidrograma da Figura 49.

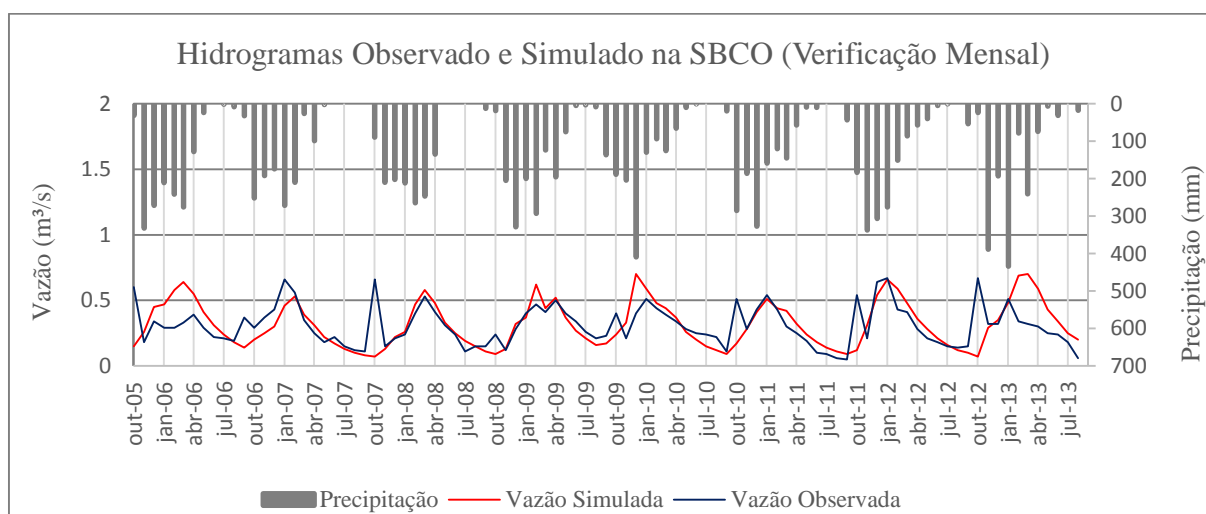


Figura 49 – Hietograma e hidrogramas observado e simulado da verificação mensal na SBCO (2005-2013) com o ajuste dos parâmetros calibrados na SBRD.

Na verificação mensal fica igualmente evidenciado que o modelo apresentou maiores dificuldades em simular essa bacia.

De acordo com os resultados estatísticos de NSE e R² apresentados na Tabela 20, o modelo não foi capaz de simular a vazão da SBCO com os valores dos parâmetros calibrados na SBRD. Constata-se que durante o período de 2005 a 2010, a avaliação diária respondeu mais adequadamente que a avaliação mensal, e mesmo assim apenas 35% das

variações nos valores simulados foram descritas pela variabilidade dos dados observados. Em todas as situações o NSE obtido foi negativo, o que leva a indicar que o modelo respondeu pior que se fosse considerada a média da vazão observada.

Tabela 20 - Avaliação estatística do coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE) e do coeficiente de determinação (R^2) na verificação da SBCO.

SBCO	2005 a 2010		2010 a 2013	
	NSE	R^2	NSE	R^2
Diária	-0,04	0,35	-0,39	0,23
Mensal	-0,1	0,32	-0,1	0,23

5.5.4 - Verificação da sub-bacia do córrego Rodeador

A verificação do ajuste do modelo SWAT foi feita também para a sub-bacia do córrego Rodeador (SBCR), e a avaliação gráfica diária e mensal para o período de 2005 a 2013 são apresentadas nas Figura 50 e Figura 51 respectivamente.

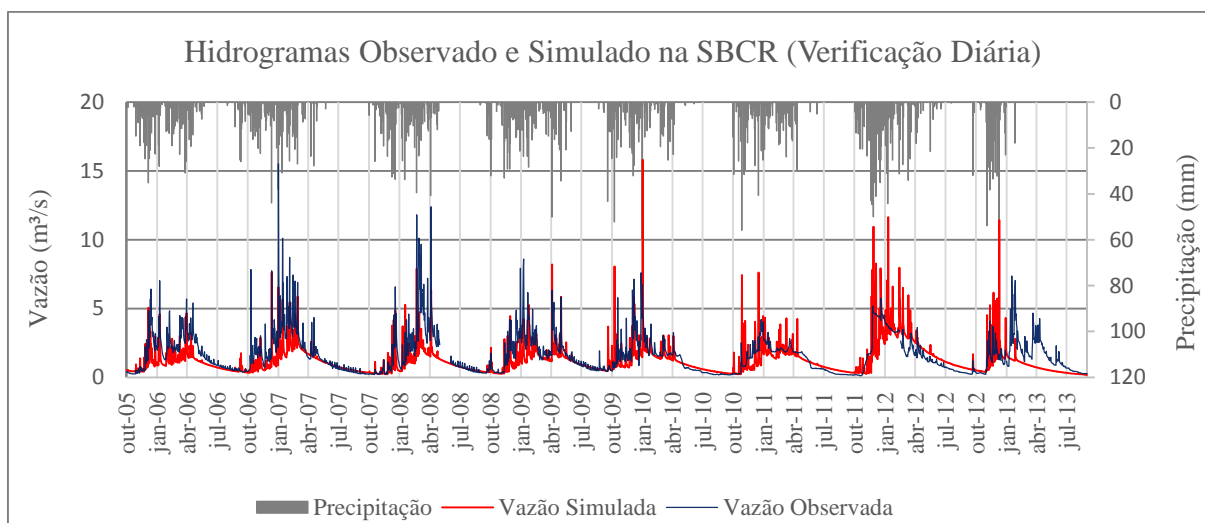


Figura 50 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado da verificação diária na SBCR (2005-2013) com o ajuste dos parâmetros calibrados na SBRD.

Nota-se que o comportamento do hidrograma simulado em relação ao observado é bastante coerente, porém percebem-se comportamentos atípicos na vazão observada no início dos anos hidrológicos 2010-2011 e 2011-2012, em que não foram observados picos durante a estação chuvosa.

É possível observar que nos períodos de estiagem, a cada 7 dias ocorre um aumento de aproximadamente 0,3 a 0,5 m³/s acima da média no período. Isso possivelmente ocorre

porque a retirada de água pelo canal de irrigação implantado na bacia normalmente não acontece nos domingos. Porém, como o SWAT computa apenas os valores mensais de retirada de água do canal, se torna impossível simular essa característica típica dessa retirada de água. Não se constatou, no entanto, que esse erro fosse decisivo na simulação.

O erro relativo encontrado por Barnez (2004) na obtenção da vazão máxima na SBCR foi de 58,45%, na obtenção do deflúvio mensal esse erro foi de 4%, enquanto na obtenção do deflúvio anual foi de 4,18% no período avaliado.

Portanto, a análise mensal do hidrograma observado e simulado é apresentada na Figura 51.

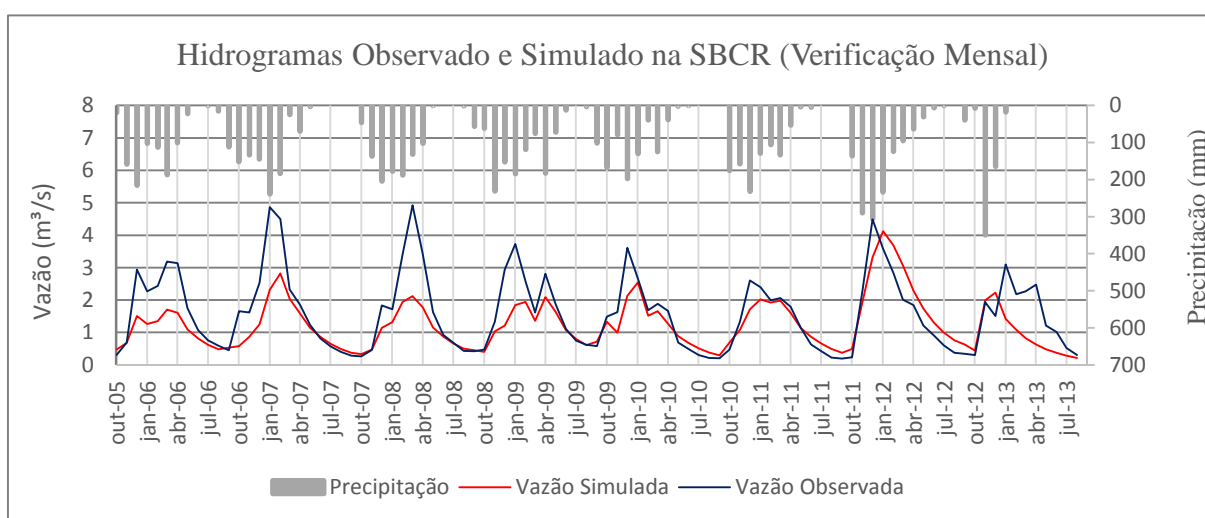


Figura 51 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado da verificação mensal na SBCR (2005-2013) com o ajuste dos parâmetros calibrados na SBRD.

Na avaliação mensal é possível observar que o SWAT, inversamente ao que vinha ocorrendo com as demais bacias, simulou melhor os fluxos baixos do que os fluxos altos.

Os valores estatísticos computados para cada situação é mostrado na Tabela 21.

Kannan *et al.* (2007), avaliando a sensibilidade de alguns parâmetros do SWAT na simulação de componentes isolados do ciclo hidrológico, constataram maiores dificuldades em calibrar o modelo SWAT no período úmido que no período seco. Porém, ressaltam que no seu estudo o CN2 não foi constatado como um parâmetro sensível à simulação da vazão.

Sendo assim, a diminuição no valor do CN2 na SBCR em 23,29% pode ter atuado de maneira negativa na modelagem.

A vazão total durante as estações de chuva foi subestimada em 31,5%. O percentual residual médio durante todo o período simulado foi de 34,3%.

Tabela 21 - Avaliação estatística do coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE) e do coeficiente de determinação (R^2) na verificação da SBCR.

SBCR	2005 a 2010		2010 a 2013	
	NSE	R^2	NSE	R^2
Diária	0,44	0,6	0,07	0,33
Mensal	0,48	0,82	0,57	0,6

Estatisticamente é possível verificar a eficiência do modelo SWAT em simular a vazão na SBCR quando apenas calibrado para a SBRD.

Como se esperava, os valores estatísticos não foram tão bons no período de 2010 a 2013, possivelmente pela análise descrita acima.

Na avaliação mensal da reprodução da calibração, obteve-se que até 82% da variabilidade dos valores simulados puderam ser explicados pela variabilidade dos valores observados.

Vale ressaltar que o valor de NSE computado durante o período de 2005 a 2010 na SBCR foi inclusive superior ao encontrado na calibração da SBRD, de 0,4.

Dessa maneira, se vê como possível a reprodução dos valores calibrados na SBRD para a modelagem da SBCR com o SWAT.

5.5.5 - Verificação da sub-bacia do córrego Capão Comprido

Similarmente, a simulação da sub-bacia do córrego Capão Comprido (SBCCC) foi verificada com a alteração dos parâmetros obtidos na calibração da SBRD.

O hidrograma observado e simulado é apresentado na Figura 52.

Constata-se que as vazões observadas durante os períodos de chuva não apresentam picos. Isso pode ser explicado, de forma similar à SBCO, porque a pequena área de contribuição dessa sub-bacia, em que o tempo de concentração é bastante pequeno e apresenta elevada velocidade do escoamento, dificulta o registro do evento nos dois únicos momentos ao longo do dia em que são feitas as medições de vazão.

Barnez (2004), avaliando a metodologia de leitura da CAESB, relatou que na SBCCC um erro relativo de 78,03% foi atribuído na obtenção da vazão máxima no período estudado.

A influência dessa subestimativa nos valores de vazão alta é explicitada no gráfico acima. Dessa maneira, o SWAT não simulou satisfatoriamente a vazão diária na SBCCC.

A fim de avaliar a descarga mensal apresenta-se a Figura 53.

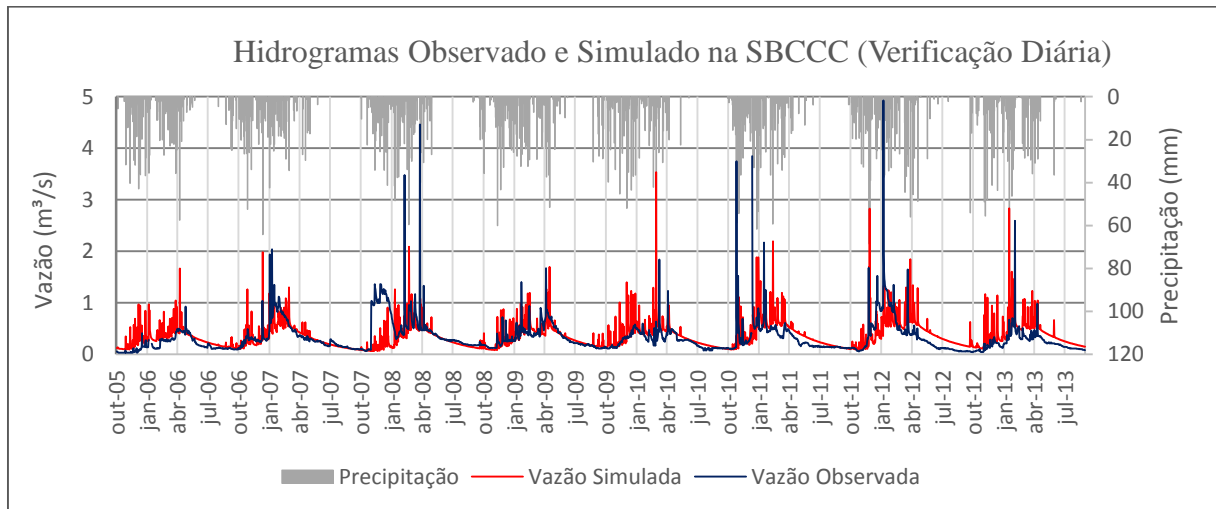


Figura 52 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado da verificação diária na SBCCC (2005-2013) com o ajuste dos parâmetros calibrados na SBRD.

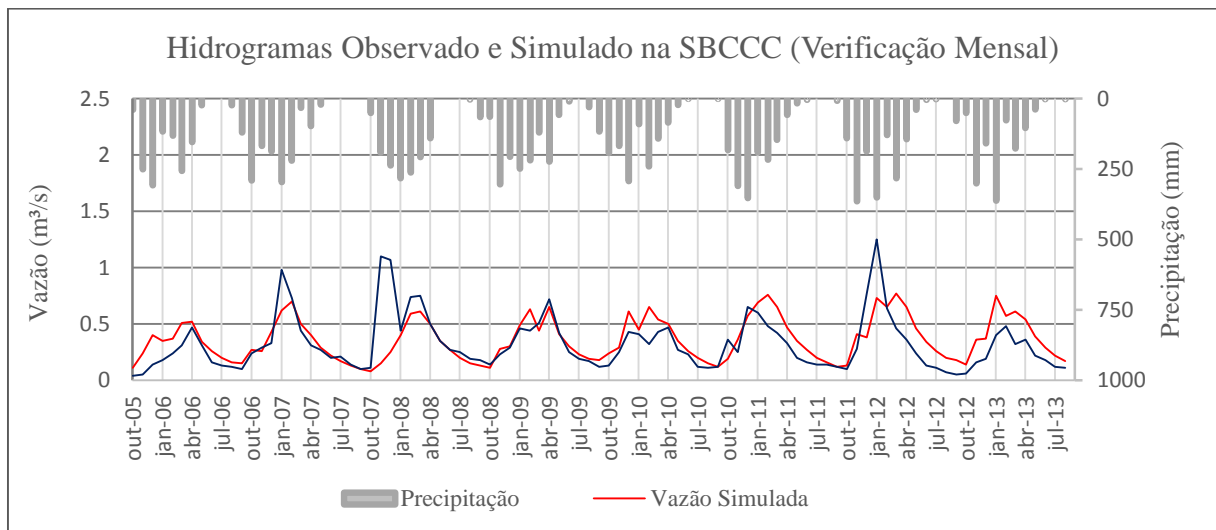


Figura 53 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado da verificação mensal na SBCCC (2005-2013) com o ajuste dos parâmetros calibrados na SBRD.

Nota-se uma maior conformação entre os valores observados e simulados na avaliação mensal. A média de erro na obtenção do deflúvio mensal avaliado por Barnez (2004) na SBCCC foi de 4,8%, o que de certa forma também justifica a melhora nos índices estatísticos de eficiência do modelo apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Avaliação estatística do coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE) e do coeficiente de determinação (R^2) na verificação da SBCCC.

SBCCC	2005 a 2010		2010 a 2013	
	NSE	R^2	NSE	R^2
Diária	-0,004	0,17	-0,04	0,2
Mensal	0,34	0,36	0,33	0,51

O modelo SWAT não simulou satisfatoriamente a vazão diária em ambos os períodos analisados, sendo que o NSE se manteve negativo e o maior R^2 foi 0,2, o que indica que dos 2884 valores de vazão analisados, aproximadamente 2308 dos casos não foram explicados pela variação dos valores observados referentes.

Com relação à análise mensal, se obteve uma melhora expressiva em ambos os coeficientes estatísticos, e o modelo simulou de maneira eficiente a vazão observada nos períodos analisados. Dessa maneira, a calibração feita na SBRD serviu para a SBCCC apenas quando analisado o fluxo mensal.

5.5.6 - Verificação da sub-bacia do Ribeirão das Pedras

Por fim, a simulação da sub-bacia do Ribeirão das Pedras (SBRP) também foi verificada com a alteração dos parâmetros obtidos na calibração da SBRD durante os anos hidrológicos de 2005 a 2010.

O hidrograma observado e simulado obtido durante essa análise é apresentado na Figura 54.

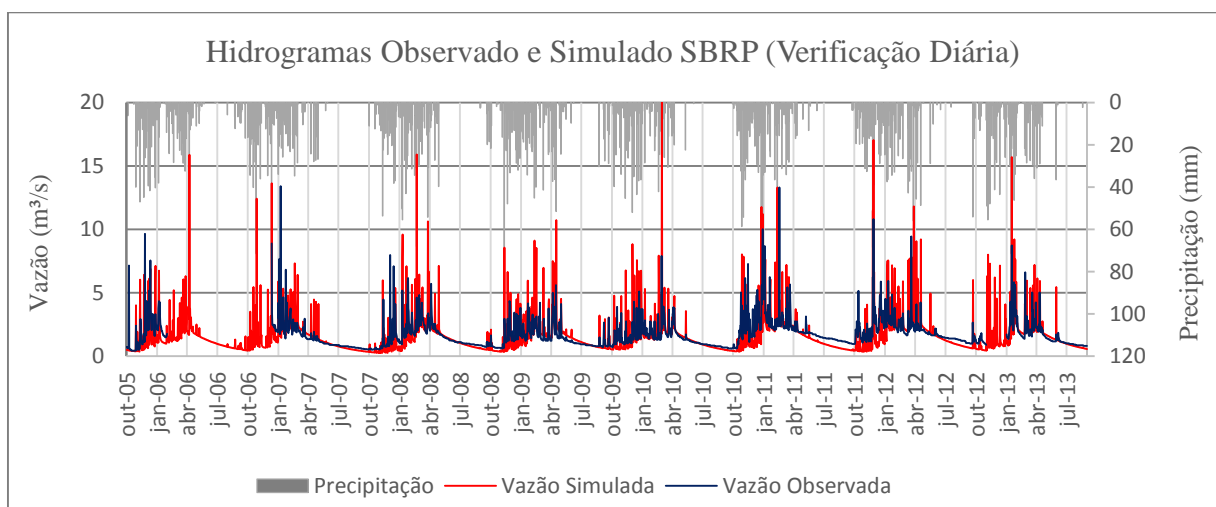


Figura 54 - Hietograma e hidrogramas observado e simulado da verificação diária na SBRP (2005-2013) com o ajuste dos parâmetros calibrados na SBRD.

Nessa sub-bacia constata-se que o SWAT obteve uma boa resposta do comportamento geral do sistema, porém diversos picos simulados pelo modelo não foram observados em campo. Nota-se, ainda, que no final do período de seca dos anos avaliados o SWAT não respondeu coerentemente ao comportamento observado, subestimando a vazão nesse estágio em todos os anos.

Na análise feita por Barnez (2004) na SBRP, o erro relativo na obtenção da vazão máxima foi de 73,93% pelo método utilizado pela CAESB, o que de certa forma pode justificar a valorização dos picos na simulação pelo modelo.

Também de acordo com o trabalho de Barnez (2004), a média do erro na obtenção do deflúvio mensal na SBRP pela metodologia aplicada foi de apenas 4,93%. Enquanto para a quantificação do deflúvio anual foi de 4,38%.

Com o intuito de avaliar a resposta da calibração diária na vazão média mensal apresenta-se o gráfico exposto na Figura 55.

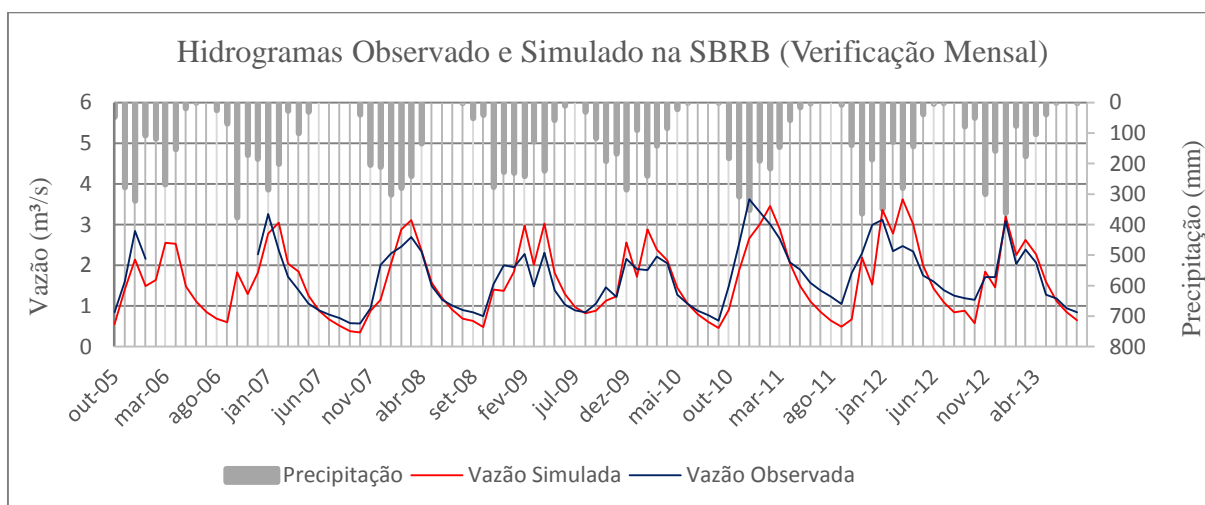


Figura 55 - Hidrograma e hidrogramas observado e simulado da verificação mensal na SBRP (2005-2013) com o ajuste dos parâmetros calibrados na SBRD.

A melhoria na análise mensal das vazões observadas e simuladas é estatisticamente comprovada pelos coeficientes apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Avaliação estatística do coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE) e do coeficiente de determinação (R^2) na verificação da SBRP.

SBRP	2005 a 2010		2010 a 2013	
	NSE	R^2	NSE	R^2
Diária	-0,39	0,32	-0,23	0,43
Mensal	0,39	0,78	0,53	0,71

Como evidenciado anteriormente, nota-se também na análise mensal a dificuldade maior do modelo em simular as baixas vazões, agravada no final do período de seca.

A simulação mensal se mostrou satisfatória, o que indica adequado o uso do modelo SWAT calibrado diariamente para a SBRD, para a modelagem mensal da SBRP.

5.5.7 - Resumo da avaliação de eficiência do modelo SWAT

Um quadro com o resumo dos resultados estatísticos de eficiência obtidos nas análises de verificação do modelo SWAT nas sub-bacias é apresentado na

Tabela 24 – Quadro resumo dos resultados estatísticos obtidos nas análises de verificação do modelo SWAT nas sub-bacias.

Análise		SBRD	SBCC	SBCO	SBCR	SBCCC	SBRP	
2005/2010	Diário	NSE	0,40	-0,20	-0,04	0,44	-0,004	-0,39
		R^2	0,44	0,33	0,35	0,60	0,17	0,32
	Mensal	NSE	0,65	0,63	-0,1	0,48	0,34	0,39
		R^2	0,66	0,73	0,32	0,82	0,36	0,78
2010/2013	Diário	NSE	0,48	-0,50	-0,39	0,07	-0,04	-0,23
		R^2	0,46	0,72	0,23	0,33	0,2	0,43
	Mensal	NSE	0,24	0,43	-0,1	0,57	0,33	0,53
		R^2	0,34	0,82	0,23	0,60	0,51	0,71

Em relação a verificação em nível diário de simulação das cinco sub-bacias não calibradas, observa-se que as respostas dos coeficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe, foram negativas para quatro delas, indicando que o modelo foi insatisfatório em simular a vazão diária quando calibrado para uma outra sub-bacia.

Apenas a SBCR apresentou resultados satisfatórios, inclusive melhores do que os computados na sub-bacia calibrada, a SBRD. Esse resultado superior, pode ter se dado em função da bacia apresentar um canal de retirada de água para irrigação, e que essa retirada não ocorre uma vez por semana, aumentando assim a média da vazão observada no período de seca. Esse nível de detalhe de retirada de água diária não é simulado pelo

modelo, sendo que este leva em consideração apenas a retirada de água mensal, como informação de entrada.

No entanto, na verificação em nível mensal de simulação, constata-se uma melhora nos resultados estatísticos em quatro das cinco sub-bacias avaliadas, alcançando índices de eficiência satisfatórios para a simulação da vazão média mensal pelo modelo SWAT quando calibrado apenas para a SBRD.

A SBCO apresentou resultados insatisfatórios na verificação em nível diário e mensal de simulação. Esse resultado negativo pode ter sido ocasionado por problemas no monitoramento, onde próximo ao ponto de medição existe uma ponte, que resulta em uma possível influência no escoamento na seção, derivando valores observados diferentes dos reais.

5.6 - SIMULAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO

Após a verificação do modelo SWAT para cada sub-bacia estudada, um dos resultados obtidos nas análises foi a estimativa de valores relacionados ao ciclo hidrológico médio de cada unidade hídrica, durante o período de simulação de 2005 a 2013.

A resposta dessa simulação na sub-bacia do Rio Descoberto (SBRD) é mostrada na Figura 56.

Os valores relacionados ao ciclo hidrológico simulado nas sub-bacias foram resumidos e apresentados na Tabela 25.

De acordo com as respostas do modelo, apresenta-se na Tabela 26 algumas relações relevantes correspondentes ao ciclo hidrológico simulado em cada sub-bacia durante os anos de 2005 a 2013.

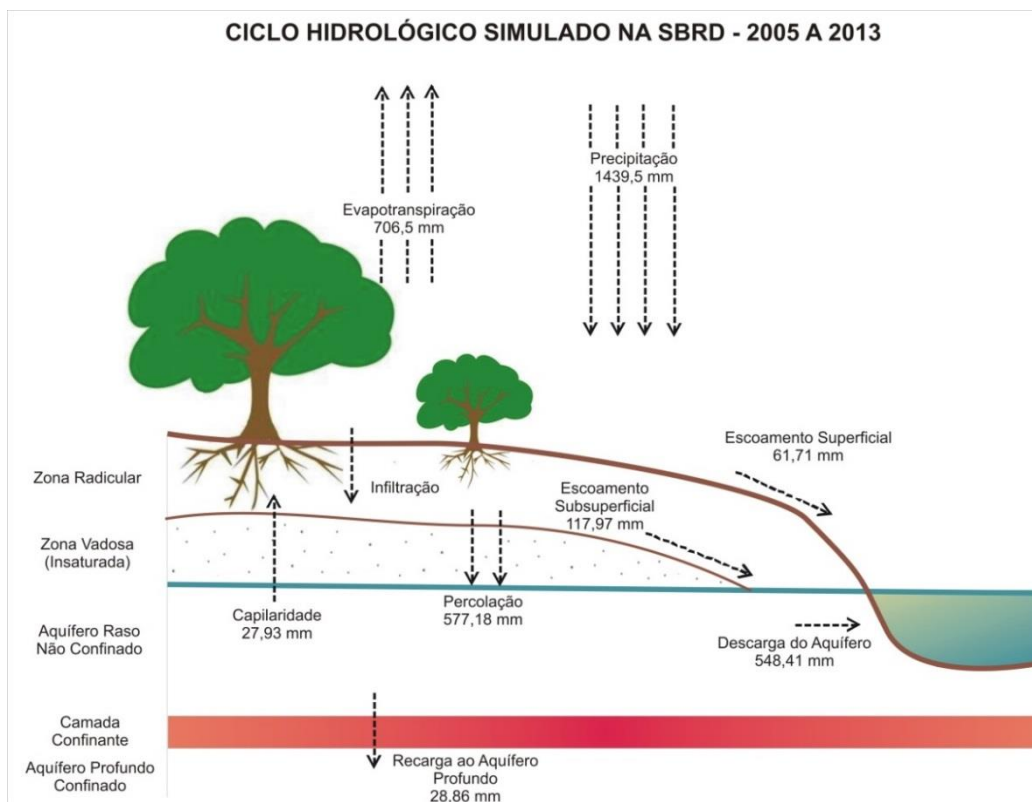


Figura 56 - Ciclo hidrológico simulado na sub-bacia do rio Descoberto (SBRD) no período de 2005 a 2013.

Tabela 25 – Valores relacionados ao ciclo hidrológico simulado nas sub-bacias.

Variável (mm)	SBRD	SBCC	SBCO	SBCR	SBCCC	SBRP
Precipitação	1439,5	1453,1	1571,7	1000,8	1438,3	1446,3
Evapotranspiração	706,5	660,0	629,1	635,5	696,5	765,9
Escoamento Superficial	61,71	175,58	123,92	32,44	42,32	133,86
Escoamento Subsuperficial	117,97	97,22	153,58	71,93	144,8	93,6
Percolação	577,18	547,7	692,41	294,23	572,2	467,12
Capilaridade	27,93	27,75	27,96	27,95	27,75	27,96
Descarga ao Aquífero	548,41	520,49	658,03	279,7	543,64	443,75
Recarga ao Aquífero Profundo	28,86	27,39	34,62	14,71	28,61	23,36

Tabela 26 - Relações do ciclo hidrológico simulado nas Sub-bacias em estudo.

Relações	SBRD	SBCC	SBCO	SBCR	SBCCC	SBRP
Deflúvio/Precipitação	0,51	0,55	0,6	0,38	0,51	0,46
Fluxo de base/Vazão	0,92	0,78	0,87	0,92	0,94	0,80
Percolação/Precipitação	0,40	0,38	0,44	0,29	0,40	0,32
Recarga Aquífero Profundo/Precipitação	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02
Evapotranspiração/Precipitação	0,49	0,45	0,40	0,62	0,49	0,54

Brutsaert (2005) e Tateish (1996), ao fazerem uma comparação de estudos relacionados à evapotranspiração em nível global, obtiveram uma estimativa média de 60 a

65% do total precipitado. Um estudo realizado por Leopoldo *et al.* (1995) na bacia Amazônica demonstra que cerca de 50% da precipitação é evapotranspirada. Neves (2007), na estimativa do balanço hídrico de uma bacia do Amapá, evidencia uma razão entre a evapotranspiração e a precipitação na região de 0,41.

Dados de evapotranspiração para a bacia do Capetinga (DF), obtidos por Lima (2000) no ano hidrológico de 1998/1999, demonstraram uma relação de 78%. Silva e Oliveria (1999), estudando também a bacia do Capetinga (DF), obtiveram uma relação Et/Pcp de 72% para o ano de 1996/1997.

Castro (2013), aplicando o SWAT na bacia hidrográfica do Alto Jardim (DF), encontrou valores em torno de 56%. A relação obtida a partir de valores medidos por Lima (2010), para o mesmo período (2007/2008) e bacia, foi de 71%.

Salles (2012), estudando a bacia do rio Pipiripau (DF), encontrou uma relação Et/Pcp de 49% em simulação com o SWAT.

Neste estudo levaram-se em consideração os valores diários observados de precipitação e vazão e computou-se o balanço hídrico médio nas sub-bacias. Obtiveram-se, assim, as relações Q/Pcp e Et/Pcp referente ao período analisado (oito anos hidrológicos) apresentadas na Tabela 27.

Tabela 27 - Relações Vazão(Q)/Precipitação(Pcp) e Evapotranspiração(Et)/Precipitação(Pcp) nas sub-bacias estudadas de acordo com o balanço hídrico obtido dos valores observados.

Relações	Q/Pcp	Et/Pcp
SBRD	0,47	0,53
SBCC	0,48	0,52
SBCO	0,53	0,47
SBCR	0,45	0,55
SBCCC	0,43	0,57
SBRP	0,47	0,53
Média	0,46	0,54

A fim de comparar graficamente as relações Q/Pcp e Et/Pcp calculadas por meio do balanço hídrico e simuladas pelo SWAT nas sub-bacias estudadas, apresenta-se as Figura 57 e Figura 58.

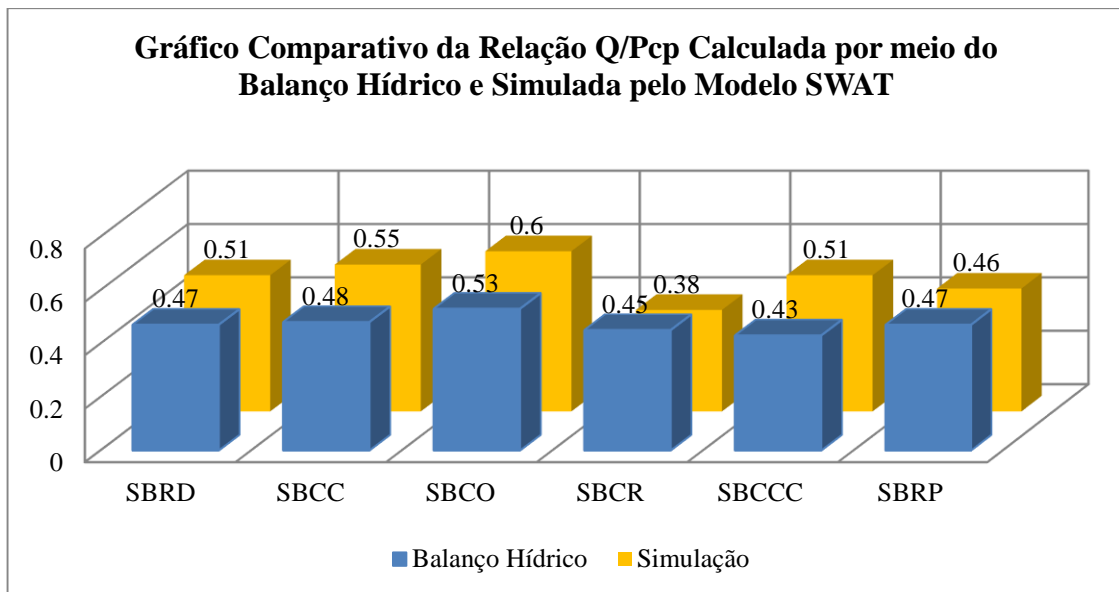


Figura 57 – Gráfico comparativo da relação Q/Pcp calculada por meio do balanço hídrico e simulada pelo modelo SWAT nas sub-bacias para os anos hidrológicos do período de 2005 a 2013.

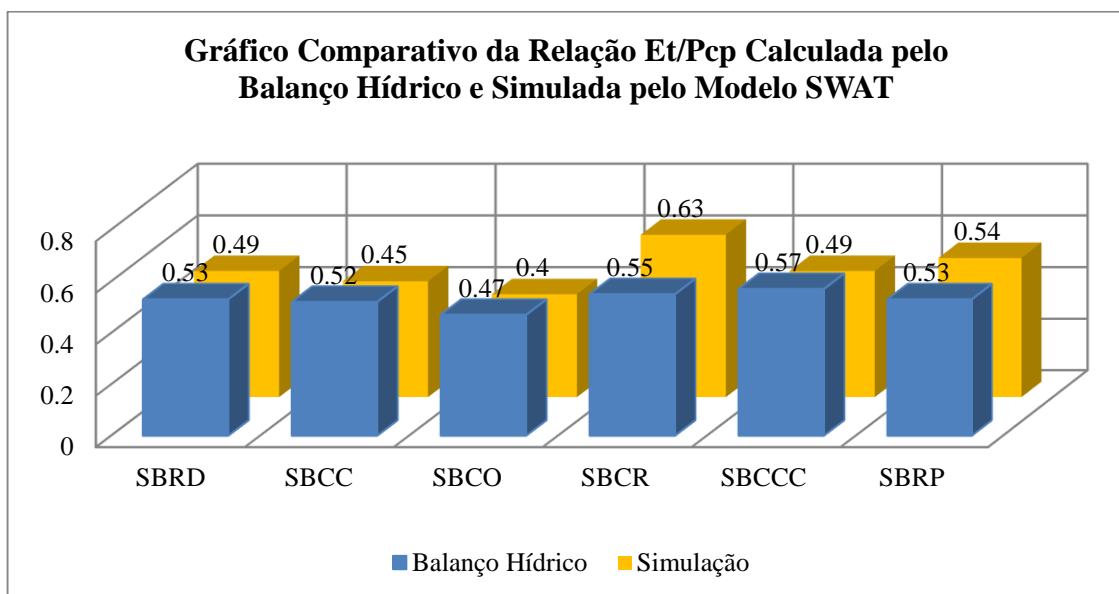


Figura 58 - Gráfico comparativo da relação Et/Pcp calculada por meio do balanço hídrico e simulada pelo modelo SWAT nas sub-bacias para os anos hidrológico do período de 2005 a 2013.

Comparando a relação Q/Pcp calculada por meio do balanço hídrico com a simulada pelo SWAT é possível observar que a diferença máxima foi de 7% em 3 sub-bacias e de 8% em uma única sub-bacia, as demais apresentaram um erro inferior. A sub-bacia que apresentou maior similaridade entre as relações foi a SBRP, com apenas 1% de diferença. Diferenças eram esperadas, pois, como visto anteriormente na etapa de calibração e verificação, o modelo apresentou discrepâncias entre a simulação e a realidade observada.

No que diz respeito à relação Et/Pcp constata-se, conseqüentemente, diferenças similares às computadas na análise anterior, porém inversas. Vale ressaltar que a relação Et/Pcp do balanço hídrico variou entre 0,47 e 0,57, o que, de certa forma, explica por que a modelagem não alcançou os valores registrados em outros estudos no DF.

Tendo em vista os possíveis erros na obtenção dos valores observados de vazão (Barnez, 2004), utilizados no cálculo do balanço hídrico, infere-se que não é possível considerar a evapotranspiração calculada como a real, diferentemente dos valores obtidos por Lima (2000, 2010) e Silva e Oliveira (1999). Porém isso, de certa forma, explica por que o modelo SWAT não levou a valores mais altos de evapotranspiração, como os registrados.

Segundo Neitsh *et al.* (2005) a fase terrestre do ciclo hidrológico simulado pelo SWAT é baseada na equação do balanço hídrico, que é responsável por todo o restante que ocorre na bacia hidrográfica.

Estudos realizados por SANTOS (2012) na SBCCC mostraram que a recarga ao aquífero raso no ano hidrológico de 2007/2008 foi de 535,5 mm e em 2008/2009 foi de 659,7 mm, enquanto a simulação com o modelo SWAT apresentou uma recarga média de 572,2 mm para todo o período em estudo (2005-2013), mostrando assim coerência do modelo ao simular a recarga ao aquífero raso.

Por se tratar de um modelo semidistribuído, apresenta-se na Figura 59, Figura 60 e Figura 61 os mapas espacializados de escoamento superficial, evapotranspiração e percolação, simulados pelo SWAT no ano de 2012 nas sub-bacias estudadas.

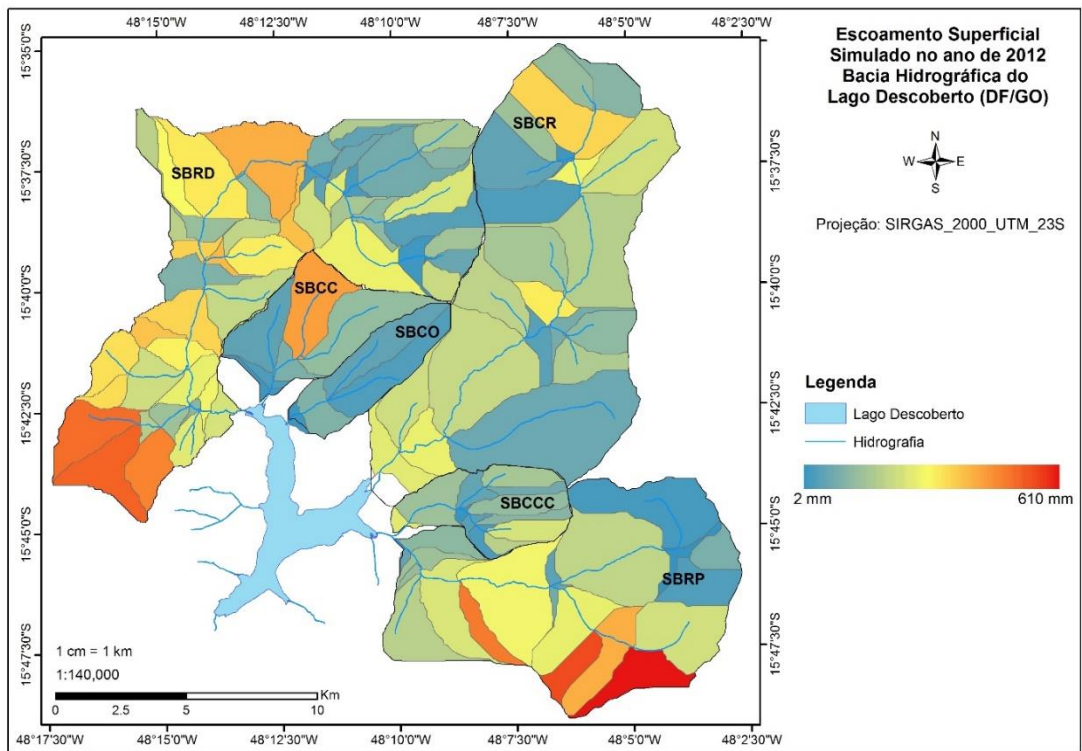


Figura 59 - Espacialização do escoamento superficial simulado no ano de 2012 nas sub-bacias estudadas.

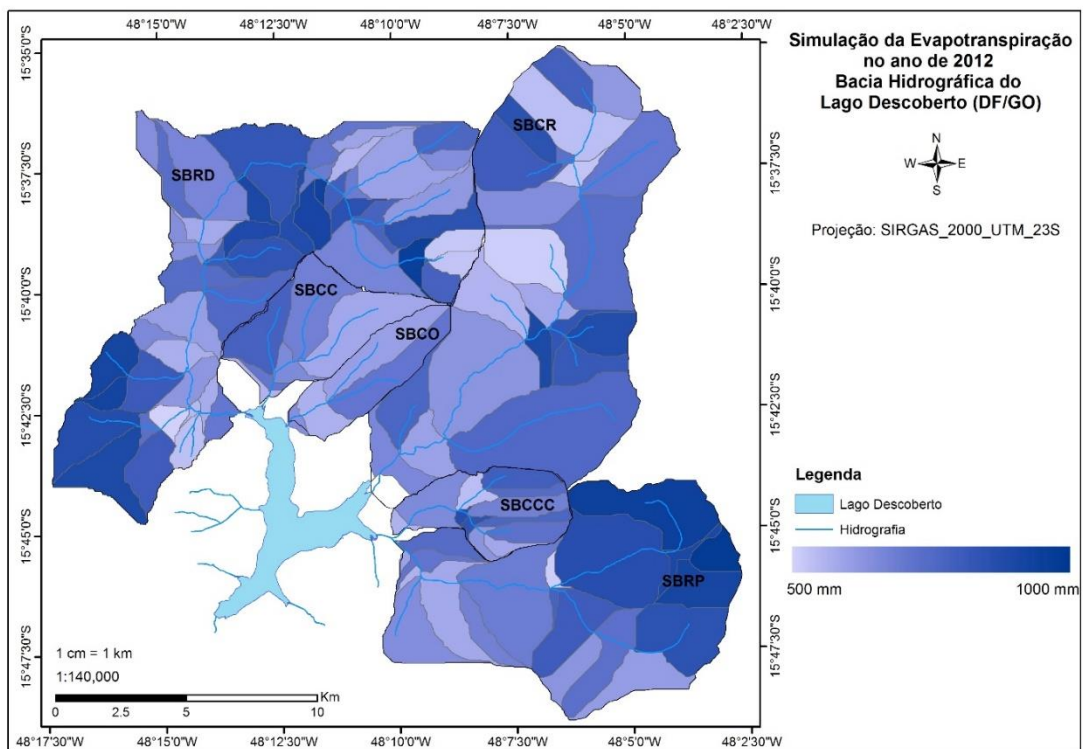


Figura 60 - Espacialização da evapotranspiração real simulada no ano de 2012 nas sub-bacias estudadas.

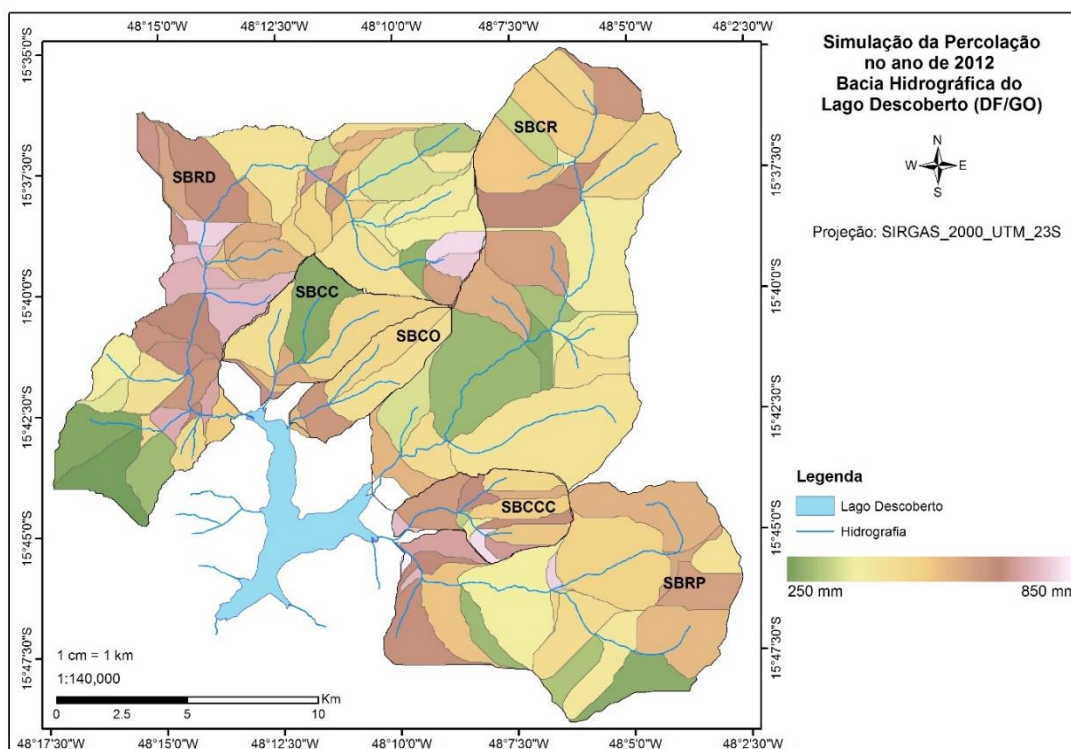


Figura 61 - Espacialização da percolação simulada no ano de 2012 nas sub-bacias estudadas.

A simulação do escoamento superficial nas sub-bacias analisadas variou de 2 a 610 mm. Observa-se na Figura 59 diversos pontos de maior produção, principalmente nas SBRP e SBRD. Na SBCC apenas a área urbana referente à região administrativa de Brazlândia apresentou valores altos.

As SBCCC, SBCO e SBCR apresentam valores de escoamento inferiores a 300 mm nas suas subáreas de drenagem. Isso é coerente com a percentagem de áreas impermeáveis nas bacias, que correspondem respectivamente a valores de 2,1%, 0,8% e 0,8% da área de drenagem com mais de 30% de impermeabilização. De forma similar, as SBRP e SBRD apresentam o maior índice de áreas com mais de 30% de impermeabilização, 14,1% e 7,4% respectivamente. Destaca-se ainda que a SBRP apresenta 11,7% de áreas com mais de 70% de impermeabilização.

Com relação à evapotranspiração apresentada na Figura 60 e, conforme a discussão anterior sobre o tópico, a SBCR e a SBRP são as que apresentam maiores taxas de evapotranspiração, de 63% e de 54% respectivamente. Porém nota-se que os pontos de maior evapotranspiração estão a montante da SBRP. Essa área em destaque está dentro da Floresta Nacional de Brasília, caracterizada por reflorestamento de pinus e eucalipto.

Conseqüentemente, são apresentadas na Figura 61 as taxas de percolação simulada para o mesmo ano avaliado, sendo possível notar a relação inversa das áreas de maior

escoamento e menor percolação. As áreas de maior percolação acontecem na SBRD, SBCCC e SBRP, porém é nas SBRD, SBCO e SBCCC que ocorre maior percolação total. Na SBCO, de acordo com a simulação, 44% do total precipitado percola, enquanto na SBRD e SBCCC essa taxa é de 40%. A SBCR é a que apresenta menor índice, de 29%, possivelmente por ser a bacia com maior percentagem de evapotranspiração. As demais relações foram apresentadas na Tabela 26.

Em relação aos sedimentos, apenas a SBCCC apresenta valores diários observados em campo. Lopes (2010) desenvolveu a curva-chave para a obtenção da carga de sedimentos produzida na bacia. Seu estudo foi durante o ano hidrológico de 2008/2009 e a carga total observada nesse período foi de 1553 toneladas de sedimentos no exutório da bacia. A carga de sedimentos simulada para esse mesmo ano hidrológico na SBCCC foi de 581 toneladas, o que corresponde a apenas 37,4% da carga observada, indicando que o modelo requer calibração dos parâmetros influentes na produção de sedimentos para sua aplicação propriamente dita na simulação da carga sólida.

5.7 - OUTROS RESULTADOS

Com o intuito de obter melhores resultados na simulação das sub-bacias, tentou-se realizar a calibração das mesmas por meio de 1200 interações dos parâmetros e intervalos utilizados na calibração da SBRD, descritos no item 5.4 - . Os resultados estatísticos de NSE foram iguais ou muito similares aos encontrados na simulação feita apenas com a verificação dos valores dos parâmetros conforme a calibração da SBRD, apresentada nesse trabalho no item 5.5 - . Foi possível notar, porém, que houve alterações no hidrograma simulado e diferentes respostas de sensibilidade dos parâmetros.

6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Inicialmente foi realizada a caracterização das sub-bacias hidrográficas, incluindo a parametrização do modelo SWAT para adaptação à área estudada. O desempenho inicial do modelo SWAT foi avaliado com o intuito de verificar as dificuldades em simular determinados processos hidrológicos sem a calibração dos parâmetros. Com isso e com base em diversos testes e estudos feitos previamente, foi feita a escolha dos parâmetros para a calibração e a determinação dos intervalos dentro de limites fisicamente possíveis para a análise de sensibilidade. A calibração do modelo em nível diário foi realizada apenas para uma sub-bacia em um período de 5 anos hidrológicos. Foi realizada a verificação desse ajuste para todas as sub-bacias estudadas em nível diário e mensal. Posteriormente, a análise do ciclo hidrológico simulado foi feita para cada sub-bacia.

A caracterização detalhada da bacia estudada e a interpretação da modelagem inicial permitiram que a escolha dos parâmetros e a análise de sensibilidade do modelo fossem feitas de forma diferenciada ao *default* do SWAT. Normalmente, a análise de sensibilidade do modelo é feita com 27 parâmetros e intervalos padronizados. Porém, fundamentada em outros trabalhos já realizados, e avaliando o comportamento do sistema hídrico e as dificuldades iniciais do modelo em simular principalmente as vazões de recessão, foi possível a escolha de 14 parâmetros, dos quais 9 estão entre os 27, que apresentariam um grau de importância maior na simulação da variável nesse caso em estudo.

Esse processo mostrou-se de fundamental relevância em todas as etapas da modelagem, incluindo a calibração, verificação e aplicação, propriamente dita, do modelo SWAT nas bacias estudadas, além de diminuir o tempo despendido no desenvolvimento computacional.

Portanto, é de suma importância que os modeladores interpretem o sistema hídrico em simulação, analisem o comportamento inicial do modelo e a partir disso escolham os parâmetros que podem ser importantes em seu estudo de caso, incluídos ou não dentre os *defaults*. Além disso, as variações dos parâmetros devem ser impostas em função dos limites físicos do parâmetro e não uma variação percentual fixa.

A modelagem hidrológica da sub-bacia do rio Descoberto (SBRD) apresentou resultados satisfatórios com relação à vazão simulada em nível de comparação diária após a calibração (2005/2010) dos parâmetros sensíveis. Da mesma forma, resultados condizentes foram encontrados durante o período de verificação (2010/2013).

O modelo apresentou dificuldades em simular o escoamento de base em nível diário, fazendo com que sua utilização para a predição de vazões no final de um período de estiagem seja ruim, o que seria de extrema relevância para o gerenciamento das bacias hidrográficas que são utilizadas para fins de abastecimento. Contudo, a modelagem mensal permitiu a predição do balanço hídrico das bacias hidrográficas, caracterizando-o como uma ferramenta importante na otimização do planejamento e no gerenciamento de um manancial.

Os valores dos parâmetros obtidos na calibração da SBRD em nível diário quando aplicados, para as outras cinco sub-bacias afluentes ao lago Descoberto, não gerou resultados satisfatórios em quatro das cinco sub-bacias avaliadas. Apenas a sub-bacia do córrego Rodeador apresentou o NSE superior a 0,4.

A verificação em nível mensal apresentou resultados aceitáveis para a modelagem em quatro sub-bacias. Apenas na sub-bacia do córrego Olaria (SBCO) a simulação mensal foi insatisfatória, apresentando um NSE de -0,1. Esse resultado inferior, pode ter sido devido a que próximo ao ponto de medição existe uma ponte, resultando em uma possível influência no escoamento na seção e conseqüente erros de medição da vazão real no córrego.

A diferença nos resultados de verificação diária e mensal das cinco sub-bacias pode ter sido resultado do erro médio nas séries observadas das vazões diárias, obtidas a partir de apenas um nível diário do rio, insuficiente para o tamanho das bacias nos períodos chuvosos. Nesses casos a modelagem mensal tende a responder de forma mais coerente à realidade.

Em suma, a utilização dos parâmetros do modelo SWAT calibrados para uma bacia na simulação em nível mensal de outras bacias hidrográficas com características similares se mostrou viável, o que possibilita a simulação em bacias hidrográficas não monitoradas.

O balanço hídrico para todo o período histórico das sub-bacias foi coerente com trabalhos experimentais anteriores. Com relação à recarga ao aquífero raso a diferença foi de 4,23% na sub-bacia do córrego Capão Comprido (SBCCC) (Santos, 2012).

A simulação dos componentes hidrológicos foi espacializada nas sub-bacias e apresentada em formas de mapas, fornecendo assim subsídios para a identificação, dentro das sub-bacias, áreas de maior vulnerabilidade ambiental.

A simulação da carga de sedimentos na SBCCC, única sub-bacia que apresenta dados diários medidos em campo, foi insatisfatória. O SWAT simulou apenas 37,4% da carga total de sedimentos medida no ano hidrológico de 2008/2009.

Para a obtenção do balanço hídrico completo da bacia do lago Descoberto faz-se necessária a aplicação do modelo SWAT para as cinco sub-bacias não monitoradas e das áreas de contribuição direta que deságuam no lago. Por isso, de acordo com os resultados obtidos ao longo do estudo, recomenda-se a utilização da base de dados e a calibração feita para a sub-bacia do Rio Descoberto. Dessa forma pode-se fazer uma verificação qualitativa da eficiência do modelo na simulação em longo prazo, já que se dispõe de dados de acúmulo e consumo do reservatório do Descoberto.

A continuidade do estudo deve ser estendida para a calibração dos parâmetros de influência no cálculo de sedimentos e nutrientes, de acordo com as disponibilidades.

Há a necessidade de se avaliar as incertezas para a compreensão dos limites de aplicabilidade dos resultados simulados e atribuição de maior confiabilidade para seu uso.

E, por fim, de acordo com as dificuldades observadas, verifica-se a necessidade de aprofundar os estudos sobre o efeito dos parâmetros do componente de escoamento de base, e eventualmente alterar a forma de cálculo e estimativa desse componente.

7 - REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, K.C. (2011) SWAT-CUP2009: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – a user manual. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, *Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology*, Duebendorf, Switzerland, 95 p.
- ABBASPOUR, K.C. (2013) SWAT-CUP2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – a user manual. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, *Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology*, Duebendorf, Switzerland, 103 p.
- ABBASPOUR, K.C.; YANG, J.; MXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R. (2007) Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, v. 333, p. 413–430.
- ABBOTT, M. B. (1986) An introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen, ‘SHE’ – 2: Structure of a Physically-Based, Distributed Modelling System. *Journal of Hydrology*, v. 87, p. 61-77
- ADAMOWSKI, J. SUN, K. (2010) Development of a coupled wavelet transform and neural network method for flow forecasting of non-perennial rivers in semi-arid watersheds. *Journal of Hydrology*, v. 390, p. 85–91
- ADRIOLO, M. V., SANTOS, I., GIBERTONI, R. C., CAMARGO, A. S. G. (2008). Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos. In: VI Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas. Belo Horizonte – Minas Gerais. Brasil.
- AGUIAR, R. O. (2011) Estudos de calibração do modelo AVSWAT em bacias hidrográficas do Sul de Minas Gerais, Serra da Mantiqueira. Dissertação de Mestrado. Meio ambiente e Recursos Hídricos. Universidade de Itajubá, 111 p.
- ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; BURMAN, R. D. (1989) Operational estimates of evapotranspiration. *Agronomy Journal*, v. 81, p. 650-662.
- ALLEN, R.G. (1986) A Penman for all seasons. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, v. 112, p. 348-368.
- ANDRADE, M. A. (2011). Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. Dissertação de

- Mestrado. Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, Universidade de Lavras, 103 p.
- ARAGÃO, R.; CRUZ, M.A.S.; AMORIM, J.R.A.; MENDONÇA, L.C.; FIGUEIREDO, E.E.; SRINIVASAN, V.S. (2013) Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, p. 1091-1102.
- ARNOLD, J. G. KINITY, J. R. SRINIVASAN, R. WILLIAMS, J. R., HANEY, E.B. NEITSCH, S. L. (2012b) Input/Output Documentation Version 2012. Texas Water Resources Institute. p. 650.
- 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. (2012a) SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. American Society of Agricultural and Biological Engineers, *Transactions of the ASABE* , v. 55(4), p. 1491-1508.
- ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R. MUTTIAH, R. S. WILLIAMS, J. R. (1998) Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 34, n. 1, p. 1-17.
- ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R. (1987). Validation of SWRRB: Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Water Resources Planning and Management*. ASCE, v. 113, p. 243-256.
- ARNOLD, J.G., FOHRER, N. (2005). SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes*, v. 19, 563-572.
- ASCE (1993) Criteria for evaluation of watershed models. *Journal Irrigation Drainage Eng.*, v. 119, p. 429-442.
- AVILA, V.B. Relação entre o uso e manejo do solo em uma bacia rural e a contribuição de Nitrogênio, fósforo e sedimentos a corpos hídricos. 2005. 114f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental E Recursos Hídricos), Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal. 2005.
- BALDISSERA, G.C. Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and water assessment tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT. 2005. 148f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente), Universidade do Mato Grosso, Cuiabá, Mato Grosso. 2005.

- BALTOKOSKI, V., TAVARES, M. H. F., MACHADO, R. E., OLIVEIRA, M. P. 2010. Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco (PR). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 34: 253-261.
- BARNEZ, A. S. (2004). Análise da influência do intervalo de tempo de registro de dados de linígrafos e pluviógrafos em estudos hidrológicos de pequenas bacias hidrográficas. Dissertação de mestrado, Publicação PTARH.DM-076/2004, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 118 p.
- BARNEZ, B. S. (1940) Discussion on analysis of runoff characteristics by O. H. Meyer. *Transactions of the American Society of Civil Engineers, Transactions of the ASABE* 105, 104-106.
- BATHURST, J. C. (1986) Physically-Based Distributed Modelling of an Upland Catchment using the Système Hydrologique Européen. *Journal of Hydrology*, v. 87, p. 79-102.
- BEASLEY, D. B.; MONKE, E. J.; HUGGINS, L. F. (1977) ANSWERS: A model for watershed planning. *Transactions of the ASABE*, v. 23 (4), p. 938-944.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. (1979) A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences-Bulletin-des Sciences Hydrologiques*, 24, 43-69.
- BICALHO, C.C. Estudo do transporte de sedimentos em suspensão na bacia do rio Descoberto. 2006. 123f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal. 2006.
- BINGER, R. L.; THEURER, F. D. (2001) AGNPS98: A suite of water quality models for watershed use, Proc. 7th Federal Interagency Sedimentation Conference: Sediment monitoring, modelling and managing, Reno, NV.
- BONUMÁ, N. B., REICHERT, J. M., MINELLA, J. P., BARROS, C. A. P., RODRIGUES, M. F., BUARQUE, D. C. 2010. Balanço hídrico e sua relação com a modelagem da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural. In: IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Brasília, Distrito Federal. Brasil.

- BONUMÁ, N.B. (2011) Modelagem do escoamento, da produção de sedimentos e da transferência de fósforo em bacia rural no sul do Brasil. Tese de doutorado. Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, 136 p.
- BOOJI, M. J. (2005) Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions. *Journal of Hydrology* v. 303, pp. 176–198
- BORAH, D. K.; BERA, M. (2004) Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of applications. *Transactions of the ASABE*. American Society of Agricultural Engineers, v. 47(3), p. 789–803.
- BORAH, D. K.; BERA, M.; SHAW, S.; KEEFER, L. (1999) Dynamic modeling and monitoring of water, sediment, nutrients and pesticides in agricultural watersheds during storm events. Contract Rep. No. 655, Illinois State Water Survey, Champaign, Ill.
- BORTOLLOTO, N. L. (2011) Avaliação Hidrossedimentológica da bacia do Rio Cunha, município de Rio dos Cedros, Santa Catarina com o modelo SWAT. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 101 p.
- BOURAOUI, F.; BRAUD, I.; DILLAHA, T.A. (2002). ANSWERS: A nonpoint-source pollution model for water, sediment, and nutrient losses. Chapter 22 in *Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications*, 833-882. V. P. Singh and D. K. Frevert, eds. Highlands Ranch, Colo.: Water Resources Publications.
- BRASIL, Decreto n. 51.517, de 25 de Junho de 1962. Dispõe sobre a criação do Núcleo Colonial Alexandre Gusmão, no Distrito Federal, em terras do Instituto Nacional da Imigração e Colonização, e de outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília.
- BRASIL, Decreto n. 88940, de 07 de novembro de 1983. Dispõe sobre a criação das Áreas de Proteção Ambiental das Bacias dos Rios São Bartolomeu e Descoberto, e de outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília.
- BRASIL, Decreto s/n, de 28 de abril de 1999. Dispõe sobre a criação da criação da FLONA de Brasília, e de outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, disponível em: <http://presrepublica.jusbrasil.com.br/legislacao/117676/decreto-99>, acesso em: 23 de abril de 2013.

- BROWN, L. C.; T. O. BARNWELL. (1987) The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: documentation and user manual. Env. Res. Laboratory. US EPA, EPA /600/3-87/007, Athens, GA, p. 189.
- CAESB – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. Produtos e Serviços - Água e Esgotos no Distrito Federal. Disponível em: <<http://www.caesb.df.gov.br/>>. Acesso em maio de 2013.
- CASTRO, K. B. (2011) Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada. Brasília: UnB, 2013. Dissertação de Mestrado, 122 p.
- CHEN, J.; WU, Y (2012) Advancing representation of hydrologic processes in the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) through integration of the TOPographic MODEL (TOPMODEL) features. *Journal of Hydrology*, v. 420–421, p. 319–328.
- CONCEIÇÃO, G. KOBİYAMA, M. BELLI FILHO, P. MIRANDA, C.R. MULLINARI, M. Simulação de vazão e sedimento em bacia hidrográfica rural com alta concentração de suínos e diferentes usos do solo. X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Foz do Iguaçu, 2012.
- CRAWFORD, N. H.; LINLEY JR, R. K. (1966) Digital simulation in hydrology: Stanford Watershed Model IV. Department of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, CA, Tech. Rep. N. 39.
- CUMMINGS, N. W. (1935) Evaporation from water surfaces: Status of present knowledge and need for further investigations. *Trans., Am. Geophys. Union*, 507–510.
- De VITO, M. Avaliação do risco de contaminação de mananciais hídricos para o abastecimento: o caso da bacia da barragem do Descoberto. 2007. 181f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal. 2007.
- DEBELE, B., R. SRINIVASAN, AND J. Y. PARLANGE. (2008) Coupling upland watershed and downstream waterbody hydrodynamic and water quality models (SWAT and CE-QUAL-W2) for better water resources management in complex river basins. *Environmental Modeling & Assessment*, v. 13(1), p. 135-153.
- DINGMAN, S.L. 1994. Physical hydrology. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.
- DOUGLAS-MANKIN, K.R.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J.G. (2010) Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: Current developments and applications. *Trans. ASABE*, v. 53(5), p. 1423-1431.

- DURÃES, M. F.; MELLO, C. R.; NAGHETTINI, M. (2011) Applicability of the SWAT model for hydrologic simulation in Paraopeba River Basin, MG. *Cerne*, v .17, p. 481-488.
- EASTON, Z.M.; FUKA, D. R.; WALTER, M. T.; COWAN, M. D.; SCHNEIDERMAN, E. M.; STEENHUIS, T. S. (2008) Re-conceptualizing the soil and water assessment tool (SWAT) model to predict runoff from variable source areas. *Journal of Hydrology*, v. 348, p. 279– 291
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1978). Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de solos. Boletim Técnico n° 53, 466 p.
- ENGEL, B. A., R. SRINIVASAN, J. G. ARNOLD, C. REWERTS, AND S. J. BROWN. 1993. Nonpoint-source (NPS) pollution modeling using models integrated with geographic information systems (GIS). *Water Science and Technology*, v. 28(3-5), p. 685-690.
- ENGEL, B., D. STORM, M. WHITE, J. ARNOLD, AND M. ARABI. (2007) A hydrologic/water quality model application protocol. *J. American Water Resour. Assoc.* 43(5): 1223-1236.
- EPA - Environmental Protection Agency (2001). Benchmark Report for the EPA BASINS Decision Support Tool, disponível em: <http://appliedsciences.nasa.gov/pdf/09BASINSBenchmarkreport.pdf>, acesso em julho de 2013.
- ESCARIÃO, R. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; AZEVEDO, J. R. G.; NETO, A. R. (2012) Influência do Modelo Hidrológico na Avaliação da Sensibilidade dos Recursos Hídricos a Cenários de Mudanças Climáticas em Região Semiárida. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, n.3, p. 81-91
- FAIR, G. M., AND HATCH, L. P. (1933) Fundamental factors governing the streamline flow of water through sand. *Journal American Water Works Association*, v. 25, p. 1551–1565.
- FARAMARZI, M.; ABBASPOUR, K. C.; VAGHEFI, S. A.; FARZANEH, M. R.; ZEHNDER, A. J. B.; SRINIVASAN, R.; YANG, H. (2012) Modeling impacts of climate change on freshwater availability in Africa. *Journal of Hydrology* v. 480, p. 85–101
- FERRIGO, S. 2011. Utilização do modelo SWAT na estimativa de produção de sedimentos na bacia do córrego capão comprido no Distrito Federal. Trabalho de

- Conclusão do Curso, Instituto de Agronomia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC. 90 p.
- FERRIGO, S.; MINOTI, R. T.; KOIDE, S. (2011) Utilização do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na estimativa de produção de sedimentos decorrentes de diferentes cenários de uso do solo na bacia do córrego Capão Comprido no Distrito Federal. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió. Anais Porto Alegre: ABRH.
- FERRIGO, S.; MINOTI, R.; ROIG, H. L.; KOIDE, S. (2012) Análise do modelo SWAT na simulação de produção de sedimentos quando calibrado unicamente para a vazão em uma pequena bacia hidrográfica rural. X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Foz do Iguaçu, p. 1-18.
- FERRIGO, S.; MINOTI, R.; ROIG, H.; KOIDE, S. (2013) Avaliação da utilização de diferentes métodos na calibração automática do modelo SWAT. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves, Brasil, 8 p.
- FIORI, J.P.O.; CAMPOS, J.E.G.; ALMEIDA, L. (2010) Variabilidade da condutividade hidráulica das principais classes de solos do estado de Goiás. São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 29, n. 2, p. 229-235.
- FLANAGAN, D.C. e NEARING, M.A. (1995). USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Report No. 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. West Lafayette, Indiana.
- FRAGOSO, M.M.A. Estudo Hidrológico e de Transporte de Sedimento em uma Bacia do Bioma Cerrado: Bacia do Córrego Capão Comprido/Distrito Federal. 2007. 102f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal. 2007.
- FRANCHINI, M.; BERNINI, A.; BARBETTA, S.; MORAMARCO, T. (2011) Forecasting discharges at the downstream end of a river reach through two simple Muskingum based procedures. *Journal of Hydrology*, v. 399, p. 335–352.
- GARBOSSA, L. H. P.; BLAINSKI, E.; JUSTEN, J. G K.; VASCONCELOS, L. R. 2010. Potencial de uso de modelo hidrológico de base física na avaliação da legislação florestal e seus impactos nos cenários hidrológicos. In X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Fortaleza – Ceará. Brasil.
- GARBOSSA, L.H.P.; VASCONCELOS, L.R.C.; LAPA, K.R.; BLAINSKI, E.; PINHEIRO, A. (2011) The use and results of the Soil and Water Assessment Tool

- in Brazil: A review from 1999 until 2010. 2011 International SWAT Conference & Workshops, Toledo – Espanha, p. 27.
- GASSMAN, P. W., M. REYES, C. H. GREEN, AND J. G. ARNOLD. (2007) The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future directions. *Transactions of the ASABE*, v. 50(4), p. 1211- 1250.
- GAUTAM, B (2012) Modelling streamflow from forested watersheds on the Canadian Boreal shield using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Tese de mestrado. Departamento de engenharia Civil e Geológica. Universidade de Saskatchewan. 141 p.
- GIRI, S.; NEJADHASHEMI, P.; WOZNICKI, S. (2011) Evaluation of targeting methods for implementation of best management practices in the Saginaw River Watershed. *Journal of Environmental Management*, v. 103, p. 24-40
- GLAVAN, M.; WHITE, S. M.; HOLMAN, I. P. (2012) Water quality targets and maintenance of valued landscape character e Experience in the Axe catchment, UK. *Journal of Environmental Management*, v. 103, p. 142-153
- GÖMANN, H.; KREINSA, P.; KUNKELB, R.; WENDLAND, F. (2005) Model based impact analysis of policy options aiming at reducing diffuse pollution by agriculture a case study for the river Ems and a sub-catchment of the Rhine. *Environmental Modelling & Software*, v. 20, p. 261-271
- GREEN, C. H.; GRIENSVEN, A. V. (2008) Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds. *Environmental Modelling and Software*, v. 23, p. 422-434.
- GREEN, W. H. e AMPT, G. A (1911). Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. *The Journal of Agricultural Science*, v. 4(1), p. 1-24.
- GUPTA, H. V., S. SOROOSHIAN, AND P. O. YAPO (1998) Toward improved calibration of hydrologic models: multiple and noncommensurable measures of information, *Water. Resour. Res.*, 34:751-763.
- GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. (1999) Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 4, n 2, p. 1-9.
- HARGREAVES, G.H. AND Z.A. SAMANI. (1982) Estimating potential evapotranspiration. Tech. Note, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 108(3), p. 225-230.
- HORTON, R. E. (1919) Rainfall interception. *Monthly Weather Review*, v. 47, 603–623.

- HORTON, R. E. (1933) The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions American Geophysical Union*, v. 145, p. 446–460.
- HOSSEINI, M.; AMIN, MSM.; GHAFOURI, A.M.; TABATABAEI, M.R. (2011). Application of Soil and Water Assessment Tools Model for Runoff Estimation. *American Journal of Applied Sciences*, v. 8, n. 5, p. 486-494.
- HU, Y.; MOIWO, J. P.; YANG, Y.; HAN, S.; YANG, Y. (2010). Agricultural water-saving and sustainable groundwater management in Shijiazhuang Irrigation District, North China Plain. *Journal of Hydrology*, v. 393-394, p. 219–232.
- IM, S.; BRANNAN, K.; MOSTAGHIMI, S.; CHO, J. (2003) A Comparison of SWAT and HSPF Models for Simulating Hydrologic and Water Quality Responses from an Urbanizing Watershed. ASAE Annual International Meeting Sponsored by ASAE Riviera Hotel and Convention Center Las Vegas, Nevada, USA, p. 27- 30.
- JACOB, C. E. (1943) Correlation of groundwater levels and precipitation on Long Island, New York: 1. Theory. *Transactions American Geophysical Union*, v. 24, p. 564–573.
- JACOB, C. E. (1944) Correlation of groundwater levels and precipitation on Long Island, New York: 2. Correlation of data. *Transactions American Geophysical Union*, v. 24, p. 321–386.
- JENSEN, M.E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. (1990) Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70, ASCE, N.Y. p. 332.
- JEONG, J. KANNAN, N.; ARNOLD, J. CLICK, R. GOSSELINK, L. SRINIVASA, R. (2010) Development and Integration of Sub-hourly Rainfall–Runoff Modeling Capability Within a Watershed Model. *Water Resources Management*, p. 1-23
- JORGENSEN, S. E. (2010) A review of recent developments in lake modeling. *Ecological Modelling*, v. 221, p. 689-692.
- KANNAN, N.; WHITE, S.M.; WORRALL, F. WHELAN, M.J. (2007) Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modelling in SWAT-2000. *Journal of Hydrology*, v. 332, p. 456– 466.
- KEMANIAN, A. R.; JULICH, S.; MANORANJAN, V. S.; ARNOLD, J. G. (2011). Integrating soil carbon cycling with that of nitrogen and phosphorus in the watershed model SWAT: Theory and model testing. *Ecological Modelling*, v. 222(12), p. 1913-1921.

- KIM, N. W.; CHUNG, M.; WON, Y. S. ARNOLD, J. G. (2008) Development and application of the integrated SWAT–MODFLOW model. *Journal of Hydrology*, v. 356, p. 1– 16
- KIM, U.; KALUARACHCHI, J.J. (2008) Application of parameter estimation and regionalization methodologies to ungauged basins of the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology*, v. 362, p. 39-56.
- KNISEL, W. G. (1980) CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. Conservation Research Report No. 26. Washington, D.C.: USDA National Resources Conservation Service.
- KRYSANOVA, V.; J. G. ARNOLD. (2008). Advances in ecohydrological modeling with SWAT: A review. *Hydrological Sciences Journal*, v. 53(5), p. 939-947.
- LAM, Q. D.; SCHMALZ, B.; FOHRER, N. (2012). Assessing the spatial and temporal variations of water quality in lowland areas, Northern Germany. *Journal of Hydrology*, v. 438-439, p. 137–147
- LEAVESLEY, G.H.; LICHTY, R.W.; TROUTMAN, B.M.; SAINDON, L.G. (1983) Precipitation-Runoff Modelind System: User’s Manual. Denver, Colorado (EUA). Water-Resources Investigations Report, 214 p.
- LEGATES, D. R.; G. J. MCCABE, (1999) Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation, *Water. Resour. Res.*, 35:233-241.
- LEGATES, D. R.; MCCABE Jr., G. J. (1999) Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resour. Res.*, v. 35, p. 233-241.
- LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, A. F.; LIMA, D.C.; ROCHA, E. O. (2012) Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 36, p. 623-634.
- LEONARD, R. A., KNISEL, W. G.; STILL, D. A. (1987) GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems. *Transactions of the ASABE*, v. 30(5), p. 1403-1418.
- LEOPOLDO, P.R.; FRANKEN, W.K.; VILLA NOVA, N.A. (1995) Real evapotranspiration and transpiration through a tropical rain forest in central Amazônia as estimated by the water balance method. *Forest Ecology and Management*, v. 73. p. 185 – 195.

- LIERSCH, S (2003). The Program pcpSTAT – User’s Manual. Disponível em: <http://swat.tamu.edu/software/links-to-related-software/>.
- LIMA, J. E. F. W. (2010) Modelagem numérica do fluxo da água no solo e do escoamento de base em uma bacia experimental em área agrícola no Cerrado. Brasília: UnB, Tese de Doutorado 312p.
- LIMA, J.E.F.W. (2000) Determinação da evapotranspiração de uma bacia hidrográfica sob vegetação natural de cerrado, pelo método do balanço hídrico. Departamento de Engenharia Agrônômica, UnB, Brasília. Dissertação Mestrado.
- LIMA, J.E.F.W.; SILVA, E.M.; STRAUCH, M.; LORZ, C. (2013) Desenvolvimento de base de dados de solos para a aplicação do modelo SWAT em bacia do bioma cerrado. In. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17 a 22 de novembro de 2013, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, 8 p.
- LINO, J.F.L. Análise da dinâmica hidrossedimentológica da bacia do Rio Preto (SC) com o Modelo SWAT. 2009. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina. 2009.
- LINS, R. C. A.; MENDES, C.A. B.; AGRA, S.G.; CARVALHO, A. E.; FRAGOSO, C. R. (2012) Integração de um Modelo Hidrológico a um SIG para Avaliação da Qualidade da Água na Bacia do Rio Doce. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, n.4, p. 171-181
- LOPES, G. R. (2010) Estudos hidrológicos e hidrossedimentológicos na bacia do córrego do Capão Comprido, DF. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recurso Hídricos, Departamento de Engenharia Civil Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, p. 123.
- LOPES, N. H. Y. 2008. Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais utilizando o modelo SWAT. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 164p.
- LOPES, V. L. (1987). A numerical model of watershed erosion and sediment yield. Tucson, PhD. Dissertation, University of Arizona, p. 148.
- LUBITZ, E. 2009. Avaliação da aplicação do modelo hidrológico SWAT à Bacia do Ribeirão Concórdia – Lontras, SC. Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia Ambiental, Universidade Regional de Blumenau. 125p.

- MACCARTHY, G. T. (1938) The unit hydrograph and flood routing, Unpublished paper, Conference of the North Atlantic Division, US Corps of Engineers, New London, CN.
- MACHADO, R.E (2003). Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, p. 154.
- MAHESWARAN, R.; KHOSA, R. (2012) Wavelet–Volterra coupled model for monthly stream flow forecasting. *Journal of Hydrology*, v. 450, p. 320–335
- MAIDMENT, D. R. (1992) Handbook of Hydrology. McGraw- Hill, Inc. p. 1424.
- MALUTA, S. Aplicação do modelo SWAT na bacia do Rio Negrinho – SC. 2010. 97f. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- MCKAY, M.D.; BECKMAN, R. J.; CONOVER, W.J. (1979). A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*. 21, 239-245.
- MEIN, R.G. AND C.L. LARSON. 1973. Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research*, v. 9(2), p. 384-394.
- MELO NETO, J.O. (2012) Análise de sensibilidade escalar do modelo hidrológico SWAT. Dissertação de mestrado. Recursos Hídricos, Universidade de Lavras. 149 p.
- METCALF, E. (1971) Storm water management model, Vol. 1 - Final report. *Water Resources Engineers*
- MINOTI, R. T. (2006) Abordagens qualitativa e quantitativa de micro-bacias hidrográficas e áreas alagáveis de um compartimento do Médio Mogi-Superior/SP. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). UFSCar, São Carlos, São Paulo, p. 247.
- MONSALVE-HERRERA, D. J. (2013). Integração de modelos de quantidade e qualidade da água para avaliação de cargas contaminantes em afluentes de mananciais de abastecimento. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH. DM 146/2013, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 127p.
- MONTEITH, J.L. 1965. Evaporation and the environment. In The state and movement of water in living organisms, XIXth Symposium. Soc. For Exp. Biol., Swansea, Cambridge University Press, p. 205-234.

- MORIASI D. N.; ARNOLD J. G.; VAN LIEW M. W.; BINGER R. L.; HARMEL R. D.; VEITH T. (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans ASABE*, v. 50, p. 885-900.
- MORIASI, D. N.; WILSON, B. N.; DOUGLAS-MANKIN, K. R.; ARNOLD, J. G.; GOWDA, P. H. (2012) Hydrologic and water quality models: Use, Calibration and Validation. American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 55, p. 1241-1247.
- MULVANY, T. J. (1850) On the use of self registering rain and flood gauges. *Inst. Civ. Eng. Proc. (Dublin)*, v. 4, p. 1-8
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. (2005) Soil and water assessment tool - Theoretical documentation version 2005. Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 541 p.
- 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, 2009.
- NEVES, D. G. Estimativa do balanço Hídrico Normal para o Município de Oiapoque localizado no setor costeiro do Amapá. In: VIII WORKSHOP ECOLAB (Ecosystema Costeiro Amazônico), 2007, Macapá. VIII WORKSHOP ECOLAB, 2007.
- OGDEN, F.L. (1998) CASC2D Version 1.18 Reference Manual, Dept. of Civil & Environmental Engineering, U-37, University of Connecticut, Storrs, CT 06269, p. 106.
- PACHECO, M.G. (2011) Aplicação do modelo hidrológico SWAT para a bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu (SC, Brasil). Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade do Vale do Itajaí, 63 p.
- PAI, N.; SARASWAT, D. (2011) SWAT2009_LUC: A tool to activate the land use change module in SWAT 2009. American Society of Agricultural and Biological Engineers, *Transactions of the ASABE*, v. 54(5), p. 1649-1658.
- PAIM, J.B.; MENEZES, J.T. Estimativa do balanço sedimentar da bacia do rio Tijucas (SC-Brasil) a partir da aplicação do modelo hidrológico SWAT. *Revista Geográfica Acadêmica* v.3, n.2, p.5-14, 2009.
- PANAGOPOULOS, Y.; MAKROPOULOS, C.; MIMIKOU, M. (2011) SWAT parameterization for the identification of critical diffuse pollution source areas under data limitations. *Ecological Modelling*, v. 222, p. 3500– 3512

- PECHLIVANIDIS, I.G.; JACKSON, B.M.; MCINTYRE, N.R. WHEATER, H.S. (2011). Catchment Scale Hydrological Modelling: A review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. *Global NEST Journal*, v. 13, p. 193-214.
- PENMAN, H. L. (1948) Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society, London, Ser. A*, v. 193, p. 120–145.
- PERRIM, J.; FERRANT, S.; MASSUEL, S.; DEWANDEL, J.C.; MARÉCHAL, S.; AULONG, S.; AHMED, S. (2012) Assessing water availability in a semi-arid watershed of southern India using a semi-distributed model. *Journal of Hydrology*, v. 460-461, p. 143–155
- PETERSON, J. R.; HAMLETT, J. M. (1998) Hydrologic calibration of the SWAT model in a watershed containing fragipan soils. *Journal of the American Water Resources Association*, *Jawra*, n. 34, p. 531-544.
- 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.
- PINTO, D.B.F.; SILVA, A.M.; BESKOW, S.; MELLO, C.R.; COELHO, G. (2013) Application of the soil and water assessment tool (SWAT) for sediment transport simulation at a headwater watershed in Minas Gerais state, Brazil. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, v. 56(2), p. 697-709.
- PISINARAS, V.; PETALAS, C.; GIKAS, G. D. GEMITZI, A. TSIHRINTZIS, V. A. (2010) Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *Desalination* v. 250, pp. 274–286
- PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. (2012) Conservação de Volume em Modelos Simplificados de Propagação de Vazão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.17, n.4, pp. 83-96
- PRESS, W.H.; FLANNERY, B.P.; TEUKOLSKY, S.A.; VETTERLING, W.T., (1992). *Numerical Recipe, The Art of Scientific Computation*. 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain.
- PRIESTLEY, C.H.B. AND R.J. TAYLOR. (1972) On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, v. 100, p. 81- 92.
- PULS, L. G. (1928) Flood regulation of the Tennessee River. *Proc.*, 70th Congress, 1st Session, H. D. 185, Part 2, Appendix B.

- REATTO, A., MARTINS, E. S., CARDOSO, E. A., SPERA, S. T., CARVALHO JR., O. A. C., SILVA, A. V. E FARIAS, M. F. R. (2003). Levantamento de reconhecimento de solos de alta intensidade do alto curso do Rio Descoberto, DF/GO, escala 1:100000. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento N° 92. EMBRAPA Cerrados, Distrito Federal, 2003.
- REFSGAARD, J. C., AND STORM, B. (1995) Chapter 23: MIKE SHE. Computer models of watershed hydrology, V. P. Singh, ed., Water Resources Publications, Littleton, Colo.
- RYU, J. H.; LEE, J. H.; SANGMAN, J.; SEON, K.; HAN, K. (2011) The impacts of climate change on local hydrology and low flow frequency in the Geum River Basin, Korea. *Hydrological Processes* v. 25, p. 3437–3447
- SALEH, A.; DU, B. (2004) Evaluation of SWAT and HSPF within BASINS program for the upper North Bosque river watershed in central Texas. *American Society of Agricultural Engineers*, v. 47(4), p. 1039–1049.
- SALEH, A.; DU, B. (2004). Evaluation of SWAT and HSPF within BASINS program for the upper North Bosque River watershed in central Texas. *Trans. ASAE* v. 47, p. 1039-1049.
- SALLES, L. (2012) Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pipiripau. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade de Brasília, p. 130.
- SANTHI, C.; ARNOLD, J.G.; WILLIAMS, J.R.; DUGAS, W.A.; SRINIVASAN, R.; HAUCK, L.M. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association*. Vol. 37, n. 5, 2001.
- SANTOS, L. L. (2009) Modelos hidráulicos-hidrológicos: Conceitos e Aplicações. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 2, n.03, p. 01-19.
- SANTOS, R.M., 2012. Recarga de águas subterrâneas em ambiente de cerrado: Estudo com base em modelagem numérica e simulação hidrológica em uma bacia experimental. Tese de doutorado, Publicação PTARH.TD – 13/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 197p. 2012.
- SARMENTO, L. (2010) 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, Publicação PTARH. TD – 07/10,

- Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 1-241.
- SARTORI, A. (2010) Desenvolvimento de critérios para classificação hidrológica de solos e determinação de valores de referência para o parâmetro CN. Tese de Doutorado. Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 237 p.
- SARTORI, A.; GENOVEZ, A. M.; LOMBARDI NETO, F. (2005a) Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. Parte 2: Aplicação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, p. 19-29.
- SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. (2005b) Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. Parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, p. 5-18.
- SCHERPINSKI, C.; URIBE-OPAZO, M.A.; VILAS BOAS, M.A.; SAMPAIO, C.; JOHANN, J.A. (2010) Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo. *Acta Scientiarum. Agronomy Maringá*, v. 32, n. 1, p. 7-13.
- SETEGN, S. G.; SRINIVASAN, R.; DARGAHI. (2008) Hydrological Modelling in the Lake Tana Basin, Ethiopia Using SWAT Model. *The Open Hydrology Journal* v. 49, pp. 49-62
- SHERMAN, L. K. (1932) Stream flow from rainfall by the unit graph method. *Engineering News-Record*, v.108, p. 501–505.
- SHI, Z. H.; AI, L.; FANG, N. F.; ZHU, H.D. (2012) Modeling the impacts of integrated small watershed management on soil erosion and sediment delivery: A case study in the Three Gorges Area, China. *Journal of Hydrology*, 438-439, pp. 156–167
- SILVA, C.L.; OLIVEIRA, C.A.S. (1999) Runoff measurement and prediction for a watershed under natural vegetation in central Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, p. 695-701.
- SINGH, V. P. WOOLHISER, D. A. (2002) Mathematical Modeling of Watershed Hydrology, *Journal of Hydrologic Engineerig*, 7, 270-292
- SINGH, V.P.; FREVERT, D. (2002) Mathematical models of small watershed hydrology applications. Chelsea: *Water Resources Publications*. 947p.

- SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS) (1972) Supplement A, Section 4, Chapter 10, Hydrology. *National engineering handbook*, USDA, Washington, D.C.
- SOROOSHIAN, S. AND V.K. GUPTA, "Model Calibration," Chapter 2 of Computer Models of Watershed Hydrology, Edited by V.J. Singh, *Water Resources Publications*, Highlands Ranch, Colorado, pp. 2368, 1995.
- SRINIVASAN, R., ARNOLD, J.G. (1994) Integration of the basin-scale water quality model with GIS. *Water Resources Bulletin*, v. 30, n. 03, p. 453-462.
- STRAUCH, M.; BERNHOFER, C.; KOIDE, S.; VOLK, M.; LORZ, C.; MAKESCHIN, F. (2012) Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, v. 414-415, p. 413-424.
- TATEISH, R., AHN, C.H., Mapping Evapotranspiration and water balance for global land surfaces. *ISPRS Journal of Photogrametry & Remote sensing*. 51. p 209 – 215, 1996
- TÁVORA, B. E. (2010). Estudo da Contaminação do Lençol Freático por Hidrocarbonetos Utilizando Modelagem Computacional Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH. DM-130/2010, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 71p.
- THEIS, C. V. (1935) The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Transactions American Geophysical Union*, v. 16, p. 519-524.
- THORNTHWAITE, C. W. (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geography review*, v. 38, p. 55-94
- TODINI, E. (2007). Hydrological catchment modeling: past, present and future. *Hydrological Earth System Science*, v. 11(1), p. 468-482.
- TODINI, E., 1988. Rainfall runoff modeling -- Past, present and future. *Journal of Hydrology*, v. 100, p. 341-352.
- TUCCI, C. E. M. (1998) Modelos Hidrológicos. 1a ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, p. 669.
- TUCCI, C. E. M. (2005) Modelos Hidrológicos. 2a ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, p. 679.
- TUPPAD, P., K. R. DOUGLAS-MANKIN, T. LEE, R. SRINIVASAN, AND J. G. ARNOLD. (2011). Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrologic/water quality model: Extended capability and wider adoption. *Trans. ASABE*, v. 54(5): 1677-1684.

- UBERTI, A. A. A.; BACIC, I. L. Z.; PANICHI, J. A. V.; LAUS NETO, J. A.; MOSER, J. M.; PUNDEK, M.; CARRIÃO, S. L. (1991) Metodologia para classificação da aptidão de uso das terras do Estado de Santa Catarina. Florianópolis: Empasc: Emater (SC), 19 p.
- VAN GRIENSVEN. A. MEIXNER. T.. GRUNWALD. S.. BISHOP. T.. DILUZIO. M.. SRINIVASAN. R. (2006) A global Sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology* v. 324, pp. 10–23.
- VAN LIEW, M.W.; ARNOLD, J.G.; GARBRECHT, J.D. (2003). Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *Tans ASABE*, v. 46, p. 1539-1551.
- VISSMAN, JR. W.; LEWIS, G. L. (2002) Introduction to Hydrology. Fifth Edition. Pearson Education, Inc. p. 612.
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. Hidrologia aplicada. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p.
- VOGELMANN, E. S.; UHDE, L. T.; KAISER, D.R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; VIEIRA, D. A.; BARROS, C. A. P. de; PEREIRA, T. I. (2008) Variação da condutividade hidráulica saturada do solo em Argissolo Vermelho em função da orientação em área de pastagem. VII Reunião Sul-Brasileira de Ciência do Solo. Santa Maria, Rio Grande do Sul.
- WHITE, E. D.; EASTON, Z. M.; FUKA, D. R.; STEENHUIS, T. S. (2009) SWAT-WB User Manual. Universidade de Cornell, NY. 8 pág.
- WILLIAMS, J. R.; JONES, C. A.; DYKE, P. T. (1984) The EPIC model and its application. Proc., ICRISAT-IBSNAT-SYSS Symposium on Minimum Data Sets for Agrotechnology Transfer, 111–121.
- WILLIAMS, J.R.; H.D. BERNDT. (1977) Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Transactions of the ASABE*, v. 20(6), p. 1100-1104.
- WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E.; GOODRICH, D. C. (1990) KINEROS: A kinematic runoff and erosion model: Documentation and user manual. Rep. No. ARS-77, USDA, Washington, D.C.
- YANG, J.; REICHERT, P.; ABBASPOUR, K.C.; XIA, J.; YANG, H. (2008) Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *Journal of Hydrology*, v. 358, p. 1–23
- YOUNG, R. A.; ONSTAD, C. A.; BOSH, D. D.; ANDERSON, W. P. (1989) AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 44, n. 2.a