



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SETOR DE TECNOLOGIA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

ANAÍS OSTROSKI

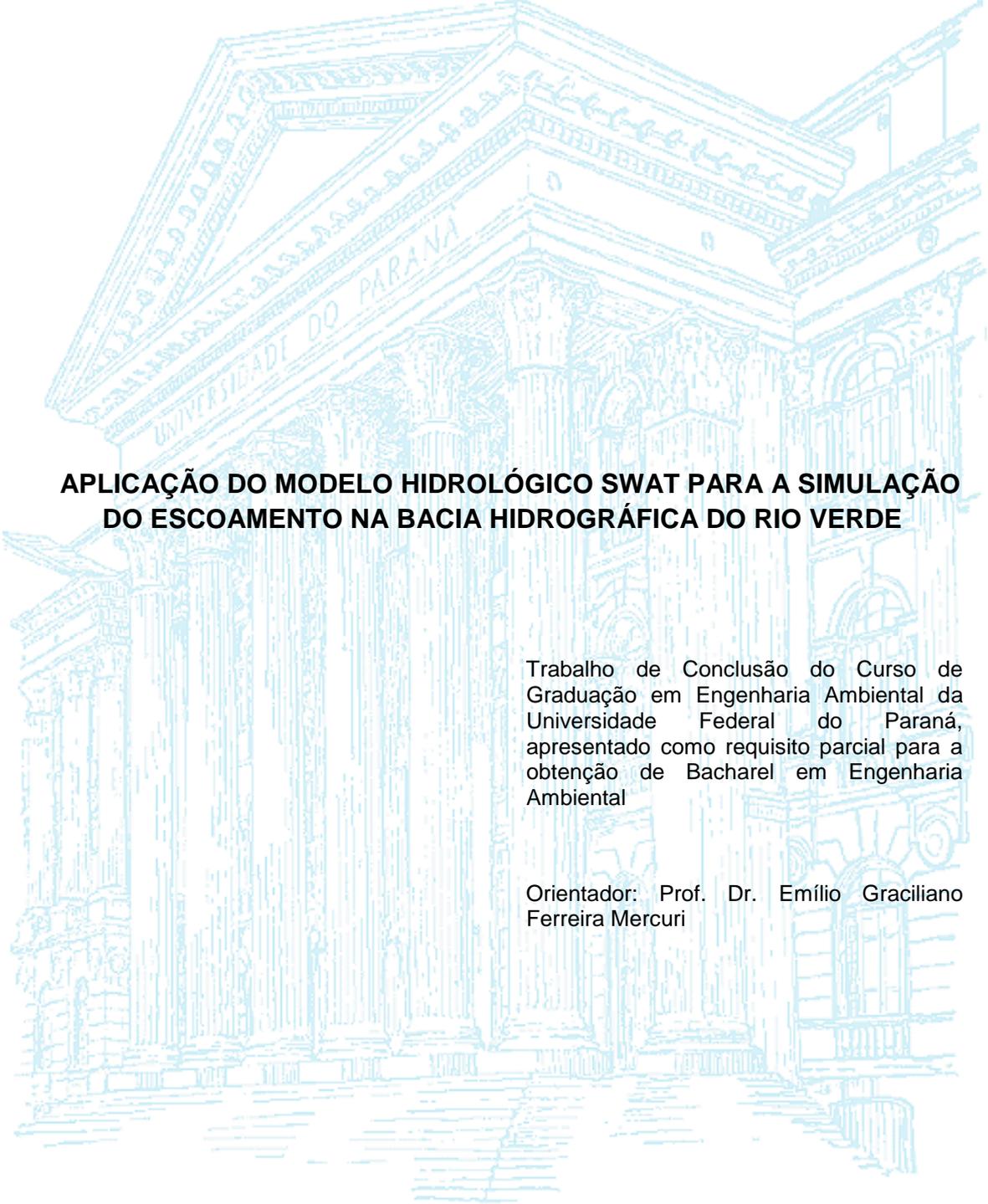
**APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT PARA A SIMULAÇÃO
DO ESCOAMENTO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VERDE**

ORIENTADOR: EMÍLIO GRACILIANO FERREIRA MERCURI

CURITIBA

2017

ANAÍS OSTROSKI



**APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT PARA A SIMULAÇÃO
DO ESCOAMENTO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VERDE**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Paraná, apresentado como requisito parcial para a obtenção de Bacharel em Engenharia Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Emílio Graciliano Ferreira Mercuri

CURITIBA

2017

RESUMO

O entendimento dos processos hidrológicos é essencial para a administração dos recursos hídricos e planejamento do uso do solo na gestão territorial em planos diretores municipais. Modelos hidrológicos vêm sendo desenvolvidos para suprir essa necessidade e para prever as consequências dos efeitos climáticos e de mudança no uso do solo em bacias hidrográficas. Além disso, a junção desses modelos com Sistemas de Informações Geográficas permite a criação de um banco de dados efetivo e de forma espacialmente distribuída. O objetivo do presente trabalho é aplicar o modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) acoplado à plataforma ArcGIS para simular o escoamento na Bacia Hidrográfica do Rio Verde, situada na região metropolitana de Curitiba/PR. Séries históricas de precipitação para o período entre 1999 a 2016 foram utilizadas na simulação, a qual foi avaliada para o ano de 2009 a montante e a jusante do reservatório do Rio Verde. Os coeficientes de Nash-Sutcliffe ficaram, respectivamente, iguais a 0,33 e 0,50. A calibração do modelo específica para os dois locais se mostrou essencial para a simulação da vazão. A aplicação do modelo para a Bacia do Rio Verde é importante para a consolidação de técnicas com base científica para o cálculo de variáveis hidrológicas em uma bacia que possui disponibilidade de dados limitada, mas que ao mesmo tempo é importante por se tratar de uma bacia experimental da UFPR. Além disso, a bacia possui importância econômica e ambiental para o município de forma que ferramentas como a modelagem podem ser muito eficazes para a gestão urbana..

ABSTRACT

The understanding of hydrology is essential for the administration of the water resources and usage of the soil planning. Hydrologic models are being developed to meet this necessity and to predict the consequences of the climate effects and the changes of soil usage. Additionally, the union of these models with Geographic Information Systems allow the creation of an effective and spatially distributed database. The objective of the present work is the application of the SWAT model in the ArcGIS platform to simulate the flow at the Rio Verde Watershed, situated at the metropolitan area of Curitiba. Historical precipitation data from 1999 to 2016 were used for the simulation, which was analyzed for the year of 2009 up and downstream of the Rio Verde Reservoir. The coefficients of the Nash Sutcliffe formula, respectively are 0.33 and 0.50. The specific calibration for the local areas is essential for the simulation of the Rio Verde. The application of the model to the Rio Verde watershed is important for the consolidation of scientific based techniques to calculate the hydrologic variables in a watershed that has limited data availability, but at the same time is essential to UFPR once it is an experimental basin. Besides, the watershed is economic and environmentally important to the county so that tools as modeling can be very effective to urban management.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Localização da Bacia do Rio Verde | 16 |
| Figura 2 - Mapa geológico para a Bacia do Rio Verde..... | 18 |
| Figura 3 - Fluxograma do SWAT adaptado por Machado (2002) de King <i>et al</i> (1996)..... | 24 |
| Figura 4 - Modelo Digital de Elevação para a Bacia do Rio Verde com cotas altimétricas em metros | 35 |
| Figura 5 - Mapa de Uso do Solo para a Bacia do Rio Verde..... | 36 |
| Figura 6 - Mapa de Tipos de Solo da Bacia do Rio Verde | 38 |
| Figura 7 - Temperaturas máximas e mínimas | 42 |
| Figura 8 - Umidade relativa do ar..... | 42 |
| Figura 9 - Estações pluviométricas próximas à Bacia do Rio Verde | 44 |
| Figura 10 - Gráfico Chuva-Vazão para a Estação Formigas..... | 45 |
| Figura 11 - Gráfico Chuva-Vazão para a estação à montante do Reservatório | 45 |
| Figura 12 - Delineamento automático da Bacia do Rio Verde..... | 47 |
| Figura 13 - Sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Rio Verde | 52 |
| Figura 14 - Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo | 53 |
| Figura 15 - Gráfico precipitação-vazão com os resultados da simulação sem calibração | 54 |
| Figura 16 - Relacionamento canal-aquífero. | 55 |
| Figura 17 - Gráfico precipitação-vazão para o escoamento observado e o simulado calibrado | 56 |
| Figura 18 - Escoamento simulado e observado junho-outubro 2009 | 57 |

| | |
|--|----|
| Figura 19 - Curva de Permanência de Vazão | 58 |
| Figura 20 - Gráfico chuva-vazão a montante do reservatório..... | 58 |
| Figura 21 - Gráfico chuva-vazão da sub-bacia 16 após calibração..... | 59 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Uso e cobertura do solo na Bacia do Rio Verde | 37 |
| Tabela 2 - Parâmetros físicos dos Solos | 39 |
| Tabela 3 - Parâmetros climáticos da Estação de Curitiba | 41 |
| Tabela 4 - Estações climáticas para os dados pluviométricos | 44 |
| Tabela 5 - Características do Reservatório do Rio Verde | 48 |
| Tabela 6 - Parâmetros para calibração | 49 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|----------------|---|-------------------------------------|
| SW_1 | quantidade de água no solo | mm |
| SW_0 | umidade do solo inicial | mm |
| t | Tempo | dias |
| R_{dia} | Precipitação | mm |
| Q_{sup} | quantidade de água de escoamento superficial | mm |
| E_a | Evapotranspiração | mm |
| W_{inf} | quantidade de água que entra na zona de aeração do perfil do solo | mm |
| Q_{gw} | quantidade de retorno do fluxo proveniente do aquífero | mm |
| Q | escoamento acumulado | mm |
| I_a | abstração inicial | mm |
| S | parâmetro de retenção | mm |
| ft | taxa de infiltração | mm/h |
| K_e | condutividade hidráulica efetiva | mm/h |
| ψ | potencial matricial da frente de umedecimento | mm |
| $\Delta\theta$ | variação da umidade volumétrica | mm/mm |
| Ft | a infiltração cumulativa | mm |
| K_{sat} | condutividade hidráulica saturada | mm/h |
| CN | número de curva | Adimensional |
| λ_d | densidade do fluxo de calor latente | MJ m ⁻² d ⁻¹ |
| E | a variação da taxa de evaporação | mm d ⁻¹ |
| Δ | declividade da curva pressão-temperatura do vapor de saturação | kPa ⁰ C ⁻¹ |
| H_{liq} | radiação líquida | MJ m ⁻² d ⁻¹ |
| G | densidade de fluxo de calor para o solo | MJ m ⁻² d ⁻¹ |
| ρ_{ar} | densidade do ar | kg m ³ |
| c_p | o calor específico à pressão constante | MJ m ⁻² °C ⁻¹ |
| e_z^0 | pressão de saturação do vapor de ar para a altura de ar Z | kPa |
| r_a | resistência aerodinâmica | s m ⁻¹ |

| | | |
|----------------|---|------------------------------------|
| γ | constante psicométrica | kPa °C ⁻¹ |
| r_c | resistência de cobertura da planta | s m ⁻¹ |
| λ | calor latente | MJ kg ⁻¹ |
| E_0 | evapotranspiração potencial | mm d ⁻¹ |
| H_0 | radiação extraterrestre | MJ m ⁻² d ⁻¹ |
| T_{max} | temperatura máxima do dia | °C |
| T_{min} | temperatura mínima do dia | °C |
| \bar{T}_{av} | temperatura média do ar para um dado dia | °C |
| E_0 | evapotranspiração potencial | mm |
| R_{int} | umidade do solo armazenada dentro do dossel | mm |
| E_{can} | evaporação da água interceptada pelo dossel das plantas num determinado dia | mm |
| R_{intf} | quantidade final de água interceptada no dossel das plantas num determinado dia | mm |
| E_t | transpiração máxima em um dia | mm |
| E'_0 | evapotranspiração potencial ajustada para a evaporação da precipitação interceptada | mm |
| LAI | índice de área foliar | Adimensional |
| E_s | evaporação do solo máxima de um determinado dia | mm |
| cov_{sol} | índice de cobertura do solo | Adimensional |
| CV | biomassa de resíduos acima do solo | kg há ⁻¹ |
| w_{perc} | quantidade de água que percola para a próxima camada | mm |
| SW_{dren} | volume de água drenável na camada de solo | mm |
| Δt | intervalo de tempo | horas |
| TT_{perc} | tempo de duração da percolação | horas |
| W_{fundo} | largura inferior do canal | m |
| W_{topo} | largura superior do canal | m |
| z_{canal} | inverso dos lados do declive do canal | Adimensional |
| A_{ch} | área da seção transversal do fluxo | m ² |
| P_{ch} | perímetro molhado | m |
| R_h | raio hidráulico | m |

| | | |
|---------------|--|--------------|
| q_{ch} | Vazão | m^3/s |
| S_{ch} | declividade ao longo do canal | m/m |
| n | coeficiente de Manning | Adimensional |
| v | velocidade do fluxo | m/s |
| V_{armax1} | volumes de água no rio início do intervalo temporal | m^3H_2O |
| V_{armaz2} | volumes de água no rio ao final intervalo temporal | m^3H_2O |
| $V_{entrada}$ | volume que flui para o rio | m^3H_2O |
| $V_{saída}$ | volume de água fluindo para fora do rio | m^3H_2O |
| t_{perda} | volume perdido via transmissão através do leito | m^3H_2O |
| E_{ch} | evaporação do rio | m^3H_2O |
| div | volume adicionado ou removido do rio através de desvios | m^3H_2O |
| V_{bnk} | volume adicionado através do fluxo de retorno do armazenamento da margem | m^3H_2O |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO..... | 14 |
| 2. OBJETIVOS | 15 |
| 2.1 OBJETIVOS GERAIS..... | 15 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 15 |
| 3. REFERENCIAL TEÓRICO | 16 |
| 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO..... | 16 |
| 3.1.1 CLIMA..... | 17 |
| 3.1.2 GEOLOGIA..... | 18 |
| 3.1.3 DISTRIBUIÇÃO DE SOLO | 19 |
| 3.1.4 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO..... | 20 |
| 3.1.5 ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS..... | 21 |
| 3.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA..... | 21 |
| 3.2.1 MODELO SWAT..... | 22 |
| 3.2.2 METODOLOGIA NO MODELO SWAT..... | 24 |
| 3.2.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CALIBRAÇÃO | 32 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS | 34 |
| 4.1 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS..... | 34 |
| 4.2 DADOS DE ENTRADA | 34 |
| 4.2.1 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO..... | 34 |
| 4.2.2 MAPA DE USO DA TERRA..... | 36 |
| 4.2.3 MAPA DE SOLO..... | 37 |
| 4.2.4 DADOS CLIMÁTICOS..... | 40 |
| 4.2.5 PRECIPITAÇÃO..... | 43 |
| 4.2.6 VAZÃO | 44 |
| 4.3 APLICAÇÃO DO MODELO..... | 46 |
| 4.3.1 DELINEAMENTO DA BACIA..... | 46 |
| 4.3.2 UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA..... | 47 |
| 4.3.3 INSERÇÃO DO RESERVATÓRIO | 48 |
| 4.3.4 EXECUÇÃO DO MODELO..... | 49 |
| 4.3.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CALIBRAÇÃO | 49 |

| | |
|--|-----------|
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 52 |
| 6. CONCLUSÕES..... | 61 |
| 7. REFERÊNCIAS | 62 |

1. INTRODUÇÃO

A simulação hidrológica é uma ferramenta importante na gestão dos recursos hídricos, uma vez que auxilia no entendimento dos processos hidrológicos e suas relações com o meio. É possível compreender como uma bacia hidrográfica se comportará em diferentes condições de clima e de uso do solo.

O modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é baseado na simulação dos processos chuva-vazão (Brighenti, 2015) e foi desenvolvido na década de 1990 pelo Doutor Jeff Arnold do USDA *Agricultural Research Service* com o objetivo de ser uma ferramenta capaz de simular uma gama de processos, como escoamento, sedimentos e nutrientes para prever o impacto nas mudanças de uso do solo.

O modelo é utilizado acoplado à uma plataforma SIG (Sistemas de Informações Geográficas), como o software ArcGIS, e desta forma integra vantagens desse tipo de sistema. A utilização de SIGs permite a manipulação de dados de diversas fontes, a representação de dados fisicamente distribuídos e a criação de um banco de dados completo para o modelo, além de ser capaz de discretizar grandes áreas em pequenas unidades com características hidrológicas homogêneas, o que confere maior precisão ao modelo.

A Bacia do Rio Verde está inserida na Região Metropolitana de Curitiba e é um dos principais mananciais de abastecimento da região. A bacia encontra-se em uma área que vem mostrando alterações no uso do solo, o que causa efeitos aos corpos d'água, uma vez que modificam a capacidade de armazenamento do solo e reduzem a infiltração das águas pluviais (Caneparo *et al.*, 2010).

A aplicação do modelo SWAT na Bacia do Rio Verde tem como objetivo simular o escoamento com base nos dados de monitoramento climático do reservatório do Rio Verde e de estações pluviométricas situadas próximas à bacia. Visto que a modelagem fornece uma aproximação do comportamento dos

processos hidrológicos que depende de uma grande quantidade de dados, é necessário realizar calibrações baseadas em séries de medições. A calibração visa melhor parametrizar o modelo e reduzir incertezas, sendo um dos principais desafios da modelagem hidrológica.

1.1 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

O capítulo 2 apresenta de forma mais detalhada os objetivos do projeto, tantos gerais quanto específicos. O capítulo 3 contém a revisão bibliográfica desse estudo, com descrições acerca da caracterização da Bacia Hidrográfica do Rio Verde em relação a clima, solos e tipos de solos, por exemplo, o que é de fundamental importância para esse projeto, pois sendo um modelo hidrológico distribuído, o SWAT necessita de muitas informações sobre os parâmetros físicos da área de estudo. Além disso, há revisão sobre modelagem hidrológica, a descrição da metodologia do SWAT e análise de sensibilidade e calibração.

O capítulo 4 contém a descrição dos materiais e métodos necessários à aplicação do modelo. Nesse capítulo é explicado sobre sua obtenção e funcionalidade dos dados de entrada do modelo. As equações principais resolvidas pelo SWAT também são descritas, assim como é apresentada a metodologia sobre análise de sensibilidade e calibração.

O capítulo 5 é dedicado à apresentação dos resultados e a discussão dos mesmos, apresentando comparações entre as vazões observadas e simuladas com e sem calibração bem como a explicação dos parâmetros calibrados. O capítulo 6 possui as conclusões do trabalho.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral do trabalho é a realização da simulação do escoamento da Bacia do Rio Verde, localizada na Região Metropolitana de Curitiba, utilizando a interface entre o modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) e o software SIG ArcGIS.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Levantar dados meteorológicos, de temperatura, umidade, radiação solar e velocidade do vento para inserção no modelo;
2. Levantar dados de solo e uso do solo para a Bacia do Rio Verde;
3. Simular a vazão do Rio Verde;
4. Analisar a sensibilidade dos parâmetros e realizar a calibração do modelo em nível diário;

dos rios, o topo dos morros, a proximidade das nascentes, terrenos com inclinação média maior que 25°. As Áreas de Preservação Permanente estão submetidas à modalidade de manejo diverso, podendo compreender ampla gama de paisagens naturais ou alteradas, com características notáveis que exijam proteção para conservar o bem-estar de populações humanas, condições ecológicas e paisagísticas (Oliveira, 2010).

A APA do Rio Verde visa garantir a qualidade das águas, inclusive para fins de abastecimento público, e a proteção de atributos naturais e humanos. Isso é feito através da criação de um Zoneamento Ecológico e da restrição de diversas atividades, como implantação de atividades industriais potencialmente poluidoras, atividades capazes de causarem erosão, atividades de mineração que podem afetar o manancial e uso de agrotóxicos em desacordo com as normas (Decreto Estadual nº 2.375/2000).

O Zoneamento Ecológico do Rio Verde define quatro zonas para a APA (Gobbi *et al.*, 2011): a) Área de Urbanização Consolidada; b) Áreas de Ocupação Orientada; c) Áreas de Restrição à Ocupação e d) Áreas Rurais. O Reservatório do Rio Verde encontra-se na área de restrição à ocupação, uma vez que o objetivo desta é a limitação das atividades na área para manutenção da qualidade hídrica.

3.1.1 CLIMA

A temperatura anual média da região oscila entre 16,5°C e 22,6°C (Caneparo et al, 2010). De acordo com a classificação de Koeppen, a área é de uma região climática do tipo Cfb, com clima temperado, verão ameno, chuvas distribuídas de forma uniforme e falta de estação seca definida. Geadas são frequentes, podendo chegar a 25 dias durante o ano e a média da temperatura do mês mais quente é inferior a 22°C, a precipitação varia de 1.100 a 2.000 mm no ano.

De acordo com Oliveira (2010) a precipitação média anual é de 1400 mm. Os meses de maior precipitação estão no período mais quente do ano, período

no qual em média chove no mínimo duas vezes mais do que no inverno. Ainda assim, considera-se que a área possui chuvas bem regulares durante o ano, pois a precipitação nos meses mais secos é maior do que 70 mm/mês

3.1.2 GEOLOGIA

A bacia do Rio Verde se encontra no noroeste da Bacia Geológica de Curitiba e o substrato é composto por quatro compartimentos geológicos (Bittencourt, 2011): 1) Unidades metamórficas do Complexo Atuba; 2) Unidades metamórficas do Grupo Açungui; 3) Rochas sedimentares do Guabirotuba e do Tingui e 4) Aluviões Recentes.

A geologia da área é de ocorrência de sedimentos recentes, os aluviões do Holoceno foram comandados pela influência do Rio Iguaçu e apresentam sedimentos argilo-silitico-arenosos (Oliveira, 2010). O embasamento é constituído por migmatitos no complexo cristalino do Pré-Cambriano, entalhadas na área de encosta sobre os quais se assentaram os sedimentos da formação Guabirotuba (Salamuni, 1998 e Oliveira, 2010).

A Figura (2) mostra o mapa geológico da Bacia do Rio Verde, obtido através do Instituto das Águas do Paraná.

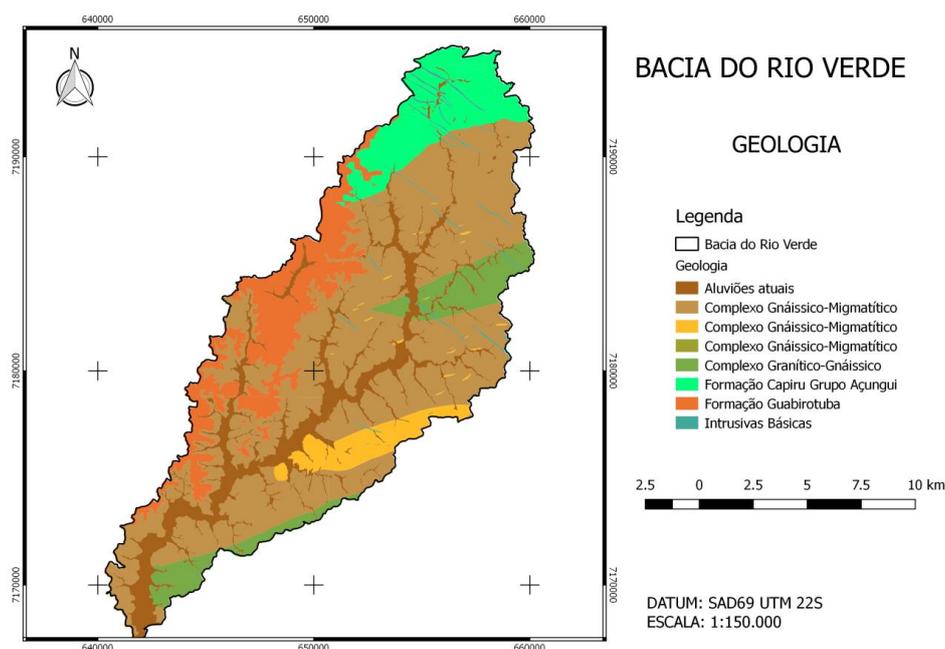


Figura 2 - Mapa geológico para a Bacia do Rio Verde

3.1.3 DISTRIBUIÇÃO DE SOLO

De acordo com Oliveira (2010), pela classificação da Embrapa (1999), a bacia possui os seguintes tipos de solo: Latossolo vermelho-amarelo, Argissolo vermelho-amarelo, Hidromórfico gleizado, Aluvial, Cambissolo e Orgânico, os quais são resultado da combinação de forçantes climáticas e biológicas juntamente com o fato de que a bacia do Rio Verde encontra-se no embasamento granítico-cristalino do pré-cambriano recoberto pela formação Guabirotuba do Holoceno, com sedimentos areno-silítico-argiloso fluviais.

Os latossolos são muito intemperizados, com pequena reserva de nutrientes, alta permeabilidade à água e ácidos, em sua maioria. Formados pelo processo de latolização, que consiste na remoção da sílica e das bases do perfil (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) após transformação dos minerais primários, esse solo apresenta teor de silte inferior a 20% e teor variável de argila entre 15 e 80% (Embrapa, 2006).

O Latossolo Vermelho-Amarelo está presente em todo o território brasileiro em ambientes bem drenados, possui características uniformes de cor, textura e estrutura em profundidade. Apesar das limitações químicas, é muito utilizado para agropecuária pois o relevo permite mecanização e por serem porosos facilitam o desenvolvimento radicular.

Os Argissolos Vermelho-Amarelos apresentam acumulação de argila e suas cores são consequência da presença de óxidos de ferro hematita e goethita. São solos muito profundos, bem estruturados e bem drenados. Geralmente são utilizados com cultura de cana-de-açúcar, fruticultura e pastagem. Devido à baixa fertilidade, necessitam adubação e calagem. Essa classe é uma das mais extensas do Brasil e ocorrem em áreas com relevos acidentados e dissecados.

O hidromórfico gleizado, ou Gleissolo, é um solo mineral formado a partir de sedimentos recentes de constituição argilosa, argilo-arenosa e arenosa. Ocupam ambientes de várzeas mal drenadas e, por esta razão, necessitam de grande cuidado durante o planejamento da região.

Os Solos Aluviais estão incluídos na classe dos Neossolos, que são aqueles constituídos por material mineral ou orgânico com menos de 20 centímetros e que não apresenta alterações significativas em relação ao material de origem.

Os Cambissolos são solos constituídos por material mineral com horizonte B incipiente, o qual possui textura francoarenosa ou mais argilosa, com estrutura em blocos, granular ou prismática (Embrapa, 1999). Devido à heterogeneidade do material de origem, as características são muito variáveis com a distribuição espacial. Os Cambissolos situados em relevo pouco movimentado e sem restrição de drenagem e que possuem espessura mediana (50-100 centímetros) são bons para a agricultura.

Os solos orgânicos são formados a partir da impregnação de material orgânico em sedimentos ou através da transformação de materiais de origem vegetal nos sedimentos. Ocorrem em locais mal drenados, como várzeas, depressões sob vegetação campestre ou florestal ou a ambientes úmidos de altitudes elevadas (Embrapa, 2006).

3.1.4 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Originalmente a área onde se encontra a Bacia do Rio Verde era majoritariamente coberta por Floresta Ombrófila Mista, onde a presença de pinheiro-do-paraná (*Araucaria angustifolia*) era a principal característica. Nas áreas mais planas as várzeas e brejos eram comuns devido à presença de solos hidromórficos (Roderjan *et al.*, 2011). Nos últimos dois séculos, entretanto, as áreas cobertas por florestas deram lugar a locais antropizados, caracterizados por agropecuária, reflorestamento, áreas urbanas e industriais e solo exposto. Na seção 4.2 dos Materiais e Métodos, onde são descritos os dados de entrada do modelo, é ilustrado o mapa de uso do solo da bacia do Rio Verde (Figura 5).

Segundo o estudo realizado por Roderjan *et al.* (2011), 59,22% da área de preservação permanente do Rio Verde é coberta por vegetação natural e 36,6% é a porcentagem de área coberta de maneira irregular, incluindo agropecuária, reflorestamento, área urbana e solo exposto. Essa área irregular

é referente ao não cumprimento das normas de uso do solo em Áreas de Preservação Permanente. Nos últimos dois séculos, o local foi modificado de forma que ficou cada vez mais antropizado. A exploração madeireira, a agropecuária e a expansão urbana e industrial mudaram a paisagem da bacia.

3.1.5 ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS

Dos municípios inseridos na área da bacia, Campo Largo é o que tem maior concentração de população dentro da Bacia do Rio Verde, de cerca de 80%, seguido por Araucária com 38,4% (Andreoli *et al.*, 2011).

O índice de Desenvolvimento Humano de Campo Largo é de 0,774 enquanto o de Campo Magro é de 0,740 (Caneparo, 2010). Na primeira cidade, há setores industriais de diversos segmentos e na segunda, a economia é baseada na atividade agrícola. Em Araucária, observou-se uma mudança nas características econômicas uma vez que a concentração de indústrias vem crescendo nos últimos 35 anos.

Atividades econômicas como agricultura podem aumentar a carga de nutrientes do reservatório e causar eutrofização, por exemplo, os impactos socioeconômicos são muito grandes nesses casos. Uma gestão visando o desenvolvimento sustentável e considerando informações de modelos hidrológicos e outras ferramentas é essencial para a prevenção e mitigação de impactos na região.

3.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Modelos hidrológicos são conjuntos de equações que permitem simular os processos envolvidos no ciclo hidrológico dentro de uma bacia hidrográfica. De acordo com Chow e al (1988), o objetivo da utilização dos modelos hidrológicos é o estudo do funcionamento de um sistema e a predição de suas saídas, uma vez que as entradas e saídas do modelo são variáveis hidrológicas mensuráveis relacionadas através de equações.

Basicamente, a modelagem consiste em representações matemáticas do que ocorre na natureza a partir de um modelo conceitual, idealizado com base nos dados observados (Machado, 2002). Portanto, devido à capacidade de previsão do regime fluvial, os modelos são ferramentas que podem ser utilizadas como parte de um programa de gestão ambiental e de tomada de decisões.

As classificações de modelos podem ser baseadas em diferentes características: de acordo com os tipos de variáveis (estocásticas ou determinísticas), tipo de relação entre as variáveis (empíricos ou com fundamentação física), representação de dados (distribuídos ou contínuos), existência de relações espaciais (pontuais ou distribuídas) e existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos) (Filho *et al.*, 2012)

Modelos concentrados não consideram mutabilidade espacial das variáveis hidrológicas e estas são consideradas com valores médios para toda a bacia, o fator principal, portanto, é o tempo. Modelos distribuídos dividem a bacia em espaços com características homogêneas, permitindo a representação da variabilidade espacial (Machado, 2002).

De acordo com Beven (1991), modelos hidrológicos distribuídos são utilizados devido à consideração de que há uma melhor representação dos processos físicos na bacia, entretanto, a parametrização do modelo se torna mais complexa devido à quantidade e detalhamento de informações necessárias.

De acordo com Filho *et al* (2012), modelos discretos são utilizados para a modelagem de períodos isolados, como eventos de cheia ou recessão, enquanto modelos contínuos tem como objetivo representar longos períodos que contemplam épocas com comportamentos diferentes. Os modelos contínuos, entretanto, utilizam a discretização da série temporal para realização dos cálculos, o passo temporal é definido de acordo com os objetivos, da disponibilidade de dados e do fenômeno estudado (Rennó e Soares).

3.2.1 **MODELO SWAT**

O modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) foi desenvolvido pelo Dr. Jeff Arnold do Serviço de Pesquisa Agrícola da USDA (*United States*

Department of Agriculture) em conjunto com diversas agências estaduais e federais dos Estados Unidos. O objetivo principal do modelo é o prognóstico do impacto de mudanças no uso do solo e solos nos recursos hídricos após um longo período de tempo, na ordem de décadas.

O modelo tem seus parâmetros distribuídos e é contínuo no tempo, o que permite que um grande número de processos físicos diferentes seja simulado na bacia. Informações específicas sobre clima, propriedades do solo, topografia, vegetação e práticas de gestão do solo são necessárias para a modelagem dos processos associados a movimentação hídrica, movimentação sedimentar, crescimento de colheitas e ciclo de nutrientes (Neitsch *et al.*, 2011).

O modelo SWAT é utilizado acoplado a uma plataforma SIG (Sistemas de Informações Geográficas), de forma que o modelo hidrológico opera internamente ao *software* e utiliza as funcionalidades da plataforma para integração espacial das variáveis e visualização das camadas de informação (Pessoa, 2010).

Segundo Badissera (2005), os Sistemas de Informações Geográficas são uma ferramenta que tem a capacidade de manipular dados que representam processos ambientais, esses advindos de diversas fontes, como imagens de satélite, mapas de solo e hidrografia, por exemplo. Além disso, os SIG têm a capacidade de segregar áreas de acordo com as características espaciais com facilidade, transformando uma grande área heterogênea em pequenas áreas homogêneas, que são a base para a modelagem. Visto isso, a combinação de modelos hidrológicos e SIG gera uma poderosa ferramenta para análise de bacias hidrográficas (Machado, 2002).

3.2.2 EQUAÇÕES DO MODELO SWAT

A simulação da hidrologia realizada pelo modelo SWAT é dividida em duas partes, a primeira delas é a fase do terreno do ciclo hidrológico, a qual controla a quantidade de água, sedimentos, nutrientes e pesticidas que chega ao canal principal. Os cálculos de balanço hídrico no solo e escoamento superficial estão inseridos nessa fase. A segunda fase é a fase de propagação do ciclo hidrológico na calha dos rios, que vai determinar os fluxos e transformações uma vez que as variáveis foram calculadas na primeira etapa. A vazão e a velocidade do rio, bem como o volume acumulado em um reservatório ao longo do tempo estão nessa fase.

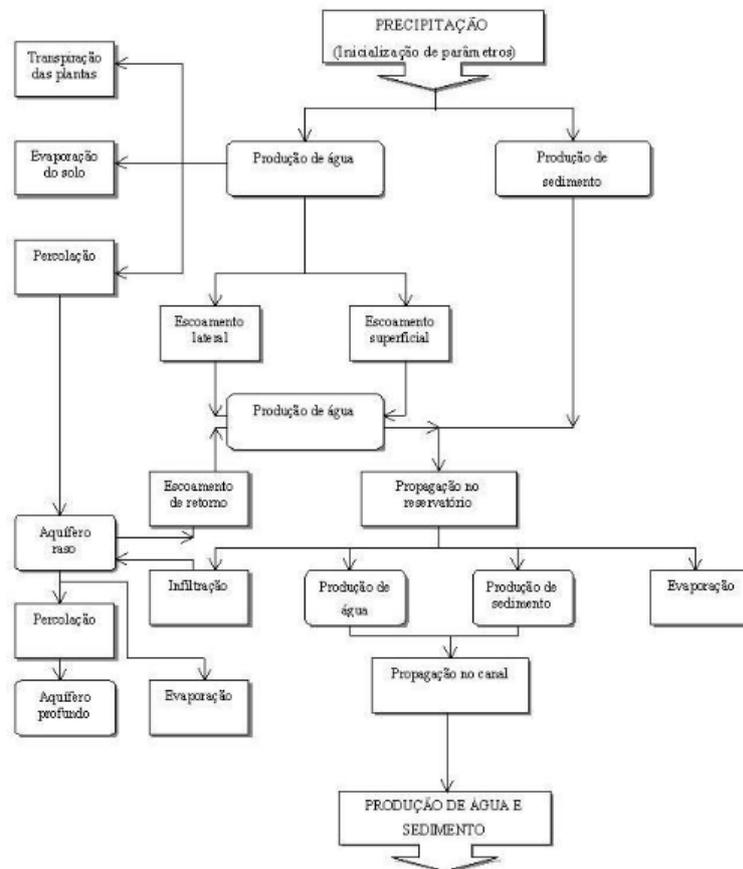


Figura 3 - Fluxograma do SWAT adaptado por Machado (2002) de King *et al* (1996)

3.2.2.1 Ciclo Hidrológico

O balanço hídrico é o principal cálculo de uma Bacia Hidrográfica e deve estar de acordo com os processos que acontecem na bacia (Neitsch *et al.*, 2011), ele pode ser representado através da equação:

$$SW_1 = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{dia} - Q_{sup} - E_a - W_{inf} - Q_{gw}), \quad (1)$$

onde SW_1 é a quantidade de água no solo (mm), SW_0 é a umidade do solo inicial no dia i (mm), t é o tempo (dias), R_{dia} é a quantidade de precipitação no dia i (mm), Q_{sup} é a quantidade de água de escoamento superficial no dia i (mm), E_a é a quantidade de evapotranspiração no dia i (mm), W_{inf} é a quantidade de água que entra na zona de aeração do perfil do solo (zona vadosa) no dia i (mm), e Q_{gw} é a quantidade de retorno do fluxo proveniente do aquífero no dia i (mm) (Neitsch *et al.*, 2011).

3.2.2.2 Escoamento Superficial

A água da chuva pode ser interceptada pelas árvores ou cair na superfície, o que pode ocasionar em infiltração ou escoamento. O escoamento superficial é o fluxo da água em direção ao canal principal e ocorre sempre que a taxa de aplicação da água na superfície excede a taxa de infiltração (Neitsch *et al.*, 2011). O cálculo pelo SWAT é realizado para cada Unidade de Resposta Hidrológica a partir dos dados de precipitação e do método SCS (*Soil Conservation Service*) de Número de Escoamento ou pelo método de infiltração *Green Ampt*.

A equação de escoamento SCS é um modelo empírico e começou a ser utilizado a partir de 1950 (Neitsch *et al.*, 2011), a ideia é a criação de uma base para estimar escoamento em diferentes tipos de solo e uso da terra.

$$Q = \frac{(R_{dia} - I_a)^2}{R_{dia} - I_a + S} \quad (2)$$

Onde Q é o escoamento acumulado (mm), R_{dia} é a intensidade de precipitação para o dia (mm), I_a é a abstração inicial (mm) e S é o parâmetro de retenção (mm). O parâmetro de retenção varia espacialmente devido a alterações no solo, uso do solo e declividade e temporalmente devido a mudanças de umidade, ele é definido como:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

O número de escoamento CN é função da permeabilidade do solo, do uso do solo e condições hídricas anteriores do solo, sua escala é variável entre 1 e 100, sendo o limite inferior uma cobertura permeável enquanto o limite superior representa uma cobertura impermeável. Geralmente, considera-se que a abstração inicial I_a é $0,2S$.

O método de *Green & Ampt* supõe excesso de água de forma permanente para o cálculo da infiltração, o modelo utiliza dados de precipitação sub-diários para calcular a infiltração como função do potencial matricial da frente de molhamento e da condutividade hidráulica. Após a saturação do solo, água que não infiltra começa a “empocar” e em seguida torna-se escoamento superficial.

$$f(t) = K_e \left(\frac{\psi \Delta\theta}{F(t)} + 1 \right) \quad (4)$$

Onde $f(t)$ é a taxa de infiltração no tempo t , K_e é a condutividade hidráulica efetiva, ψ é o potencial matricial da frente de umedecimento, $\Delta\theta$ é a variação da umidade volumétrica e $F(t)$ é a infiltração cumulativa.

A condutividade hidráulica efetiva é calculada através da equação (5), incorporando impactos da cobertura de solo e a condutividade hidráulica saturada do solo.

$$K_e = \frac{56,82 K_{sat}^{0,286}}{1 + 0,051 \exp(0,062 CN)} - 2 \quad (5)$$

Onde K_e é a condutividade hidráulica efetiva (mm/h), K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada (mm/h) e CN é o número de escoamento (do inglês *curve number*).

3.2.2.3 Evapotranspiração

Os processos de evaporação da superfície terrestre e a transpiração da vegetação são denominados evapotranspiração (Chow, *et al.*, 1988). A evapotranspiração inclui os processos nos quais a água é convertida para vapor, é o mecanismo primário pelo qual a água é removida de uma bacia hidrográfica (Neitsch *et al.*, 2011). Portanto, a determinação da evapotranspiração é fundamental para a simulação dos processos hidrológicos e para a avaliação dos impactos de mudanças de uso do solo.

Os dois principais fatores que influenciam a evaporação de uma superfície de água são 1) a transferência de energia para gerar o calor latente de vaporização e 2) a capacidade de transportar o vapor para longe da superfície. A radiação solar é a principal fonte de energia térmica. A capacidade de transportar o vapor para longe da superfície depende da velocidade do vento sobre a superfície e do gradiente de umidade no ar próximo à superfície (Chow, *et al.*, 1988).

A evaporação da superfície terrestre pode ser dividida em: 1) evaporação da superfície da vegetação e do solo e 2) transpiração das folhas da planta. No segundo caso a água é extraída pelas raízes da planta, transportada para cima através do caule e difundida para a atmosfera através de pequenas aberturas nas folhas chamadas estômatos.

3.2.2.3.1 Evapotranspiração Potencial

Segundo Nietsch *et al.* (2011), a evapotranspiração potencial (PET) foi definida por Thornthwaite (1948) como a velocidade pela qual a evapotranspiração ocorreria de uma área coberta de maneira uniforme por vegetação rasteira e com acesso a água do solo e que não foi exposta a advecção ou armazenamento de calor.

O modelo SWAT utiliza três métodos para o cálculo da PET: Penman-Monteith, Priestley-Taylor e Hargreaves.

O método Penman-Monteith utiliza as séries diárias de radiação solar, temperatura, umidade e velocidade do vento. O método leva em consideração a energia necessária para evaporação e o efeito do vento como forçante aerodinâmico para remover vapor d'água da superfície em diferentes vegetações (Neitsch *et al.*, 2011). A equação utilizada é:

$$\lambda E = \frac{\Delta(H_{liq} - G) + \rho_{ar} c_p [e_z^0 - e_z]/r_a}{\Delta + \gamma (1 + \frac{r_c}{r_a})} \quad (6)$$

onde λE é a densidade do fluxo de calor latente ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), E é a taxa de evaporação (mm d^{-1}), Δ é a derivada da curva pressão-temperatura do vapor de saturação ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), H_{liq} é a radiação líquida ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), G é a densidade de fluxo de calor para o solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), ρ_{ar} é a densidade do ar (kg m^{-3}), c_p é o calor específico a pressão constante ($\text{MJ m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), e_z^0 é a pressão de saturação do vapor d'água em uma parcela de ar na altura z (kPa), e_z é a pressão de vapor de água para a altura z (kPa), r_a é a resistência aerodinâmica (s m^{-1}), γ é a constante psicométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) e r_c é a r_c resistência de cobertura da planta (s m^{-1}). Mais detalhes dos termos dessa equação podem ser encontrados em Neitsch *et al.* (2011).

O método de Priestley-Taylor, representado na equação:

$$\lambda E = \alpha_{pet} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (H_{liq} - G) \quad (7)$$

é uma equação mais simplificada que pode ser utilizada quando a superfície está molhada, esse método não leva em consideração a aerodinâmica e o componente de energia foi multiplicado pelo coeficiente α_{pet} . O método de Priestley-Taylor fornece estimativas de evapotranspiração potencial para baixas condições advectivas (Ferrigo, 2014).

O método de Hargreaves tem como objetivo obter a evapotranspiração baseada em poucos dados, pode ser expressado através da equação:

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

Sendo que λ representa o calor latente de vaporização (MJ kg^{-1}), E_0 é a evapotranspiração potencial (mm d^{-1}), H_0 representa a radiação extraterrestre

(MJ m⁻² d⁻¹), T_{max} é a temperatura máxima do dia (°C), T_{min} é a temperatura mínima do dia (°C) e \bar{T}_{av} é a temperatura média do ar para um dado dia (°C).

3.2.2.3.2 Evapotranspiração Real

A evapotranspiração real é obtida uma vez que a evapotranspiração potencial foi determinada. Nietsch *et al.* (2011) explica que o SWAT calcula a precipitação interceptada pelo dossel e depois calcula as quantidades máximas de transpiração e de evaporação do solo.

3.2.2.3.2.1 Evaporação de precipitação interceptada

A água interceptada pelo dossel está disponível para remoção, o SWAT remove o máximo de água possível dessa condição para calcular a evapotranspiração real. Se a evapotranspiração potencial (E_0) for menor que a umidade do solo armazenada dentro do dossel (R_{int}), então:

$$E_a = E_{can} = E_0 \quad (9)$$

$$R_{int(f)} = R_{int(i)} - E_{can} \quad (10)$$

Onde 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) (Nietsch *et al.*, 2011).

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

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

$$R_{int(f)} = 0 \quad (12)$$

3.2.2.3.3 Transpiração

A transpiração pode ser calculada pela equação de Penman-Monteith caso esta seja selecionada ou através das equações (13) e (14), que consideram condições ideais para crescimento de plantas.

$$E_t = \frac{E'_0 \times LAI}{3,0} \quad 0 \leq LAI \leq 3.0 \quad (13)$$

$$E_t = E'_0 \quad LAI > 3.0 \quad (14)$$

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

3.2.2.3.4 Evaporação do solo

A quantidade de evaporação do solo máxima de um determinado dia (E_s) é determinada através da equação (15), a qual é dependente do índice de cobertura do solo cov_{sol} .

$$E_s = E'_0 cov_{sol} \quad (15)$$

Sendo $cov_{sol} = e^{-5(10^{-5}) CV}$ e CV é a biomassa de resíduos acima do solo (kg ha^{-1}). Portanto, quanto maior a biomassa de resíduos do solo, menor é a quantidade de evaporação máxima do solo.

3.2.2.4 Percolação

Depois que a água entra no solo, pode percolar para além da base do perfil e se transformar em reposição aquífera. A percolação ocorre quando a capacidade de umidade do campo é excedida enquanto a camada mais ao fundo não está saturada. A quantidade de água que percola de uma camada para a outra é calculada pela equação:

$$w_{perc} = SW_{dren} \left[1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{TT_{perc}}\right) \right] \quad (16)$$

Onde w_{perc} é a quantidade de água que percola para a próxima camada (mmH₂O), SW_{dren} é o volume de água drenável na camada de solo (mmH₂O), Δt é o intervalo de tempo (horas) e TT_{perc} é o tempo de duração da percolação (horas).

3.2.2.5 Movimentação da água

O modelo SWAT considera os canais com forma de trapézio, sendo que o usuário pode definir a largura, profundidade, comprimento e declive. Caso isso não ocorra, o modelo assume uma proporção de 2:1 para cada lado do canal, uma declividade de 0,5 e a largura inferior (W_{fundo}) é calculada através da equação:

$$W_{fundo} = W_{topo} - 2 z_{canal} profundidade \quad (17)$$

onde W_{topo} é a largura superior, z_{canal} é o inverso dos lados do declive do canal e a *profundidade* é a altura da água no canal, quando cheio.

A área da seção transversal do fluxo (A_{ch}) é calculada pela equação:

$$A_{ch} = (W_{fundo} + z_{canal} profundidade) profundidade \quad (18)$$

O perímetro molhado é definido como a equação:

$$P_{ch} = W_{fundo} + 2 profundidade \sqrt{1 + z_{canal}} \quad (19)$$

O raio hidráulico é calculado através da equação:

$$R_h = \frac{A_{ch}}{P_{ch}} \quad (20)$$

As definições supracitadas são necessárias para o cálculo do fluxo no canal, a equação de Manning (21) é utilizada para um dado intervalo de tempo:

$$q_{ch} = \frac{A_{ch} R_h^{2/3} S_{ch}^{1/2}}{n} \quad (21)$$

onde q_{ch} é a vazão (m³/s), S_{ch} é a declividade ao longo do canal (m/m) e n é o coeficiente de Manning que pode ser definido pelo usuário. Sabendo que a velocidade do fluxo é definida como a razão entre a vazão e a área do canal, temos que:

$$v = \frac{R_h^{2/3} S_{ch}^{1/2}}{n} \quad (22)$$

3.2.2.5.1 Equilíbrio Hídrico do Canal

O armazenamento de água no rio no final de dado intervalo de tempo é calculado pela equação:

$$V_{armaz,2} = V_{armaz,1} + V_{entrada} - V_{saída} - tperda - E_{ch} + div + V_{bnk} \quad (23)$$

onde $V_{armaz,2}$ e $V_{armaz,1}$ são os volumes de água no rio ao final e no início do intervalo temporal, respectivamente (m³H₂O), $V_{entrada}$ é o volume que flui para o rio (m³H₂O), $V_{saída}$ é o volume de água fluindo para fora do rio (m³H₂O), $tperda$ é o volume perdido via transmissão através do leito (m³H₂O), E_{ch} é a evaporação do rio (m³H₂O), div é o volume adicionado ou removido do rio através de desvios (m³H₂O) e V_{bnk} é o volume adicionado através do fluxo de retorno do armazenamento da margem (m³H₂O).

3.2.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CALIBRAÇÃO

O modelo hidrológico SWAT é muito sensível à qualidade dos dados inseridos e, uma vez que a quantidade de informações é grande, é necessário realizar análise de sensibilidade para identificar quais são os parâmetros mais relevantes para os resultados do modelo e posteriormente realizar a calibração desses parâmetros, o que pode reduzir as incertezas.

O software SWAT-CUP foi desenvolvido por Abbaspour *et al.* (2007) para funcionar como uma interface específica para o SWAT, no qual é possível

realizar análise de sensibilidade, calibração, validação e análise de incertezas com diferentes métodos.

O algoritmo SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting*) é utilizado para realizar a calibração semi-automática do modelo. O método utiliza um intervalo de valores com significância física para os parâmetros definido pelo usuário, que são testados de acordo com a função objetivo (ex. Nash-Sutcliffe e Pearson). A análise de sensibilidade individual de cada parâmetro é realizada durante as iterações, ela é feita variando cada parâmetro dentro do intervalo determinado mantendo outros constantes (Ferrigo, 2014). Para definir os valores, é utilizado o método do hipercubo latino, sendo que o número de combinações de parâmetros é o mesmo número de iterações definido pelo usuário.

A incerteza é calculada a partir de todas as possíveis incertezas de entradas e saídas, sendo quantificada por 95% da incerteza de previsão (95PPU), calculada nos níveis de 2,5% e 97,5% da distribuição cumulativa de uma variável de saída (Ferrigo, 2014). Há duas medidas principais da eficiência da análise de incerteza da calibração, o p-factor e o r-factor.

O p-factor trata-se da percentagem de dados observados envolvidos pelo 95PPU enquanto o r-factor é a espessura do 95PPU. Portanto, os valores que indicam simulações que correspondem exatamente aos dados observados são de p-factor igual a 100% e r-factor igual a 0. Segundo Abbaspour (2015), os valores sugeridos para as medidas são de >70% para o p-factor e próximo a 1 para o r-factor.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

Foram utilizados os seguintes programas computacionais para elaboração do trabalho:

- Software ArcGIS 10.4
- SWAT (Soil and Water Assessment Tool) versão 2012
- Software QuantumGIS Desktop 2.18
- Software SWAT-CUP

4.2 DADOS DE ENTRADA

Sendo um modelo físico, o SWAT requer uma grande quantidade de informações relativas às características físicas da bacia para então realizar a modelagem do escoamento, dos sedimentos, do crescimento de culturas e da ciclagem de nutrientes.

Os Planos de Informação Cartográficos (PI's) necessários para o funcionamento do modelo são: o Modelo Digital de Elevação (MDT ou DEM - *Digital Elevation Model*), o mapa de uso da terra e o mapa de solos. Dados alfanuméricos também são requisitados, séries históricas de dados meteorológicos, propriedades do solo e categorias de uso de solo são adicionados no banco de dados do modelo. Além disso, séries históricas de dados fluviométricos são necessárias para as etapas de análise de sensibilidade e calibração da vazão.

4.2.1 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

O Modelo Digital de Elevação é uma representação matemática de uma característica que ocorre na superfície terrestre (Antunes, 2007), os dados são apresentados através de coordenadas x, y, z sendo z função das outras duas componentes.

Os MDTs são muito utilizados para armazenamento de dados altimétricos; análises de corte-aterro de projetos de barragens e estradas; elaboração de mapas de declividade, erodibilidade, drenagem e curvas de nível e análises de variáveis geofísicas e geoquímicas. No SWAT, a principal função do Modelo Digital do Terreno é a realização da delimitação automática da bacia hidrográfica e determinar as direções de fluxo superficial.

O Modelo Digital de Elevação utilizado foi obtido por meio do Instituto das Águas do Paraná e foi gerado no do software Arcinfo, através dos dados de hipsometria linear (curvas de nível), hipsometria pontual (pontos cotados) e hidrografia, a qual foi acrescentada como linhas de quebra sem valores de altitudes. As linhas de quebra permitem uma representação mais fiel do terreno, uma vez que não ocorrerá a suavização de locais com vales ou cristas.

A matriz regular (DEM) foi gerada a partir da utilização do módulo TIN (*Triangulated Irregular Network*) por meio de interpolação de uma malha de pontos, com a resolução de 10 metros, portanto, a grade irregular é formada por triângulos, cujos vértices são, geralmente, pontos de altitude conhecida que foram amostrados. O Modelo Digital de Elevação para a Bacia do Rio Verde pode ser visualizado através da Figura 4.

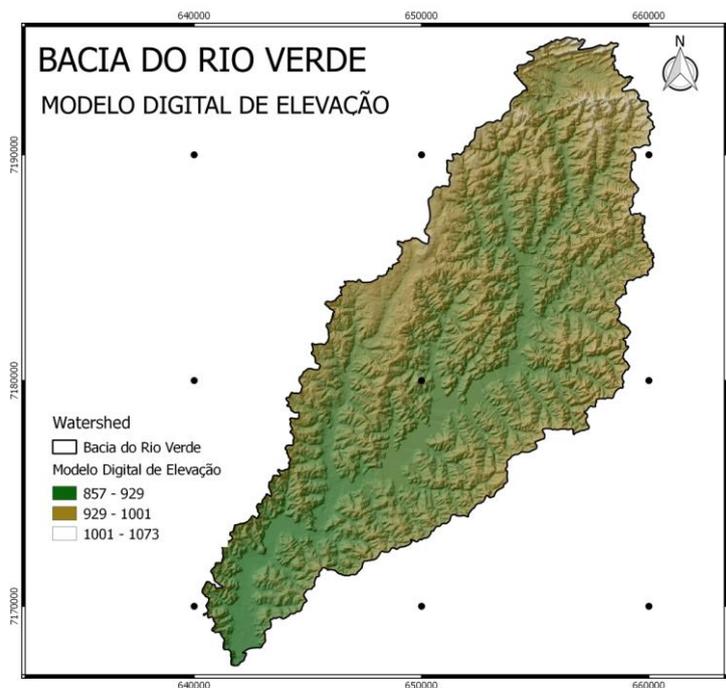


Figura 4 - Modelo Digital de Elevação para a Bacia do Rio Verde com cotas altimétricas em metros

4.2.2 MAPA DE USO DO SOLO

O mapa de uso da terra, obtido através do Instituto das Águas do Paraná, foi gerado através de sensoriamento remoto e interpretação de fotos aéreas ortorretificadas de junho de 2000. Ortofotos são produtos cartográficos que reúnem as vantagens da fotografia aérea com cartografia vetorial (Antonio, 2004), possuem escala constante, permitindo a realização de diversas medições e cálculos.

O mapa contém informações de uso e cobertura do solo, seja natural ou antrópica, como áreas urbanas, atividades agropecuárias e industriais divididas em 22 classes, como mostrado na Figura 5.

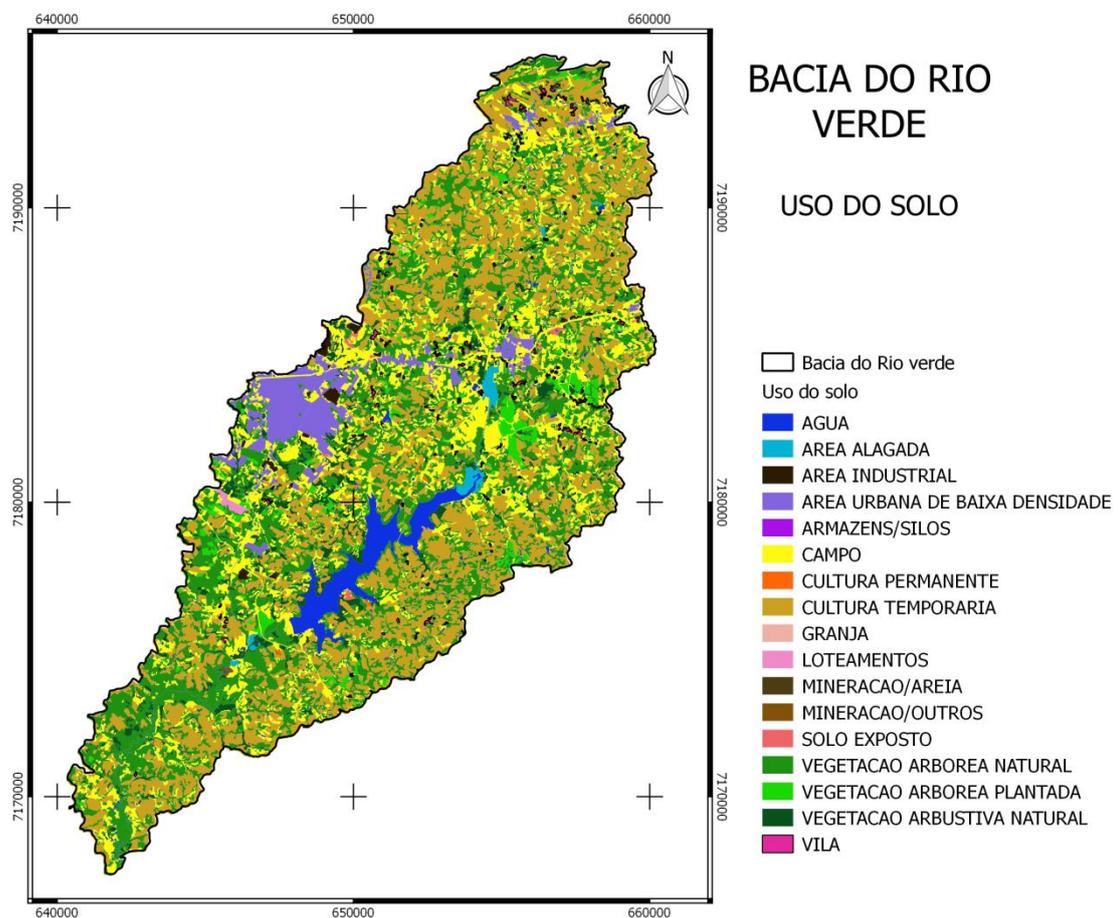


Figura 5 - Mapa de Uso da Terra para a Bacia do Rio Verde

A tabela 1 foi escrita de acordo com o cálculo de porcentagem de áreas das classificações de uso e cobertura do solo do mapa supracitado.

Tabela 1 - Uso e cobertura do solo na Bacia do Rio Verde

| USO/COBERTURA DO SOLO | ÁREA (km ²) | PORCENTAGEM |
|-------------------------------|-------------------------|-------------|
| Cultura Temporária | 77.25 | 32.4 |
| Vegetação Arbórea Natural | 76.21 | 31.9 |
| Campo | 44.22 | 18.5 |
| Vegetação Arbustiva Natural | 12.93 | 5.40 |
| Área Urbana (baixa densidade) | 9.75 | 4.08 |
| Água | 7.53 | 3.15 |
| Vegetação Arbórea Plantada | 5.68 | 2.40 |
| Vila | 1.75 | 0.73 |
| Área Alagada | 1.24 | 0.52 |
| Área Industrial | 1.12 | 0.47 |
| Solo exposto | 0.48 | 0.20 |
| Loteamentos | 0.31 | 0.13 |
| Mineração/Outros | 0.1 | 0.04 |
| Cultura Permanente | 0.085 | 0.03 |
| Granja | 0.045 | 0.019 |
| Armazéns/Silos | 0.036 | 0.015 |
| Mineração/Areia | 0.008 | 0.003 |

4.2.3 MAPA DE SOLO

O mapa de tipos de solo é necessário na modelagem, pois sabe-se que os tipos de solos determinam como o ciclo hidrológico funciona na bacia e quais plantas podem ocorrer.

É possível observar no mapa de solo (Cunha, 2011) que as classes de solo na Bacia Hidrográfica do Rio Verde (Figura 6) são Cambissolo (Ca5), Glei Pouco Húmico Distrófico (HGPd2), Solos orgânicos (HOa1), Latossolo Vermelho-Escuro (LEd3), Latossolos Vermelho-Amarelo Distrófico LVa5 (textura argilosa) e LVa13 (textura média), Podzólico Vermelho-Amarelo PVa12 (textura média/argilosa cascalhenta) e PVa21 (textura argilosa).

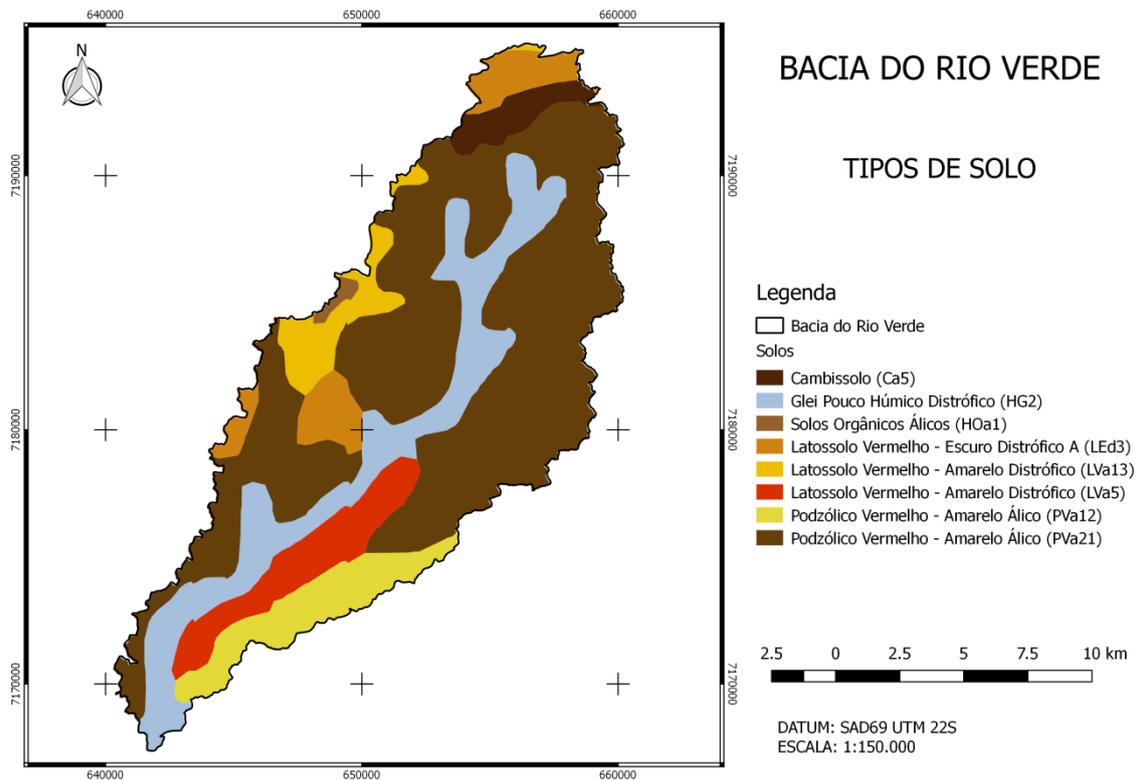


Figura 6 - Mapa de Tipos de Solo da Bacia do Rio Verde

Além do mapa, o modelo exige que uma série de propriedades dos solos sejam adicionados ao banco de dados. Baldissera (2005) resumiu as características físicas necessárias ao modelo:

- SNAM é a classificação do solo (nome dados a cada classe)
- NLAYERS é o número layers de informação (números de horizontes)
- HYDGRP é o grupo de mínima saturação hidráulica (A, B, C e D)
- SOL_ZMX é a profundidade máxima de solo que a raiz alcança (mm)
- ANION_EXCL é a fração de porosidade do solo (fração)
- SOL_Z é a profundidade de cada horizonte (mm)
- SOL_BD é a densidade do solo (g/cm)
- SOL_AWC é a capacidade de água do solo (mm/mm)
- SOL_K é a condutividade hidráulica saturada (mm/hr)
- SOL_CBN é o conteúdo de carbono orgânico do solo (%peso solo)
- CLAY é a porcentagem de argila no solo (%peso solo)
- SILT é a porcentagem de silte no solo (%peso solo)

SAND é a porcentagem de areia no solo (%peso solo)

ROCK é a porcentagem de cascalho no solo (% volume)

SOL_ALB é o albedo do solo (fração)

USLE_K é o fator de erodibilidade do solo (0,013 t.m².hr/m³.t.cm)

Os valores dos parâmetros estão dispostos na tabela (2) e foram gentilmente cedidos pela professora Cynara Cunha. Os cálculos foram feitos por Soares (2011) e foram baseados nos dados da Embrapa (1984) referente as porcentagens de silte, areia, argila, carbono orgânico e densidade e combinados com os valores descritos por Baldissera (2005).

Soares (2011) explica que os cálculos da condutividade hidráulica e da capacidade de água do solo foram feitos através do programa Splintex (Prevedello, 2000), enquanto os dados de albedo, densidade aparente e porosidade foram baseados no trabalho de Baldissera (2005).

Tabela 2 - Parâmetros físicos dos Solos para a Bacia do Rio Verde

| Classes | Ca05 | HG2 | HOa1 | LEd3 | LVa5 | LVa13 | PVa12 | PVa21 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| NLAYERS | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 4 | 2 | 2 |
| HYDGRP | B | B | B | B | B | B | B | B |
| SOL_ZMX | 50 | 500 | 79 | 100 | 70 | 280 | 600 | 600 |
| ANION_EXCL | 0,47 | 0,39 | 0,4 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,32 | 0,32 |
| SOL_Z1 | 25 | 200 | 32 | 20 | 20 | 40 | 200 | 200 |
| SOL_BD1 | 1,6 | 1,4 | 1,6 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,7 | 1,7 |
| SOL_AWC1 | 0,09 | 0,17 | 0,07 | 0,09 | 0,07 | 0,18 | 0,14 | 0,25 |
| SOL_K1 | 10,50 | 14,13 | 7,80 | 7,80 | 7,80 | 19,01 | 17,22 | 53,00 |
| SOL_CBN1 | 1,38 | 1,9 | 2,95 | 0,59 | 0,84 | 2,86 | 3,88 | 0,95 |
| CLAY1 | 54 | 30 | 28 | 13 | 42 | 50 | 40 | 23 |
| SILT1 | 28 | 43 | 8 | 4 | 14 | 14 | 27 | 14 |
| SAND1 | 18 | 27 | 64 | 83 | 44 | 36 | 33 | 63 |
| ROCK1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_ALB1 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| USLE_K1 | 0,25 | 0,26 | 0,13 | 0,10 | 0,20 | 0,16 | 0,21 | 0,19 |
| SOL_Z2 | 50 | 500 | 58 | 100 | 70 | 80 | 600 | 600 |
| SOL_BD2 | 1,4 | 1,5 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 |
| SOL_AWC2 | 0,11 | 0,20 | 0,27 | 0,39 | 0,15 | 0,14 | 0,11 | 0,20 |
| SOL_K2 | 10,50 | 19,01 | 49,20 | 82,90 | 19,65 | 17,22 | 14,13 | 31,19 |
| SOL_CBN2 | 0,68 | 0,3 | 1,49 | 0,26 | 0,47 | 1,05 | 0,55 | 0,52 |
| CLAY2 | 53 | 23 | 33 | 27 | 45 | 52 | 55 | 36 |

| | | | | | | | | |
|----------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|
| SILT2 | 29 | 41 | 5 | 4 | 18 | 15 | 18 | 13 |
| SAND2 | 18 | 36 | 62 | 69 | 37 | 33 | 27 | 51 |
| ROCK2 | 2 | 0 | 1 | 0 | 6 | 0 | 1 | 0 |
| SOL_ALB2 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| USLE_K2 | 0,30 | 0,33 | 0,12 | 0,13 | 0,23 | 0,20 | 0,24 | 0,20 |
| SOL_Z3 | - | - | 79 | - | - | 130 | - | - |
| SOL_BD3 | - | - | 1,7 | - | - | 1,7 | - | - |
| SOL_AWC3 | - | - | 0,22 | - | - | 0,13 | - | - |
| SOL_K3 | - | - | 35,59 | - | - | 16,66 | - | - |
| SOL_CBN3 | - | - | 1,29 | - | - | 0,33 | - | - |
| CLAY3 | - | - | 34 | - | - | 54 | - | - |
| SILT3 | - | - | 11 | - | - | 14 | - | - |
| SAND3 | - | - | 55 | - | - | 32 | - | - |
| ROCK3 | - | - | 1 | - | - | 0 | - | - |
| SOL_ALB3 | - | - | 0,15 | - | - | 0,15 | - | - |
| USLE_K3 | - | - | 0,16 | - | - | 0,22 | - | - |
| SOL_Z4 | - | - | - | - | - | 280 | - | - |
| SOL_BD4 | - | - | - | - | - | 1,6 | - | - |
| SOL_AWC4 | - | - | - | - | - | 0,11 | - | - |
| SOL_K4 | - | - | - | - | - | 13,22 | - | - |
| SOL_CBN4 | - | - | - | - | - | 0,14 | - | - |
| CLAY4 | - | - | - | - | - | 66 | - | - |
| SILT4 | - | - | - | - | - | 9 | - | - |
| SAND4 | - | - | - | - | - | 25 | - | - |
| ROCK4 | - | - | - | - | - | 1 | - | - |
| SOL_ALB4 | - | - | - | - | - | 0,15 | - | - |
| USLE_K4 | - | - | - | - | - | 0,19 | - | - |

4.2.4 DADOS METEOROLÓGICOS

Os dados meteorológicos exigidos pelo SWAT são precipitação, temperaturas máximas e mínimas, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. Dados climáticos datados de 1961 a 2015 da Estação de Curitiba foram providenciados pelo SIMEPAR.

O modelo também exige o chamado “Gerador Climático”, que contém dados estatísticos sobre as variáveis climáticas na bacia. Com essas informações, o SWAT consegue produzir dados faltantes das séries de medições. Baldissera (2005) definiu os parâmetros necessários ao Gerador Climático:

PCPMM: Precipitação média (mm)
 PCPSTD: Desvio da precipitação (mm)
 PCPD: Número de dias de precipitação
 RAINHHMX: Precipitação máxima de 0,5 hora (mm)
 TMPMX: Temperatura máxima (°C)
 TMPMN: Temperatura mínima (°C)
 MPSTDMX: Desvio da temperatura máxima (°C)
 MPSTDMN: Desvio da temperatura mínima (°C)
 SOLARAV: Valor diário da energia solar (MJ.m².dia⁻¹)
 WNDVAV: Velocidade do vento (m/s)
 DEWPT: Temperatura do ponto de orvalho (°C)
 PR_W1: Probabilidade de dias de chuva seguido de dias de seca (%)
 PR_W2: Probabilidade de dias de chuva seguido de dias de chuva (%)
 PCPSKW: Coeficiente de assimetria para a precipitação máxima

A tabela 3 mostra os dados adicionados ao banco de dados do modelo.

Tabela 3 - Parâmetros climáticos da Estação de Curitiba

| Variável/Mês | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TMPX | 26.85 | 27.15 | 26.79 | 24.5 | 20.5 | 20.72 | 19.57 | 21.79 | 21.56 | 23.39 | 24.47 | 26.01 |
| TMPMN | 17.36 | 17.66 | 17.07 | 15.17 | 11.12 | 10.78 | 9.36 | 10.26 | 11.73 | 13.94 | 14.55 | 16.07 |
| MPSTDMX | 3.45 | 2.92 | 3.39 | 3.41 | 3.6 | 3.82 | 4.55 | 4.75 | 5.43 | 4.65 | 4.18 | 4.01 |
| MPSTDMN | 2.76 | 2.06 | 2.63 | 3.2 | 3.53 | 3.31 | 3.61 | 3.41 | 3.17 | 2.24 | 2.39 | 2.99 |
| PCPMM | 170.9 | 147.1 | 146.3 | 79.62 | 84.86 | 69.4 | 102.1 | 73.96 | 153.1 | 131.6 | 108.9 | 119.8 |
| PCPSTD | 11.09 | 13.23 | 11.23 | 7.22 | 8.167 | 7.353 | 8.563 | 8.971 | 12.77 | 10.23 | 8.587 | 10.38 |
| PCPSKW | 3.229 | 5.544 | 3.207 | 3.68 | 4.898 | 4.221 | 3.703 | 6.299 | 3.692 | 4.4 | 3.859 | 7 |
| PR_W1 | 0.408 | 0.306 | 0.313 | 0.253 | 0.242 | 0.174 | 0.212 | 0.162 | 0.249 | 0.324 | 0.298 | 0.35 |
| PR_W2 | 0.705 | 0.703 | 0.633 | 0.527 | 0.545 | 0.461 | 0.559 | 0.512 | 0.574 | 0.527 | 0.566 | 0.614 |
| PCPD | 19 | 14.8 | 15 | 11 | 11.2 | 7.6 | 10.2 | 8.2 | 11.5 | 13.1 | 12.9 | 15.3 |
| RAINHHMX | 50.32 | 60.09 | 31.38 | 28.71 | 11.25 | 16.13 | 26.2 | 26.2 | 19.68 | 23.53 | 18.65 | 30.64 |
| SOLARAV | 15.95 | 15.58 | 14.29 | 12.31 | 9.97 | 8.86 | 8.97 | 11.53 | 11.44 | 13.37 | 16.08 | 16.37 |
| DEWPT | 16.82 | 17.18 | 16.85 | 15.02 | 11.32 | 11.09 | 9.61 | 10.08 | 11.6 | 13.88 | 14.28 | 15.95 |
| WNDVAV | 2.17 | 2.12 | 1.94 | 1.99 | 1.92 | 1.86 | 1.97 | 2.04 | 2.29 | 2.3 | 2.42 | 2.52 |

Foram gerados gráficos a partir dos dados meteorológicos da Estação de Curitiba. A figura 7 mostra as temperaturas máximas e mínimas diárias para a região durante o ano de 2009.

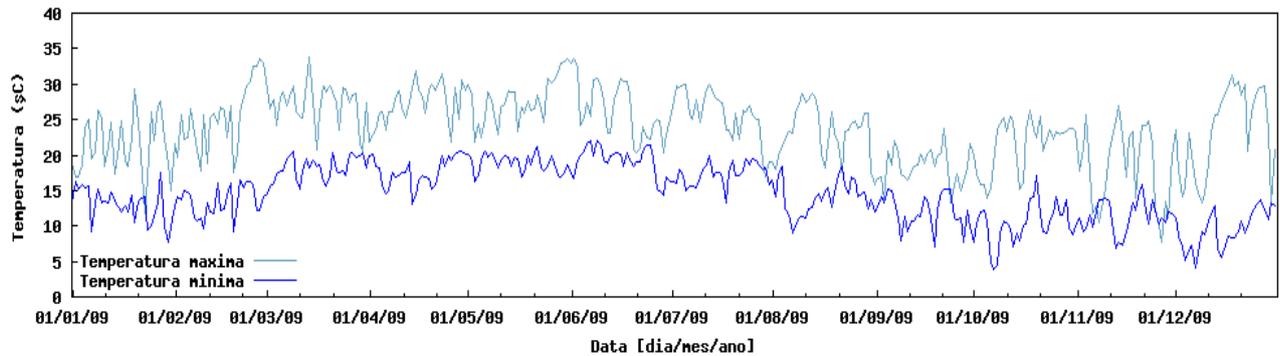


Figura 7 – Valores das Temperaturas máximas e mínimas para o ano de 2009

A figura 8 mostra o gráfico gerado com os dados diários de umidade relativa para o ano de 2009.

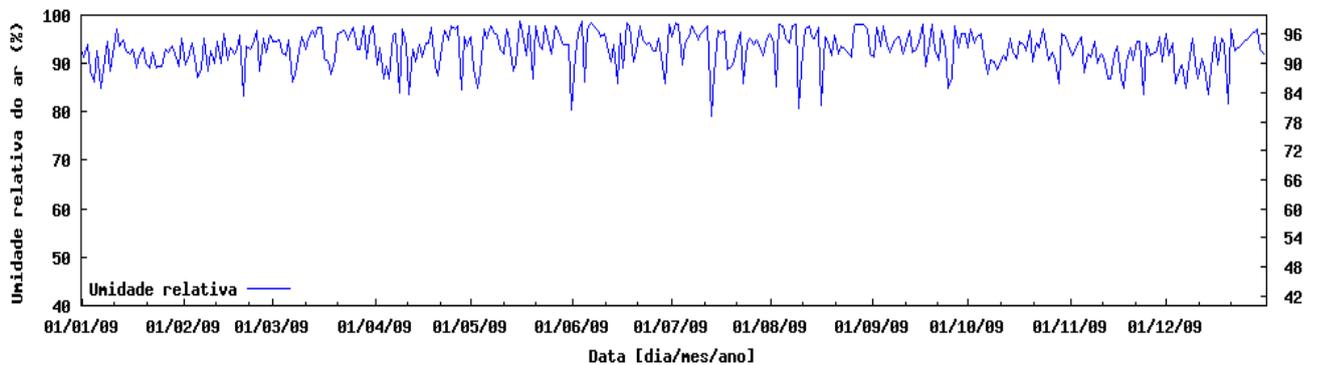


Figura 8 – Valores da Umidade relativa do ar para o ano de 2009

4.2.5 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Conforme citado anteriormente o modelo SWAT utiliza três métodos para o cálculo da evapotranspiração potencial: Penman-Monteith, Priestley-Taylor e Hargreaves. Na simulação foi utilizado o método Penman-Monteith.

4.2.6 PRECIPITAÇÃO

Os dados de precipitação também foram obtidos através da plataforma Hidroweb da Agência Nacional de Águas, a figura (10) mostra o polígono retangular abrangendo a Bacia com vértices em 636.299,059 m; 7.164.887,256 me 667.996,047 m; 7.203.574,197 m que foi delimitado para deferir as estações pluviométricas a serem utilizadas.

O modelo realiza uma ponderação para extrair os dados das estações mais próximas de cada sub-bacia para uma maior acurácia na modelagem das variáveis hidrológicas.

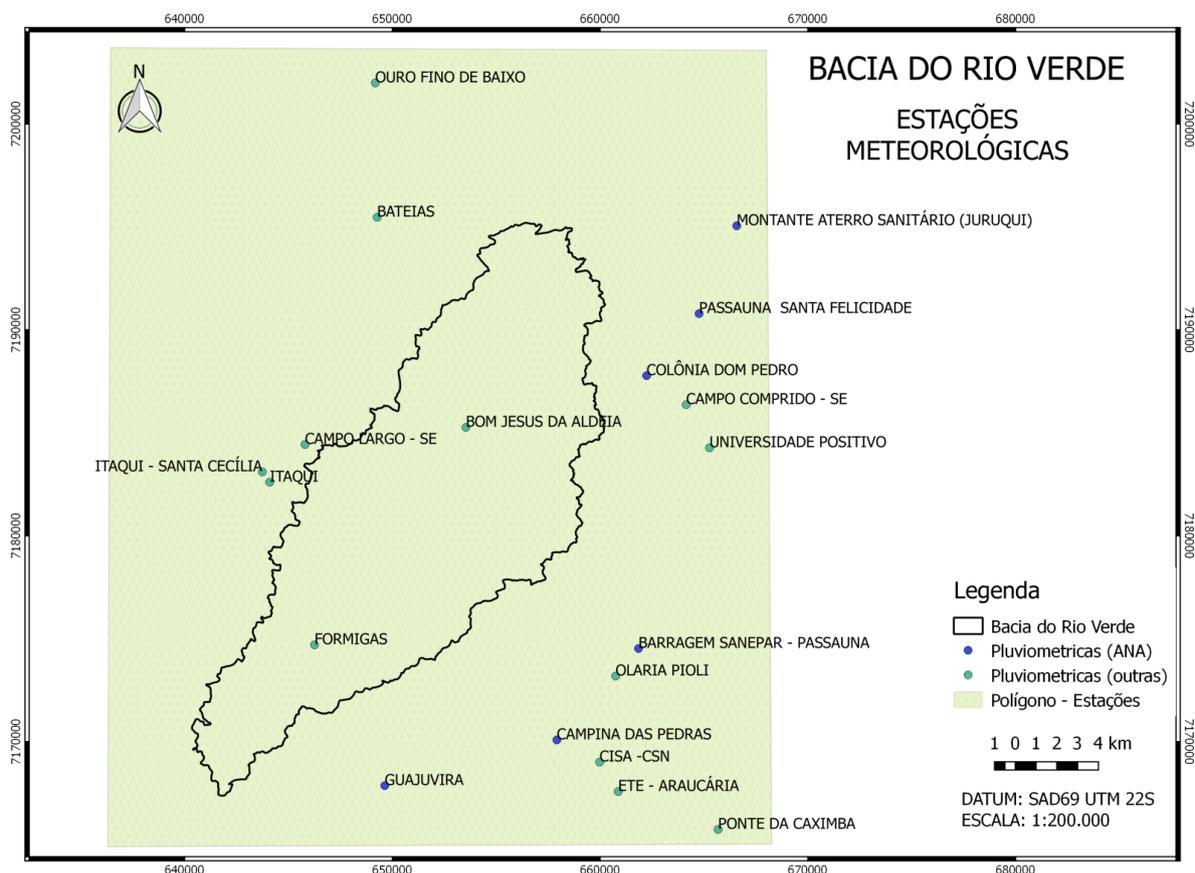


Figura 9 - Estações pluviométricas próximas à Bacia do Rio Verde

Considerando estações inseridas na área de cobertura, ainda foi feita uma filtragem de acordo com o período de dados. As estações escolhidas estão listadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Estações climáticas para os dados pluviométricos

| Estação | Código | Coordenada X | Coordenada Y | Período de dados | Agência |
|-----------------------------|---------|--------------|--------------|------------------|--------------|
| Itaqui | 2549019 | 644092.3065 | 7182598.5284 | 1964-2015 | Águas Paraná |
| Bateias | 2549045 | 649263.2072 | 7195468.9914 | 1974-2015 | Águas Paraná |
| Ouro Fino de Baixo | 2549048 | 649174.3455 | 7201994.3642 | 1974-2015 | Águas Paraná |
| Barragem Sanepar (Passaúna) | 2549081 | 661844.1797 | 7174519.3105 | 1983-2015 | ANA |
| Campina das Pedras | 2549082 | 657912.1247 | 7170079.8581 | 1984-2015 | ANA |
| Colônia Dom Pedro | 2549080 | 662235.9221 | 7187774.9075 | 1984-2015 | Águas Paraná |
| Guajuvira | 2549093 | 649628.7231 | 7167860.2437 | 1990-2015 | ANA |
| Universidade Positivo | 2549126 | 665261.2358 | 7184270.5570 | 2000-2015 | Águas Paraná |

4.2.7 VAZÃO

Os dados de vazão não são adicionados ao modelo, entretanto, são utilizados para fins de avaliação dos dados de precipitação, além da realização da análise de sensibilidade e calibração.

Os dados de vazão da Estação Formigas (código 65026950), localizada no Rio Verde nas coordenadas UTM 646.248,31 e 7.174.699,2703 metros, foram obtidos através da plataforma Hidroweb da Agência Nacional de Águas. A estação possui informações diárias de vazão para os anos entre 1999 e 2010.

A Figura 10 mostra os dados de precipitação da Estação Itaqui juntamente com os dados de vazão da Estação Formigas para o ano de 2009, a qual fica a jusante do reservatório. A vazão é mostrada em uma linha contínua com valores de acordo com o eixo vertical principal à esquerda, enquanto a precipitação é mostrada na forma de pulsos obedecendo ao eixo vertical invertido secundário à direita.

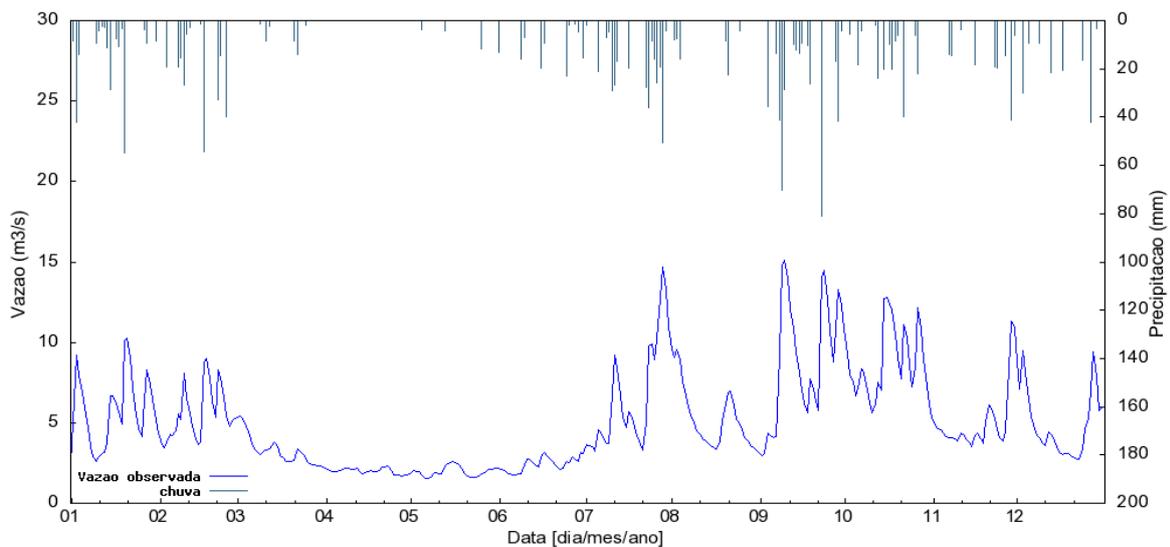


Figura 10 – Valores de Chuva-Vazão para a Estação Formigas

Além da Estação Formigas, também foram utilizados dados de vazão a montante do Reservatório do Rio Verde da Estação Haras do Rio Verde (código 65025500), cujos valores estão dispostos no gráfico da Figura 11.

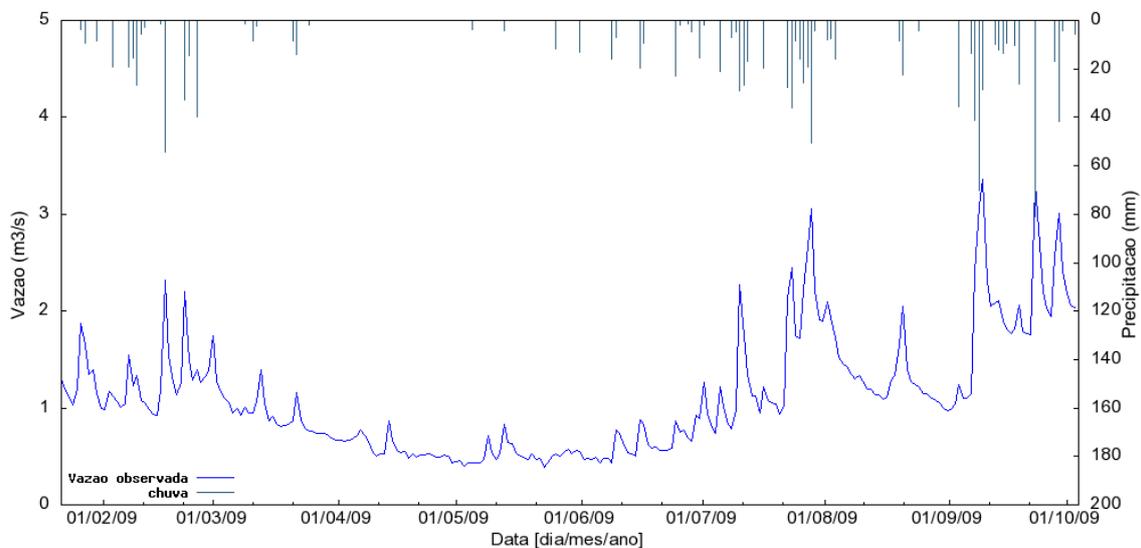


Figura 11 – Valores de Chuva-Vazão para a estação à montante do Reservatório

4.3 APLICAÇÃO DO MODELO

Como o SWAT é um modelo hidrológico fisicamente distribuído, a quantidade de dados necessários à simulação dos processos é grande. Após a aquisição dessas informações, é possível então modelar o movimento da água, dos sedimentos, do crescimento de culturas e a ciclagem de nutrientes. A modelagem pode ser dividida nos seguintes módulos:

1. Delimitação da Bacia Hidrográfica
2. Uso do Solo e Solos
3. Definição das HRUs (Unidades de Resposta Hidrológica)
4. Definição das estações climáticas
5. Parametrização dos Mapas de Entrada com o Banco de dados do SWAT
6. Execução do Modelo
7. Leitura dos Resultados e Geração de Gráficos
8. Análise de Sensibilidade e Calibração

As etapas da modelagem serão descritas a seguir.

4.3.1 DELINEAMENTO DA BACIA

O delineamento automático da Bacia Hidrográfica do Rio Verde é realizado através da ferramenta “*Watershed Delineation*” (Delineação da Bacia Hidrográfica), que se baseia no Modelo Digital de Elevação (MDE), fornecido pelo Instituto das Águas do Paraná. A ferramenta utiliza um programa TAUDM (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models* ou Análise de Terreno Utilizando Modelos Digitais de Elevação, em português), realizando a extração dos dados de topografia do MDE.

O Fluxo de Direção D8 é o método utilizado pelo programa para determinar o escoamento através da determinação da direção da declividade, analisando a altitude das oito células vizinhas e direcionando o escoamento a partir de passos descendentes, da célula de maior altitude para a de menor altitude (Brandão, 2009).

O exutório é definido como o ponto fixo para o qual o escoamento superficial converge, ele caracteriza o fim da bacia. O usuário determina o exutório e pode adicionar pontos intermediários ao longo da bacia de estudo, determinando saídas de sub-bacias e de reservatórios. A vantagem é a possibilidade de comparação dos resultados com dados das estações disponíveis, o delineamento da Bacia do Rio Verde pode ser visualizado na Figura 12.

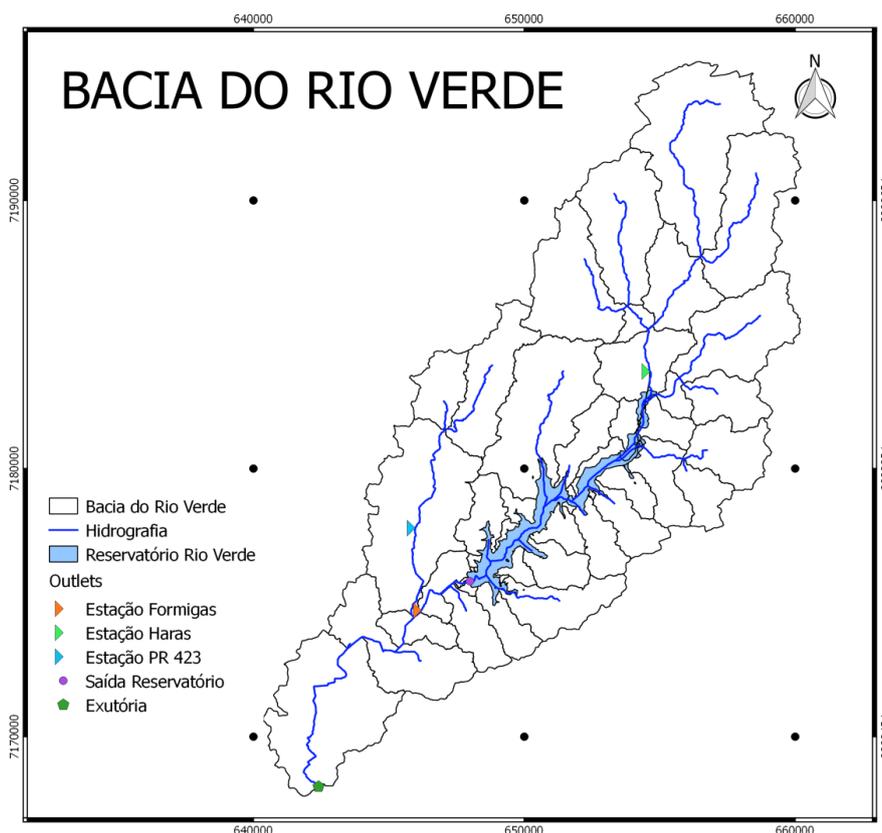


Figura 12 - Delineamento automático da Bacia do Rio Verde

4.3.2 UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA

As Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) são áreas acidentadas dentro das sub-bacias com características hidrológicas únicas, baseadas em combinações particulares de uso da terra, solo e declives. A vantagem da divisão do território em HRUs é o aumento da acurácia e o fornecimento de uma descrição física aprimorada, pois o escoamento é calculado para cada Unidade de Resposta Hidrológica (Neitsh *et al.*, 2011).

Para definir as HRUs, é necessária a criação de um banco de dados contendo dados de solo e uso do solo. Além dos mapas específicos, uma tabela com informações para as camadas de solo é requerida,

O SWAT faz a parametrização dos mapas de entrada a partir das características fornecidas nas tabelas do banco de dados. Para o uso do solo, não foram inseridas informações adicionais, duas tabelas inerentes ao modelo foram utilizadas, sendo que uma tem os parâmetros das principais plantas e a outra possui parâmetros relevantes para o ciclo hidrológico, como densidade urbana, áreas permeáveis e números de escoamento (condição 2, do método SCS).

4.3.3 INSERÇÃO DO RESERVATÓRIO

Durante a etapa de delineamento da bacia, é possível escolher pontos de saída de reservatórios e antes da execução do modelo, deve-se inserir as características principais do mesmo. O modelo exige dados de volume, área e vazão média de saída. Estas informações estão sumarizadas na tabela 5 (Andreoli, 2011):

Tabela 5 - Características do Reservatório do Rio Verde

| RESERVATÓRIO | |
|------------------------------|----------------------------|
| Área do reservatório | 7,9 km ² |
| Volume médio | 25.643.732 km ³ |
| Volume na cota do vertedouro | 34.000.000 km ³ |
| Superfície | 5.972 km ² |
| Vazão média | 2.26 m ³ /s |

O modelo exige dados para duas situações distintas: quando o reservatório encontra-se operando normalmente e quando o mesmo está em estado de emergência, com volume e área máximos.

4.3.4 EXECUÇÃO DO MODELO

Depois de criar as Unidades de Resposta Hidrológica com os dados de solo, uso do solo e declividade, insere-se o período de simulação, bem como os dados climáticos. É possível escolher a frequência dos resultados (diária, mensal ou anual), o método de cálculo para a Evapotranspiração Potencial, a distribuição de chuva (normal ou exponencial) e o método de infiltração. O modelo está pronto para ser executado.

4.3.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CALIBRAÇÃO

A análise de sensibilidade é o primeiro passo da calibração do modelo, a seleção dos parâmetros é feita inicialmente de acordo com a literatura. Ferrigo (2014) explica que há dois tipos de parâmetros, os físicos e os de processo. Os parâmetros físicos representam características físicas da bacia e são mensuráveis, como declividade. Os parâmetros de processo são aqueles que não são medidos, como a profundidade da capacidade de armazenamento de água no solo.

Os parâmetros de processo e os físicos de difícil medição são calibrados. Arnold *et al.* (2012) sumarizaram os parâmetros mais utilizados, considerando 64 estudos, de acordo com o processo a ser calibrado. Para a calibração do escoamento, os parâmetros recomendados estão listados na tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros para calibração

| Parâmetro | Descrição | Unidade |
|-----------|---|--------------------------------|
| CN2 | Valor Curva Número, método SCS | adm. |
| SOL_K | Condutividade hidráulica saturada | mm/hr |
| SOL_ALB | Albedo do solo | |
| SOL_AWC | Capacidade de água disponível no solo | mmH ₂ O/ mm solo |
| Ch_N2 | Coeficiente de Manning para o canal principal | adm. |

| | | |
|-----------|--|--------|
| Ch_K2 | Condutividade hidráulica efetiva no canal principal | mm/hr |
| ESCO | Fator de compensação da evaporação do solo | adm. |
| EPCO | Fator de compensação da evaporação da planta | adm. |
| SURLAG | Coeficiente de escoamento superficial | adm. |
| ALPHA_BF | Fator de recessão do escoamento de base | Dia |
| GW_REVAP | Coeficiente de reevaporação da água subterrânea | Dia |
| GW_DELAY | Tempo de retardo do escoamento subterrâneo | Dia |
| GWQWN | Profundidade limite da água no aquífero raso para ocorrer fluxo de retorno | mm |
| REVAPMN | Profundidade da água no aquífero raso para ocorrer percolação | Mm |
| RCHARG_DP | Fração de água percolada para o aquífero | Fração |

A análise de sensibilidade, entretanto, não deve ser limitada aos parâmetros recomendados. Ferrigo (2014) mostrou que obteve resultados inadequados ao utilizar somente os parâmetros recomendados e defende a base em outros estudos e experiência para selecionar os parâmetros adequados.

Ao realizar a análise de sensibilidade com o SWAT-CUP, há duas medidas estatísticas para análise dos resultados. O *p-value* determina a significância da sensibilidade dos parâmetros e os valores próximos de zero indicam maior a significância. O *t-stat* indica o grau de sensibilidade, quanto maior o valor, mais sensível é o parâmetro (Abbaspour, 2011).

Depois da seleção dos parâmetros com base na análise de sensibilidade, inicia-se o processo de calibração para melhor parametrização do modelo. Normalmente, escolhe-se três períodos: de aquecimento, de calibração e de validação dependendo da disponibilidade de dados hidrológicos. Para o método SUFI2 (*Sequential Uncertainty Fitting*), Abbaspour et al (2011) recomenda cerca de 500 simulações para cada iteração, o método utiliza um intervalo escolhido

pelo usuário o qual é amostrado com o método Hipercubo Latino e testados de acordo com a função objetivo.

O coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE) é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual em comparação com a variação dos dados de medição (Ferrigo, 2014). O índice varia de $-\infty$ a 1, Moriasi *et al.* (2007) explica que valores entre 0 e 1 são considerados aceitáveis. O NSE é calculado através da equação (24):

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_i (Q_m - Q_s)^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \right] \quad (244)$$

Onde Q é a variável e m e s são para valores medidos e simulados, respectivamente, \bar{Q} é a média da variável (Abbaspour *et al.*, 2011).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A área da bacia do Rio Verde foi dividida em 19 sub-bacias (Figura 13) e o modelo foi utilizado para simular o escoamento entre 1999 a 2016, sendo os 6 anos iniciais o período de aquecimento. A calibração foi realizada para o ano de 2009, de acordo com dados medidos na sub-bacia 10.

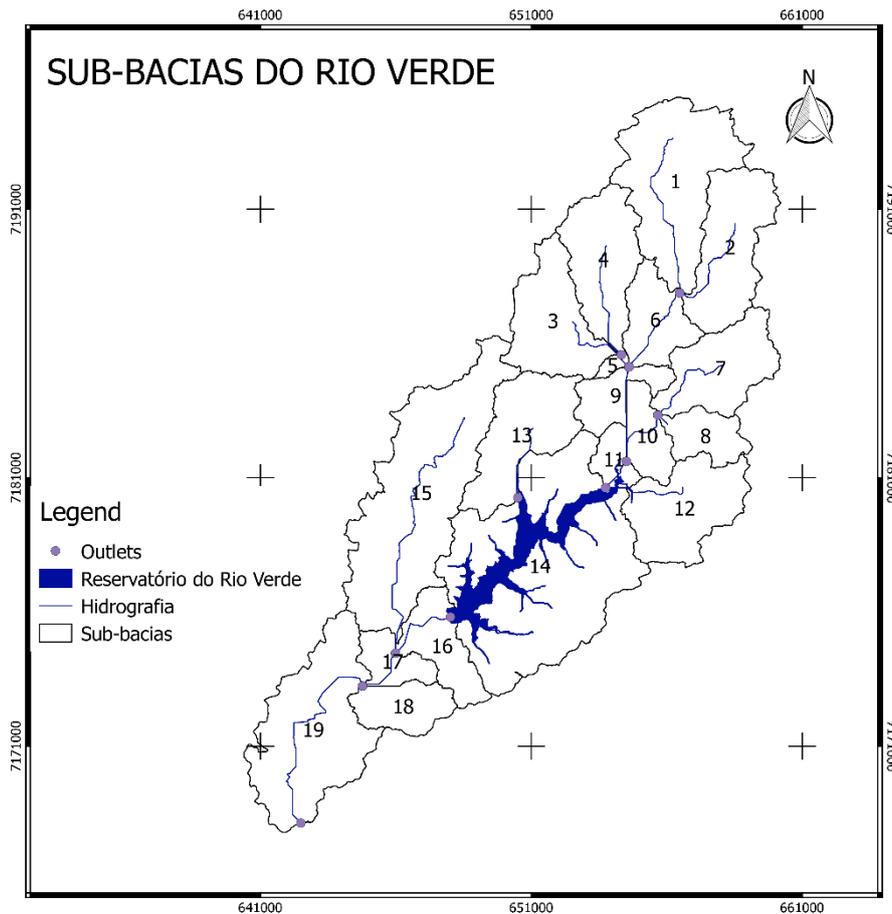


Figura 13 - Sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Rio Verde

Uma vez que a simulação foi realizada, o software SWAT-CUP foi empregado para realizar a análise de sensibilidade dos parâmetros. A Figura 14 mostra o grau de sensibilidade *t-stat* dos 15 parâmetros escolhidos.

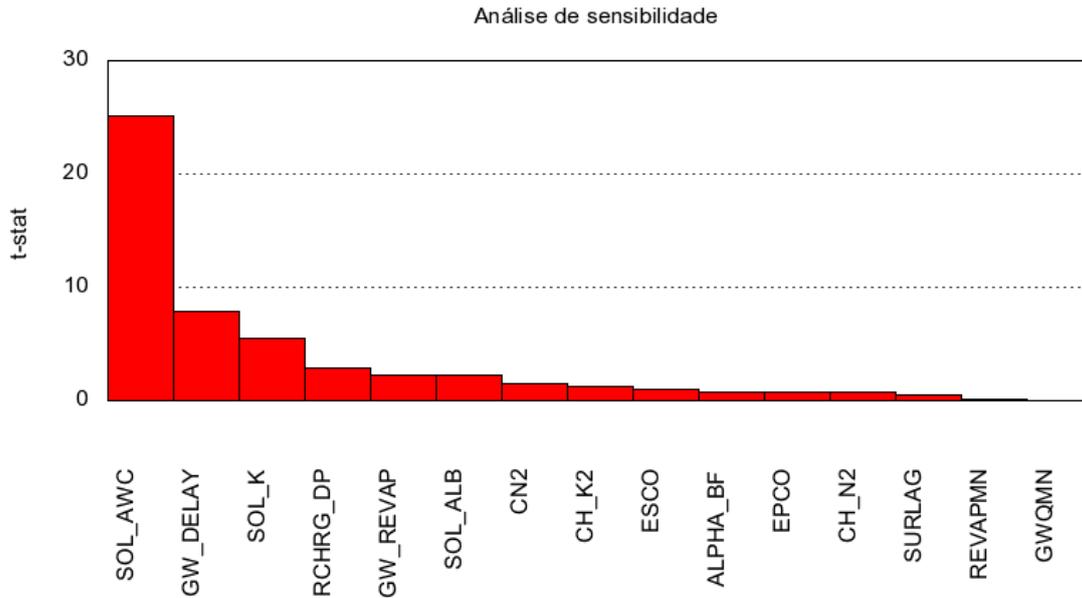


Figura 14 – Valores t-stat para a análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo

Observa-se que os parâmetros mais sensíveis são SOL_AWC, GW_DELAY, SOL_K e RCHRG_DP e, portanto, possuem uma influência importante nos resultados da simulação. Esses parâmetros são relacionados à recarga do canal através dos escoamentos lateral e subterrâneo.

Os resultados da simulação sem calibração (Figura 15) mostraram que o escoamento foi extremamente subestimado e durante o período mais seco, de abril a junho, o modelo atribuiu valores nulos para a vazão. A análise realizada pelo modelo indicou que ambos escoamentos superficial e subterrâneo estavam com contribuições muito baixas e os valores eram quase inteiramente compostos pelos cálculos de escoamento lateral. Como resultado, o valor do coeficiente Nash-Sutcliffe ficou muito baixo, igual a -1.96.

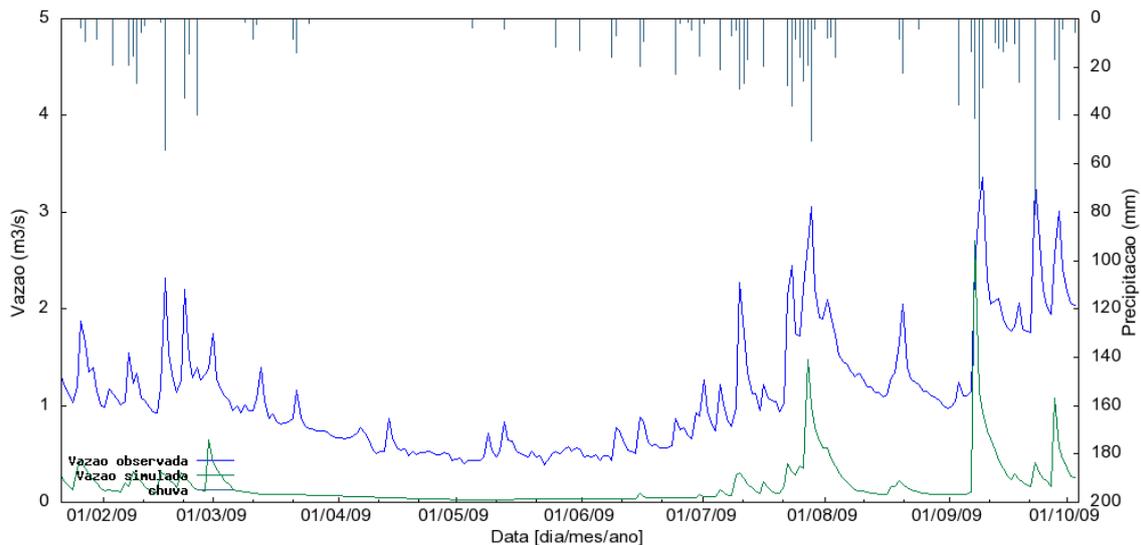


Figura 15 - Gráfico precipitação-vazão com os resultados da simulação sem calibração

A partir da análise de sensibilidade e da simulação, foi realizada a calibração manual, através de tentativa e erro, para analisar a mudança no escoamento ao alterar os parâmetros mais sensíveis. A diminuição no parâmetro SOL_AWC, que é referente à capacidade de água disponível no solo aumentou de forma considerável o escoamento de base, enquanto o aumento do parâmetro SOL_K, referente à condutividade, aumentou os picos. O parâmetro SOL_ALB referente ao potencial de reflexão dos raios solares também teve significância nos resultados, uma vez que está relacionado ao potencial de evaporação. A alteração dos valores dos parâmetros de solo permitiu o aumento do escoamento de base e assim o período que antes apresentava escoamento nulo passou a representar melhor a realidade.

O parâmetro CN2 também possui um certo grau de sensibilidade, indicando que o uso do solo influencia o escoamento no canal principal. Um aumento no valor desse parâmetro significa diminuição na permeabilidade do solo, característica de áreas que não possuem vegetação nativa que contribui para uma maior infiltração, ou seja, áreas onde há urbanização e produção agrícola. Portanto, ao aumentar esse parâmetro, os valores do escoamento superficial aumentaram.

O parâmetro RCHRG_DP é referente à fração de percolação para o aquífero profundo, portanto, influencia na quantidade de água perdida para o

abastecimento do aquífero. A diminuição desse parâmetro levou ao aumento da vazão no canal principal.

O modelo também tem como pré-requisito as características físicas principais do canal principal, uma vez que influenciam diretamente no escoamento e no transporte de sedimentos e nutrientes. O parâmetro CH_K2 representa a condutividade hidráulica efetiva no canal principal, os valores deste parâmetro ditam o relacionamento do canal com o sistema subterrâneo (Figura 16) então ele vai dizer se o canal principal perde água para o subsolo ou se ele é recarregado por ele.

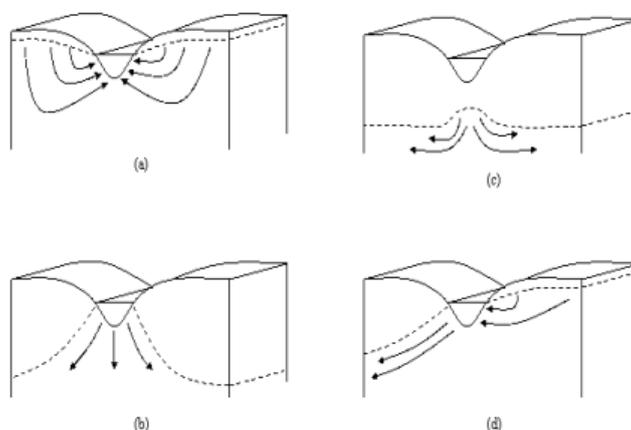


Figura 16 - Relacionamento canal-aquífero. a) Recarga do aquífero para o canal principal; b) Canal perdendo água para o aquífero; c) Perda de fluxo para o aquífero alto; d) Sistema de fluxo contínuo através do canal. Fonte: Arnold *et al.*, 2012

Os valores da condutividade hidráulica do canal, CH_K2, podem variar de 0,025 a 130 mm/h, segundo os limites padrões do programa de calibração. Sendo que: valores mais baixos indicam perda insignificante para o aquífero devido à consolidação do material do canal, com alta concentração de silte e argila enquanto valores altos são para canais com grande perda de água com areia grossa. O valor calibrado ficou em torno de 20mm/h.

Outro parâmetro essencial para a determinação do escoamento do canal é o CH_N2, ou rugosidade de Manning pois, como citado anteriormente, a vazão e a velocidade são calculadas a partir da equação de mesmo nome. Nesse caso,

os valores variam se o canal é dragado ou natural, de 0,016 a 0,15, valores baixos representaram melhor o escoamento do Rio Verde.

Os parâmetros GW_DELAY e ALPHA_BF determinam o tempo de atraso da resposta da recarga do aquífero e do escoamento superficial após a chuva. Esses parâmetros, apesar de sensíveis, não tiveram seus valores significativamente alterados, pois o modelo apresentou boa resposta temporal de acordo com os dados de precipitação.

Os resultados do escoamento após a calibração manual estão dispostos na Figura 17.

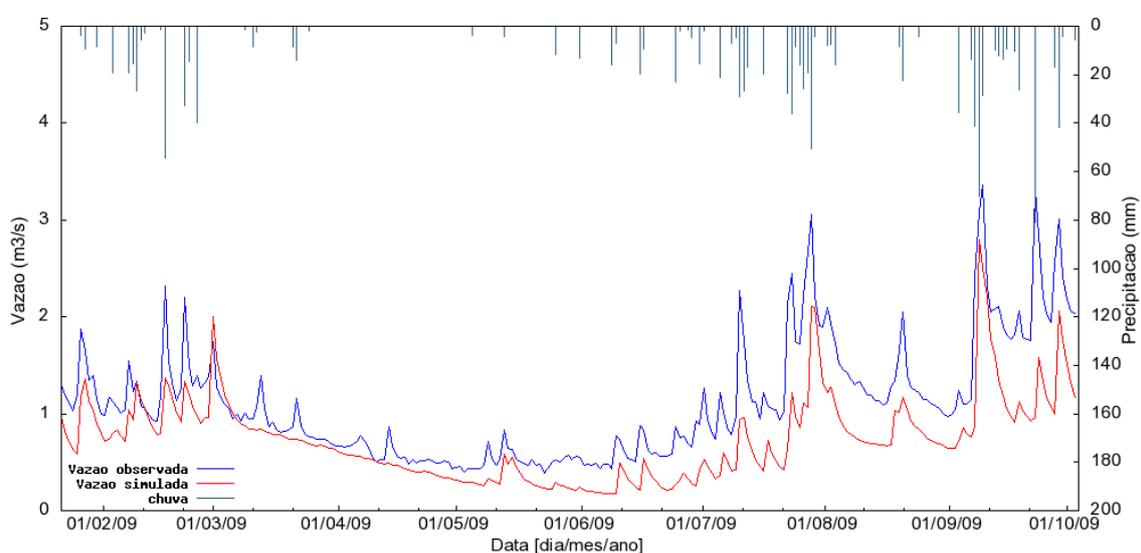


Figura 17 - Gráfico precipitação-vazão para o escoamento observado e o simulado calibrado

Apesar de ainda subestimar os valores da vazão para a sub-bacia 10, o modelo conseguiu reproduzir a forma do hidrograma e os picos de vazão. O coeficiente Nash-Sutcliffe ficou igual a 0,33, enquanto o coeficiente de Pearson ficou igual a 0,85 para o período entre 22 de janeiro e 10 de outubro de 2009, evidenciando a mudança significativa provocada pela calibração manual.

Visto que durante o período mais seco houve pouca reação do modelo, provavelmente por falta de dados confiáveis de chuva, também foi avaliado o resultado para o período de junho a outubro de 2009 (Figura 18). O coeficiente de Nash-Sutcliffe aumentou para 0,81, o que é considerado um valor alto, ou

próximo de 1. É possível afirmar então que o modelo representa as vazões de forma mais realística durante o período de chuvas mais intensas.

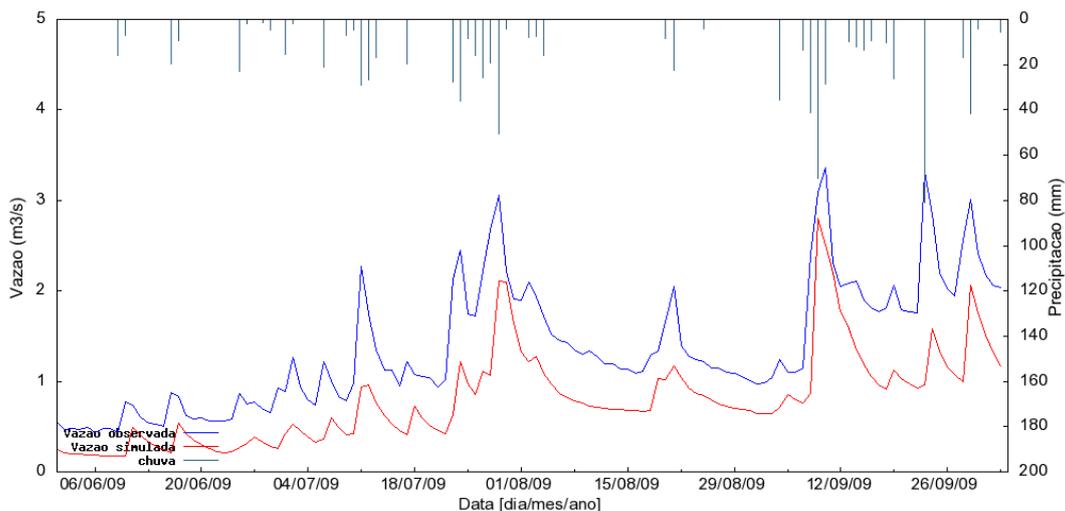


Figura 18 - Escoamento simulado e observado junho-outubro 2009

Com intuito de avaliar os resultados, também foi construída uma curva de permanência para as vazões observada e simulada (Figura 19) que permite avaliar a frequência em que as vazões são igualadas ou excedidas (Rodrigues, 2015).

Estatisticamente, a curva de permanência é uma distribuição de frequências acumuladas de ocorrência das vazões. Muito utilizada para estudos de conservação dos recursos hídricos, a curva de permanência pode assumir diversas formas. Uma curva plana sugere que há armazenamentos naturais presentes a montante do local de medição enquanto declividades maiores indicam ausência de tais armazenamentos (Barbosa Júnior, 2016).

É possível observar através da curva de permanência que o modelo subestima as vazões, a vazão máxima não passa de $3\text{m}^3/\text{s}$ enquanto a medição mostra que as vazões passam deste limite. Além disso em 100% do tempo, as vazões observadas são maiores do que $0,4\text{ m}^3/\text{s}$ ao passo que menos de 80% do tempo as vazões simuladas são maiores do que esse valor.

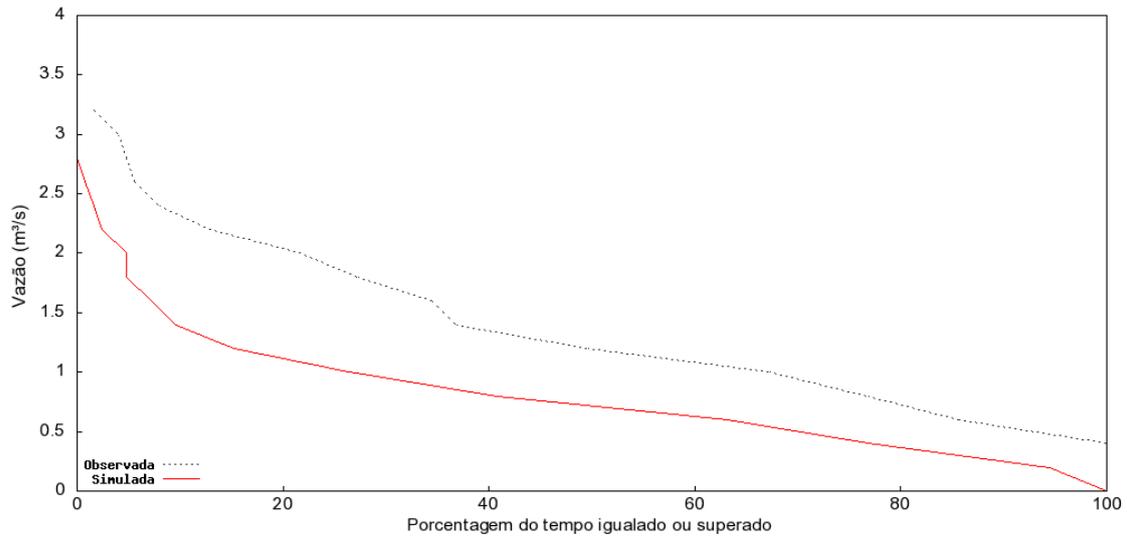


Figura 19 - Curva de Permanência de Vazão

Entretanto, as declividades das duas curvas não variam de forma significativa entre si, então o modelo não está assumindo a existência de armazenamentos naturais a jusante de maneira errônea.

Em virtude da disponibilidade de dados de vazão à jusante do reservatório, os resultados do modelo também foram avaliados para a sub-bacia 16, onde encontra-se a estação pluviométrica Formigas. Os resultados podem ser observado na figura 20.

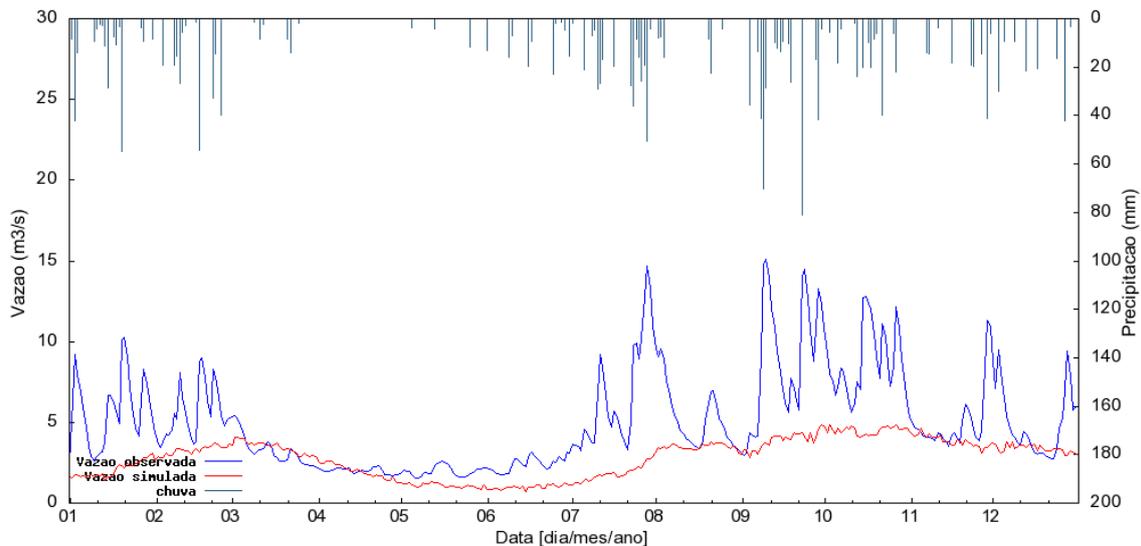


Figura 20 - Valores chuva-vazão a jusante do reservatório

Nitidamente, o modelo não reproduziu de forma satisfatória a vazão a jusante do reservatório com os parâmetros calibrados de acordo com a vazão da sub-bacia 10 e o resultado foi um coeficiente de Nash-Sutcliffe igual a 0,11.

O principal ponto a ser observado através do gráfico é que o modelo conseguiu simular a vazão de base, mas houve pouco escoamento superficial. Portanto, uma nova calibração manual foi realizada alterando os parâmetros que regem a permeabilidade do solo, a condutividade hidráulica e o escoamento direto. A Figura 21 mostra os valores para a vazão calibrada.

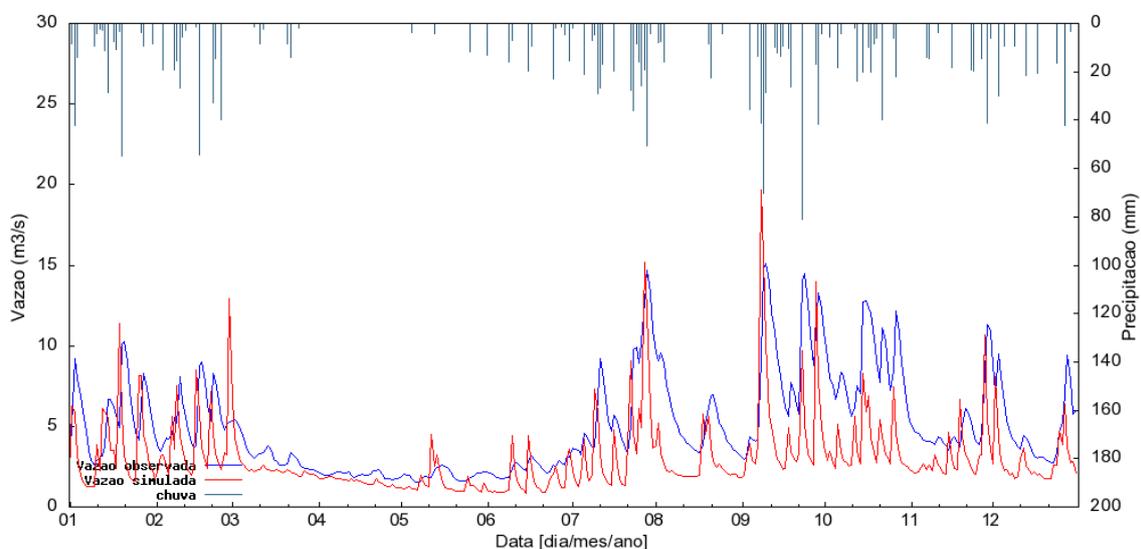


Figura 21 - Valores chuva-vazão da sub-bacia 16 após calibração

O coeficiente Nash-Sutcliffe para a vazão após nova calibração ficou igual a 0,50. Novamente o modelo apresenta uma boa resposta temporal de acordo com dados de precipitação, mas de forma geral subestima os valores do escoamento durante a maior parte do período analisado.

Portanto, os parâmetros calibrados para a porção superior da bacia, isto é, à montante do reservatório não devem ser utilizados para a porção inferior. As razões são a influência do reservatório e a mudança no uso do solo ao longo da bacia. O reservatório altera de modo significativo a vazão do rio, nota-se que as vazões máximas à montante são em torno de 3,5 m³/s enquanto à jusante as mesmas podem chegar a 15 m³/s.

Além da mudança na ordem de magnitude da vazão, conclui-se que o reservatório possui grande interferência nos resultados devido ao fato de o modelo ter sido eficaz na predição da vazão de base e falho na simulação do escoamento superficial.

A mudança no uso do solo também pode ter influenciado os resultados, uma vez que a região urbana se expande na sub-bacia 15. Ocupações urbanas alteram a permeabilidade do solo e, portanto, o coeficiente de escoamento superficial, evidenciando que diferentes calibrações são necessárias para diferentes pontos da bacia.

6. CONCLUSÕES

As etapas de análise de sensibilidade e calibração foram essenciais para a obtenção de resultados para a simulação da vazão na Bacia Hidrográfica do Rio Verde através do modelo SWAT. Observou-se uma subestimação tanto do escoamento de base quanto do escoamento superficial, mas que pode ser melhorada através de alterações dos parâmetros que regem esses fenômenos.

O modelo apresentou boa resposta temporal de acordo com os dados fornecidos de precipitação, de forma que o hidrograma foi bem reproduzido e a simulação ficou com melhor correlação nos períodos com chuvas mais intensas e constantes do que nos períodos mais secos nos quais as chuvas são mais isoladas e fracas.

Ao calibrar o modelo de acordo com os dados medidos à montante do reservatório, o modelo não conseguiu reproduzir o escoamento superficial à jusante do reservatório e uma nova calibração foi necessária, evidenciando a influência do reservatório na regularização das vazões.

Recomenda-se para trabalhos futuros a realização de calibrações em diferentes locais de uma mesma bacia e uma análise das influências que podem gerar resultados distintos. Além disso, observou-se que uma calibração intensa foi necessária quanto aos dados de solo, então recomenda-se a correção e medição para uma boa parametrização uma vez que as características de solo ditam o escoamento de uma bacia.

Outra sugestão de trabalhos futuros é o estudo mais detalhado da distribuição de precipitação na cabeceira da bacia e a montante do reservatório, próximo ao município de Campo Magro e da estação Haras. Uma vez que os dados medidos de vazão indicaram picos que não foram observados nos dados de precipitação.

Além disso, o estudo da simulação de nutrientes e sedimentos pelo modelo SWAT é interessante para entender a capacidade de calcular esses parâmetros através dos dados fornecidos. Visto que a Bacia do Rio Verde é uma bacia experimental da universidade, seria possível realizar a comparação dos resultados do modelo com os valores reais medidos.

7. REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. C.. SWAT-CUP – SWAT Calibration and Uncertainty Programs. Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2015.

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

AGÊNCIA EMBRAPA DE INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA, Latossolos. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_11_2212200611540.html#>

AGÊNCIA EMBRAPA DE INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA. Argissolos Vermelho-Amarelos. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_mata_sul_pernambuca/arvore/CONT000gt7eon7k02wx7ha087apz2axe8nfr.html>

ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. V. 17, n.1, p.69-76, 2013

ANDREOLI, C. V.; CARNEIRO, C.; GUTSEIT, K. C.; XAVIER, C. F. Caracterização Geral da Bacia. In: CUNHA, C. L. N.; CARNEIRO, C.; GOBBI, E. F.; ANDREOLI, C. V. Eutrofização em Reservatórios: Gestão preventiva – Estudo interdisciplinar da Bacia do Rio Verde, PR. Capítulo 2. Curitiba. Ed: UFPR, 2011. p. 41-57.

ANTONIO, V. V. S. Os Ortofotos como cartografia de base a medias escalas. VIII Encontro de Utilizadores de Informação Geográfica, 2004

ARAGÃO, L. P; FOGAÇA, T. K.; CATTANI, P. E.; CANEPARO, S. C. Geoprocessamento aplicado à seleção de áreas para implantação de Parques Urbanos na Bacia do Rio Verde/PR. Universidade Federal do Paraná, 2015.

ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R.; HANEY, E. B.; NEITSCH, S. L. Soil and Water Assessment Tool: Input/Output Documentation, version 2012. Texas Water Resources Institute.

BALDISSERA, G. C. Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para a Bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT. Universidade Federal do Mato Grosso, 2005.

BARBOSA JÚNIOR, A. R. Elementos de Hidrologia Aplicada: Capítulo 8 – Permanência de Vazão. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 2016.

BEVEN, K. Changing Ideas in Hydrology – The case of Physically Based Models. University of Lancaster, 1989.

BEVEN, K. Infiltration, soil moisture, and unsaturated flow. In: Bowles, D.S.; O'Connell, P.E.; ed. Recent advances in the modeling of hydrologic systems. Dordrecht, Klumer Academic Publishers, 1991.

BITTENCOURT, A.V.L.; HINDI, E. C.; ROSA FILHO, E. F. da. Geologia. In: CUNHA, C. L. N.; CARNEIRO, C.; GOBBI, E.F.; ANDREOLLI, C.V. Eutrofização em reservatórios: Gestão Preventiva - Estudo Interdisciplinar na Bacia do Rio Verde, PR. Curitiba: Editora UFPR, 2011. p. 89-94.

BRANDÃO, T. F. O uso de Imagens SRTM na modelagem de fenômenos hidrológicos (escoamento superficial). Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS/DTEC, 2009.

BRIGHENTI, T. M. Modelagem hidrológica e avaliação de diferentes métodos de calibração para o modelo SWAT. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

CANEPARO, S. C.; PASSOS, E.; FRICK, E. C. L.; SILVA, J. J. I.; SOUZA, L. F. Desenvolvimento de uma metodologia de identificação dos conflitos entre o uso da terra e as restrições legais por meio de um Sistema de Informação Geográfica – Estudo de caso Bacia do Rio Verde – Paraná, Brasil. Universidade Federal do Paraná, 2010.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; LARRY, W. Applied Hydrology. International edition, MacGraw-Hill, Inc, 1988.

DIAS, R. H. S. Aplicação de Geotecnologias na verificação da influência do uso e ocupação do solo no escoamento superficial na cidade de Ji-Paraná-RO. Universidade Federal de Rondônia, 2011.

EMBRAPA. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento: Solos do Estado de Santa Catarina. Rio de Janeiro, 2004.

EMBRAPA. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento: Solos e Aptidão Agrícola das Terras da Área de Proteção Ambiental de Cafuringa, Distrito Federal. Planaltina – DF: Embrapa Cerrados, 2002.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, 2006.

FERREIRA, D. M. F.; CUNHA, C. Simulação numérica do comportamento térmico do reservatório do Rio Verde. Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Recursos Hídricos – Universidade Federal do Paraná, 2013.

FERRIGO, S. Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática – Estudo de caso da Bacia do Lago Descobertos – DF. Brasília, 2014.

FILHO, G. M. M.; ANDRADE, R. S.; JUNIOR, J. C. Z.; FILHO, L. N. L. M. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicações. Universidade Federal do Tocantins. Revista de Ciências Ambientais, Canoas, v.6, n.2, p35 s 47, 2012.

GARCIA, C. M; CARRIJO, B. R.; SESSEGOLO, G.; PASSOS, E. Environmental assessment of the área surrounding Dam Rio Verde – Parana/Brazil – Na overview of environmental geomorphology. Journal of Environmental Biology, 2012.

GOBBI, E. F.; MACHADO, E. S.; NASCIMENTO, E.B. Zoneamento ambiental da Área de Proteção Ambiental do Rio Verde. In: CUNHA, C. L. N.; CARNEIRO, C.; GOBBI, E. F.; ANDREOLI, C. V. Eutrofização em Reservatórios: Gestão

preventiva – Estudo interdisciplinar da Bacia do Rio Verde, PR. Capítulo 24. Curitiba. Ed: UFPR, 2011. p. 485-494.

LIBOS, M. I. P.; C. Modelagem da poluição não pontual na Bacia do Rio Cuiabá baseada em geoprocessamento. Rio de Janeiro, 2002.

MACHADO, R. E. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Piracicaba, 2002.

MEDEIROS, D. R. M.; LUDKA, V. M.; PASSOS, E.; CANEPARO, S. C. Uso e ocupação do solo da nova sede do município de Campo Magro – PR. Universidade Federal do Paraná,

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. Soil and Water Assessment Tool (SWAT): Ferramenta de Avaliação de Solo e Água – Documentação Teórica. Instituto de Recursos Hídricos do Texas, 2011.

OLIVEIRA, W. C. F. Determinação de risco ambiental na drenagem fluvial da Bacia do Rio Verde – PR através do uso de Sistemas de Informação Geográfica. Curitiba, 2010.

PEREIRA, F. C.; FERREIRA, M. B. P.; CANEPARO, S. C. Análise multicritério aplicada à identificação de áreas para implantação de um aterro sanitário na Bacia Hidrográfica do Rio Verde – PR. XVI Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, 2013.

PESSOA, M. M. E. P. Integração de modelos hidrológicos e Sistemas de Informação Geográfica na análise de processos de outorga quantitativa de uso da água: Aplicação na Bacia do Rio dos Sinos – RS. Porto Alegre, 2010.

PREVEDELLO, C. L. SPLINTEX. 2000.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Conceitos básicos de modelagem hidrológica.

RODERJAN, C. V.; ACCIOLY, P.; MINUZZO, J. J. Cobertura vegetal natural e uso do solo – Mapeamento, caracterização e diagnóstico. In: CUNHA, C. L. N.; CARNEIRO, C.; GOBBI, E. F.; ANDREOLI, C. V. Eutrofização em Reservatórios: Gestão preventiva – Estudo interdisciplinar da Bacia do Rio Verde, PR. Capítulo 6. Curitiba. Ed: UFPR, 2011. p. 113-126.

RODRIGUES, E. L.; ELMIRO, M. A. T.; JACOBI, C. M.; LAMOUNIER, W. L. Aplicação do Modelo SWAT na avaliação do consumo de água em áreas de florestas plantadas na bacia do Rio Pará, alto São Francisco, em Minas Gerais. Sociedade & Natureza, vol. 27, Uberlândia, set./dez. 2015.

SOARES, A. P. K.; CUNHA, C. L. N.; CANEPARO, S. C.. Estudo da Influência da Urbanização na Disponibilidade de Água em Bacias Rurais: o Caso do Rio Verde – PR. XIVth IWRA World Water Congress. Porto de Galinhas/PE, set 2011.