

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE SINOP
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS

**MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA PARA BACIA DO ALTO
TELES PIRES**

Tárcio Rocha Lopes
Engenheiro Agrícola

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE SINOP
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS

**MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA PARA BACIA DO ALTO
TELES PIRES**

Tárcio Rocha Lopes

Orientador: Dr. Cornélio Alberto Zolin

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Agronomia, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia. Área de concentração: Agronomia.

Dezembro de 2016

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

R672m Rocha Lopes, Tércio.
MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA PARA
BACIA DO ALTO TELES PIRES / Tércio Rocha Lopes. --
2016
ii, 106 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Cornélio Alberto Zolin.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato
Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais,
Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Sinop, 2016.
Inclui bibliografia.

1. SWAT. 2. uso e ocupação do solo. 3. vazão. 4.
produção de sedimentos. 5. simulação hidrológica. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a)
autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
Avenida Alexandre Ferronato, 1200 - Reserva 35/Distrito Industrial - Cep: 78557267 -Sinop/MT
Tel : (66) 3531-1663/ramal - Email : ppgasinop@ufmt.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA PARA BACIA DO ALTO TELES
PIRES**

AUTOR : Mestrando(a) Tarcio Rocha Lopes

Dissertação defendida e aprovada em 15/12/2016.

Composição da Banca Examinadora:

Presidente Banca / Orientador Doutor(a)
Instituição : Embrapa Agrossilvipastoril

Cornélio Alberto Zolin

Examinador Interno Doutor(a)
Instituição : Universidade Federal de Mato Grosso

Frederico Terra de Almeida

Examinador Externo Doutor(a)
Instituição : Embrapa Agrossilvipastoril

Laurimar Gonçalves Vehrdrusculo

SINOP, 15/12/2016.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

TÁRCIO ROCHA LOPES – Nascido em 28 de Novembro de 1992, no município de Cidade Gaúcha, Estado do Paraná. Ingressou na Universidade Estadual de Maringá (UEM), curso de Engenharia Agrícola, *Campus* do Arenito (CAR), em março de 2010. Em Janeiro de 2015 obteve o título de Engenheiro Agrícola. Iniciou o curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Agronomia em março de 2015, na Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), *Campus* Sinop.

"Excelsior."

-O Lado Bom da Vida-

Dedicatória

Dedico o presente trabalho aos meus pais:

ÉDEN ROCHA LOPES

e

FRANCISCO LOPES DE JESUS

e as minhas irmãs:

EDIMARA ROCHA LOPES

e

FRANCIELE ROCHA LOPES

Agradecimentos

A Deus que está sempre comigo dando coragem, força, saúde e inteligência para tomar as decisões corretas.

Aos meus pais e irmãs, pelo apoio, amor e dedicação.

Ao meu orientador, Cornélio Alberto Zolin, pela orientação, dedicação, ensinamentos, realização deste trabalho e pelas experiências compartilhadas.

Ao programa de pós-graduação em Agronomia da Universidade Federal de Mato Grosso campus Sinop UFMT, à Embrapa Agrossilvipastoril, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES e a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Mato Grosso FAPEMAT pela bolsa.

Aos colegas e amigos do Curso de Mestrado. Especialmente, Fernanda Schmitt Gregolin, Géssica de Carvalho e Jessica Lima Viana pelo companheirismo, momentos, risadas, amizade e conselhos.

A Ana Paula Zaiatz, Mariely Lopes, Bia Lima e Mariana Yumi que me acompanharam desde o estágio obrigatório na Embrapa.

A todos os meus amigos, que estiveram ao meu lado durante esta jornada, pelo carinho, amizade, força e presença. Especialmente ao pessoal do Laboratório SIGEO, Laurimar Vendrusculo, Riene Filgueiras, Danilo Avancini, Dani D'Orazio e Renato Torres.

Aos membros da Comissão Examinadora.

Aos professores do curso da pós-graduação, pelos ensinamentos.

E a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho.

Muito Obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO -	i
ABSTRACT -	ii
CAPÍTULO 1- Considerações gerais.....	1
1. Introdução	1
2. Revisão de Literatura.....	3
2.1. Bacias hidrográficas.....	3
2.2. Ciclo hidrológico.....	3
2.3. Ciclo hidrossedimentológico	4
2.4. Monitoramento hidrológico	5
2.5. Uso do solo x perda de solo	6
2.6. Sistema de Informação Geográfica (SIG) e geoprocessamento.....	7
2.7. Modelos hidrológicos	9
2.7.1 Modelo SWAT.....	11
CAPÍTULO 2- Modelagem hidrológica da bacia do Alto Teles Pires na região de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado.....	24
RESUMO -	24
ABSTRACT -	24
1. Introdução	25
2. Material e Métodos	27
2.1 A bacia do rio Teles Pires.....	28
2.2 O modelo SWAT e disponibilidade de dados.....	29
2.3 Análise de desempenho do modelo	35
3. Resultados e Discussão	37
4. Conclusões.....	45
5. Agradecimentos.....	46
6. Referências	47
CAPÍTULO 3- Dinâmica do uso e ocupação do solo e seu impacto nos componentes do balanço hídrico em uma bacia na região de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado.....	54
RESUMO -	54
ABSTRACT -	54
1. Introdução	55

2. Material e Métodos	57
2.1 A bacia do rio Teles Pires.....	57
2.2 Simulação do balanço hídrico pelo SWAT	58
2.3 Análise de desempenho do modelo	59
2.4 Base de dados	60
3. Resultados e Discussão	63
4. Conclusões.....	73
5. Agradecimentos.....	75
6. Referências	76
CAPÍTULO 4- Análise da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Alto Teles Pires no ecótono Cerrado/Amazônia	80
RESUMO -	80
ABSTRACT -.....	80
1. Introdução	81
2. Material e Métodos	83
2.1 A bacia do rio Teles Pires.....	83
2.2 O modelo SWAT	85
2.3 Base de dados	86
2.4 Análise de desempenho do modelo	91
3. Resultados e Discussão	93
4. Conclusões.....	101
5. Agradecimentos.....	101
6. Referências	102

MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA PARA BACIA DO ALTO TELES PIRES

RESUMO - Nos últimos anos vários estudos têm sido realizados com relação às mudanças de uso e cobertura da superfície terrestre, assim abrangendo diversas outras áreas, como, o desmatamento, a expansão de fronteiras agrícolas, pecuária e urbanização. Os diferentes cenários e mudanças de uso do solo geram impactos nas bacias hidrográficas, principalmente a diminuição na evapotranspiração devido a exploração madeireira e aumento do escoamento superficial, o que causa mudanças nas vazões, aumento de eventos como, inundação, erosões e assoreamento de cursos d'água, que por fim causa modificações na quantidade e qualidade dos recursos hídricos. Neste contexto, a modelagem hidrológica é uma ferramenta imprescindível, pois considera a distribuição espacial e temporal dos processos hidrológicos e pode ser utilizada para diversos fins, como na previsão da vazão em curto e médio prazo, disponibilidade dos recursos hídricos e variabilidade hidrológica em consequência das mudanças do uso e cobertura do solo. Objetivou-se com a realização do presente trabalho calibrar, validar e avaliar o desempenho do modelo SWAT aplicado a bacia do Alto Teles Pires e posteriormente verificar o efeito das mudanças do uso e ocupação do solo nos componentes do balanço hídrico e analisar a quantificação da produção de sedimentos. Como dados de entrada para alimentação do modelo foram utilizados o Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução de 30m, mapas com os tipos do solo e uso e cobertura do solo, bem como alimentado o modelo WXGEN, disponível no SWAT, para a geração dos dados diários de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar. Neste trabalho foi realizada a calibração e validação para níveis diários e mensais de escoamento superficial em três estações fluviométricas e verificado seu desempenho de acordo com parâmetros estatísticos. Foram utilizados quatro cenários de uso e ocupação do solo, sendo eles 1986, 1996, 2006 e 2014 e verificado seu reflexo no escoamento superficial, lateral e subsuperficial, evapotranspiração, produção de água e conteúdo de água no solo. Foi realizada a espacialização dos fatores que compõe a Equação Universal Modificada de Perda de Solo (MUSLE), bem como a produção de sedimentos na bacia. Com base nos parâmetros estatísticos, o SWAT foi capaz de simular as vazões da bacia do Alto Teles Pires de forma adequada. O modelo apresentou melhores resultados de simulações para o período de calibração do que para o de validação e sendo melhores para bacias com maiores áreas. Adicionalmente pode ser utilizado para o estudo de alternativas de manejo/gestão dos recursos hídricos sob diferentes cenários de uso e ocupação do solo. A simulação da produção de sedimentos na bacia demonstra uma média de $7,74 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Os mapas indicativos de parâmetros suscetíveis à erosão e o da distribuição da produção de sedimentos para bacia, indica a tomada de decisão de medidas de conservação para controle da erosão.

Palavras-chave: SWAT, uso e ocupação do solo, vazão, produção de sedimentos

HYDROSEDIMENTOLOGICAL MODELING FOR THE UPPER TELES PIRES BASIN

ABSTRACT - In recent years, several studies have been carried out in relation to land use change and land cover, covering several other areas, such as deforestation, expansion of agricultural frontiers, livestock and urbanization. The different scenarios and changes in land use generate impacts on hydrographic basins, mainly the decrease in evapotranspiration due to logging and increased surface runoff, which causes changes in flow rates, increase of events such as flooding, erosion and silting Water, which ultimately causes changes in the quantity and quality of water resources. In this context, hydrological modeling is an essential tool because it considers the spatial and temporal distribution of hydrological processes and can be used for several purposes, such as the forecast of short and medium term flow, availability of hydrological resources and hydrology variability as a consequence of Land use changes and land cover. The objective of this work was to calibrate, validate and evaluate the performance of the SWAT model applied to the Upper Teles Pires basin and later to verify the effect of changes in soil use and occupation on the components of the water balance and to analyze the quantification of the production of sediments. As input data for feeding the model, the Digital Elevation Model (DEM) with a resolution of 30m, maps with the soil types and use and soil cover were used, as well as the WXGEN model, available in SWAT, for the generation Of the daily data of temperature, relative humidity of the air, speed of the wind and solar radiation. In this work, calibration and validation were performed for daily and monthly levels of surface runoff at three fluviometric stations and their performance was verified according to statistical parameters. Four soil use and land use scenarios were used: 1986, 1996, 2006 and 2014, and its reflection on surface, lateral and subsurface runoff, evapotranspiration, water production and soil water content were verified. We performed the spatialization of the factors that make up the Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE), as well as the sediment production in the basin. Based on the statistical parameters, the SWAT was able to simulate the Upper Teles Pires River basin flows adequately. The model presented better simulation results for the calibration period than for the validation period and being better for basins with larger areas. Additionally it can be used for the study of alternatives of management / management of water resources under different scenarios of land use and occupation. The simulation of sediment yield in basin shows an average of $7.74 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$. The maps indicative of erosion susceptible parameters and the distribution of sediment yield to basin indicate the decision to take conservation measures to control erosion.

Keywords: SWAT, land use, flow, sediment yield

CAPÍTULO 1- Considerações gerais

1. Introdução

As modificações causadas no ambiente, e conseqüentemente nas bacias hidrográficas, devido às ações antrópicas, têm grande influência nas características qualitativas e quantitativas dos processos hidrológicos, que conseqüentemente afeta diversos outros setores, principalmente na agricultura, comprometendo a produção de fibras, energia e alimentos. Atualmente tem-se buscado, mais que nunca, um meio de se promover o processo de desenvolvimento das sociedades de uma forma sustentável onde os recursos água e solo sejam utilizados de forma a permitir o desenvolvimento e ao mesmo tempo sejam preservados para que as gerações futuras possam usufruir destes recursos.

A modelagem hidrológica é uma ferramenta que vem sendo muito utilizada ultimamente para prever a resposta hidrológica e é uma alternativa para fornecer subsidio técnico para desenvolvimento sustentável das fronteiras agrícolas do mundo, gerando benefícios ambientais, econômicos e sociais. Embora exista crescente interesse em tais temas, a pesquisa na área modelagem hidrológica visando à maximização da gestão da água e do solo, ainda carece significativamente de estudos, apesar da grande relevância que o tema apresenta. Quando se considera as pesquisas desenvolvidas nas Regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil, e principalmente no estado do Mato Grosso, a situação fica ainda mais crítica.

Nesse contexto, merece destaque a bacia hidrográfica do rio Teles Pires, que possui grande extensão e situa-se na faixa de transição entre os biomas Cerrado/Amazônia, região esta com grande dinâmica do uso e ocupação do solo e expansão da agricultura.

A bacia do rio Teles Pires abrange 35 municípios, sendo a maioria (33) localizados no estado de Mato Grosso e dois no estado do Pará. Essa bacia possui cerca de 141.278 km² e é uma das regiões com maior expansão da agropecuária do estado de Mato Grosso e do país. Dentre os municípios estão alguns dos maiores produtores de grãos do Brasil, o que demonstra a grande importância econômica desta bacia.

Adicionalmente, a rápida dinâmica da mudança do uso e ocupação do solo ocorrida nas últimas duas décadas na bacia do rio Teles Pires, impulsionada principalmente pela expansão de novas áreas para a agricultura e pecuária, pode estar afetando diretamente a resposta hidrológica desta bacia, com resultados importantes sobre os aspectos quantitativos e qualitativos dos recursos hídricos. Outro ponto de destaque é a expansão da agricultura irrigada e o aproveitamento hidrelétrico, principalmente na região do alto e médio Teles Pires, apresentando grande pressão sobre o uso do solo e dos recursos hídricos.

No contexto atual, tendo em vista a importância do conhecimento do balanço hídrico e da dinâmica do uso do solo dentro de uma bacia, verifica-se que estudos objetivando conhecer melhor as características físicas e climáticas da bacia, podem fornecer subsídios técnicos para a melhor gestão dos recursos hídricos e uso correto do solo.

Nesse sentido, objetivou-se com a realização do presente trabalho avaliar o desempenho de um modelo hidrológico aplicado a bacia, verificar o efeito das mudanças do uso e ocupação do solo e quantificar a produção de sedimentos para a bacia do Alto Teles Pires

2. Revisão de Literatura

2.1. Bacias hidrográficas

A bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída. A bacia hidrográfica compõe-se de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um leito único no seu exutório (Tucci, 2009).

Lima e Zakia (2000), acrescentam ao conceito geomorfológico da bacia hidrográfica, uma abordagem sistêmica. Para esses autores as bacias hidrográficas são sistemas abertos, que recebem energia através de agentes climáticos e perdem energia através do deflúvio, podendo ser descritas em termos de variáveis interdependentes, que oscilam em torno de um padrão, e, desta forma, mesmo quando perturbadas por ações antrópicas, encontram-se em equilíbrio dinâmico. Assim, qualquer modificação no recebimento ou na liberação de energia, ou modificação na forma do sistema, acarretará em uma mudança compensatória que tende a minimizar o efeito da modificação e restaurar no estado de equilíbrio dinâmico

2.2. Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico, que consiste na troca contínua da água entre a hidrosfera e atmosfera, é um fenômeno que influencia diretamente na variação da disponibilidade hídrica terrestre. Segundo Tucci (2009), o ciclo hidrológico tem sido estudado com maior interesse em nível de bacia hidrográfica, onde a entrada de água é representada pelo volume precipitado e a saída de água pelo volume escoado.

A precipitação é um dos componentes do ciclo hidrológico, onde sua forma mais comum é a chuva, podendo também ocorrer na forma de granizo ou neve, que, em seu trajeto é interceptada por folhas e caules. A quantidade de água que chega ao solo pode ser infiltrada e/ou percolada em seu meio poroso, e no momento em que o perfil do solo atinge sua saturação a infiltração decresce, gera o escoamento

superficial, sendo este influenciado pela gravidade e relevo. O escoamento também ocorre em profundidade, chamado de escoamento subsuperficial ou subterrâneo. A água é devolvida a atmosfera pelo processo denominado evapotranspiração, ou seja, é a soma da evaporação da água do solo mais a transpiração da água pela vegetação, ambas dependentes da radiação solar e das tensões de vapor de ar e vento.

Na Figura 1 estão ilustrados o movimento e a troca de águas nos seus diferentes estados físicos.

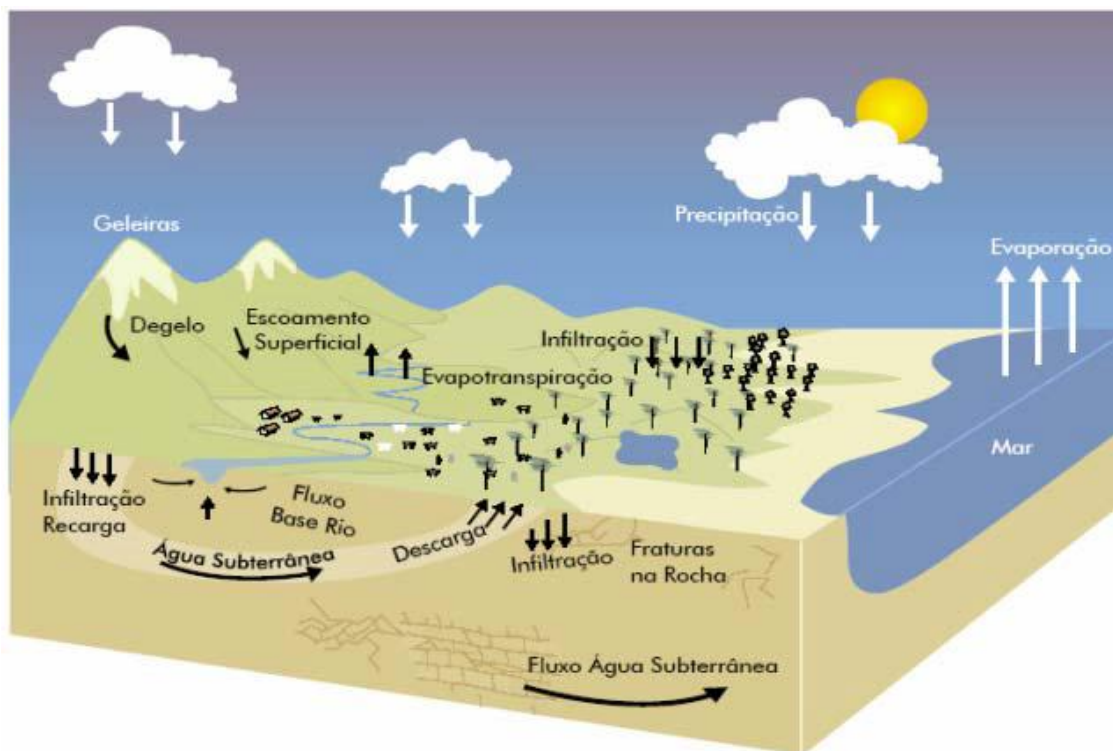


Figura 1. Esquema demonstrativo dos componentes do ciclo hidrológico. Fonte: MMA, 2016.

2.3. Ciclo hidrossedimentológico

O ciclo hidrossedimentológico está ligado diretamente ao ciclo hidrológico, ou seja, a hidrossedimentologia é o estudo dos processos relacionados à dinâmica da água e sedimentos. Tal ciclo consiste no deslocamento, transporte e depósito de partículas sólidas (Tucci, 2009) derivadas da superfície da bacia hidrográfica.

A erosão hídrica compreende a desagregação das partículas do solo, que conseqüentemente, reduz a sua capacidade produtiva, causa assoreamento e poluição dos rios e diversos outros danos (Cogo et al., 2003). Essa desagregação se dá através do impacto das gotas da chuva e do escoamento superficial. A proporção de partículas do solo desprendidas está diretamente relacionada com as características da chuva, sendo estas a sua intensidade, duração e frequência (ELTZ et al., 2001; PANACHUKI et al., 2006). Dentro deste contexto, verifica-se que as existências de solos vegetados interceptam ou diminuem o impacto das gotas de água da chuva, tornando os solos menos susceptíveis a erosão (BEZERRA e CANTALICE, 2006). Sparovek e Van Lier (1997) e Sparovek et al. (1997) observam que, com a remoção da cobertura natural do solo e substituição por culturas, este fica mais susceptível aos processos erosivos, pois a proteção deste contra a chuva e o vento fica insuficiente ou menos efetiva. A presença de vegetação e resíduos vegetais também reduz a velocidade do escoamento que é responsável pelo transporte das partículas.

Quando a energia do escoamento não é mais suficiente para transportar a partícula sólida, esta é depositada, ou seja, pode ser decantada no leito dos rios ou simplesmente cessado o transporte por arraste (PEREIRA et al., 2003; TUCCI, 2009).

2.4. Monitoramento hidrológico

Conforme Lima (2001), a cobertura da rede hidrométrica mundial ainda não é adequada, principalmente em países em desenvolvimento como é caso do Brasil, que costuma ter problemas com a disponibilidade temporal e espacial das informações hidrológicas.

O conhecimento das vazões é de suma importância para gestão e planejamento dos recursos hídricos. A vazão máxima é compreendida como sendo um valor associado a um risco de ser igualado ou superado. Esta vazão é utilizada no controle e na atenuação das cheias numa determinada área e no dimensionamento de obras hidráulicas. A avaliação dessa vazão tem importância decisiva nos custos e na segurança, pois a vazão máxima é dita como vazão de projeto ou de dimensionamento, já as vazões mínimas e as curvas de permanências

estão diretamente interligadas ao conhecimento da disponibilidade hídrica, que é fundamental na gestão dos recursos hídricos para evitar que a demanda supere sua disponibilidade (OLIVEIRA, 2008; SOUSA, 2009).

As vazões mínimas mais utilizadas como referência para outorga de água são a Q7,10, Q95% e Q90%. A vazão Q7,10 é o menor valor da vazão média de 7 dias consecutivos em um tempo de recorrência de 10 anos, ao passo que a Q95% e a Q90% são os valores de vazão que podem ser igualados ou superados em 95% ou 90% do tempo, respectivamente.

2.5. **Uso do solo x perda de solo**

As ações realizadas pelo homem, como desmatamento, poluição da água e do solo, construções ilegais, queimadas, entre outros atos, são elementos que devem ser observados com atenção pelo gestor público.

O levantamento do uso e ocupação do solo é imprescindível para analisar a forma pela qual determinado espaço está sendo ocupado, pois ao verificar a utilização do solo em determinada área, pode-se elaborar uma melhor política de uso da terra para o desenvolvimento agrícola, econômico e social de uma região (AMARAL e RIOS, 2012).

O conhecimento dos efeitos da variação no uso da terra sobre os processos erosivos e conseqüentemente sobre o movimento de sedimentos e água através da bacia hidrográfica (ciclo hidrossedimentológico) é muito importante para a tomada de decisões sobre o manejo do uso da terra, já que em algumas regiões o regime pluviométrico é mais intenso e causa impactos no processo produtivo (BORDAS e SEMMELMANN, 2007). Com isso as perdas de solo e de água estão relacionadas diretamente as condições físicas externas e internas da camada superficial do solo, sendo essas condições totalmente dependentes do tipo de uso do solo e da forma como este e as culturas são manejados, os quais irão induzir diferentes graus de cobertura, rugosidade e consolidação superficiais, bem como diferentes características e propriedades físicas internas do solo, como o volume total e a distribuição de tamanho de poros, estabilidade e distribuição de tamanho de agregados, além do conteúdo de matéria orgânica (OLIVEIRA et al., 2012).

Nesse sentido, a quantificação dos processos erosivos é de grande relevância para a avaliação da sustentabilidade de um determinado sistema, como no caso de uma bacia hidrográfica, pois se os processos erosivos forem mais intensos do que a capacidade de regeneração/formação dos solos, isso implicará em uma não sustentabilidade em relação ao recurso ambiental solo (ZOLIN et al., 2011).

Nesse contexto, a compreensão da tolerância de perda de solo tem especial importância. Wischmeier e Smith, (1965) e Bertoni e Lombardi Neto (2008) definiram a tolerância de perda de solo como sendo a quantidade de solo que pode ser perdida pela erosão acelerada, expressa em unidade de massa por unidade de área no tempo, que mantém os seus níveis iniciais de fertilidade e com a equivalente produtividade, por longo período de tempo.

O conhecimento das perdas de solo em bacias hidrográficas é um elemento fundamental para a conservação dos recursos hídricos. Este fator possui grande relevância uma vez que é responsável pela produção de sedimentos que serão transportados e depositados nos rios, lagos e reservatórios, contribuindo para o assoreamento dos mesmos. Portanto, quando se fala da conservação dos recursos hídricos, fala-se também, direta ou indiretamente, da conservação do solo, uma vez que ambos os recursos estão intimamente relacionados (ZOLIN, 2010).

Todos estes aspectos mencionados são cruciais, como fonte de poluição difusa, para a gestão da qualidade da água. Como observado por Brooks et al. (1991), os processos hidrológicos afetam a erosão do solo, o transporte de sedimentos erodidos, a deposição de sedimentos e as características físicas, químicas e biológicas que coletivamente determinam, em parte, a qualidade das águas superficiais e subterrâneas, sendo os sedimentos, provavelmente, o mais significativo de todos os poluentes em termos de sua concentração na água, seus impactos no uso da água e seus efeitos no transporte de outros poluentes.

2.6. Sistema de Informação Geográfica (SIG) e geoprocessamento

Segundo Davis Junior (1997), SIG's são sistemas automatizados usados para armazenar, analisar e manipular dados geográficos, ou seja, dados que representam objetos e fenômenos em que a localização geográfica é uma característica inerente

à informação e indispensável para analisá-la. O uso dessa ferramenta permite agregar diferentes fontes de dados (imagens de satélite, mapas de uso e ocupação do solo, mapa de classes de solo, hidrografia, modelo digital de elevação, etc) e escalas.

Os recursos do solo, água, vegetação e o meio ambiente que a circunda, estão em constantes mudanças devido a fenômenos naturais e ações antrópicas. A gestão eficiente das unidades hidrográficas é um fator básico e fundamental para o planejamento e uso racional de seus recursos naturais, principalmente o manejo eficaz da água e do solo que são recursos de vital importância para os seres vivos e essa gestão e planejamento é ainda mais dinâmico quando se faz o estudo das variáveis no espaço e no tempo (SÁ et al. 2010). Tendo em vista a importância da informação especializada, os programas de SIG estão cada vez mais ganhando espaço, principalmente quando se trata de ambientes com código fonte livre na internet, e para o usuário final oferece uma maneira fácil e rápida para a tomada de decisão, auxiliando no estudo de alterações sofridas no ambiente, agregando dados espaciais e não espaciais em única base de dados, possibilitando a derivação de novos dados e diversas formas de visualização (PIROLI et al. 2002; SÁ et al. 2010).

De acordo com Borges et al. (2008), com a utilização das técnicas de geoprocessamento, que permitem o tratamento de imagens de satélite e sua explicação, é possível obter informações essenciais sobre determinada área de forma precisa, possibilitando a elaboração de mapas temáticos atualizados das diferentes composições espaciais resultantes do processo de uso e ocupação do solo, da topografia do terreno, do tipo de solo, das variáveis climáticas, etc.

Devido a modelagem hidrológica considerar a distribuição espacial e temporal dos processos hidrológicos, a utilização de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) se tornou indispensável no processo de modelagem. Vieux (2004) relata que é absolutamente apropriada a integração da hidrologia a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), sendo que os SIGs são capazes de armazenar, capturar, manipular, analisar e visualizar diferentes conjuntos de informações/dados e a hidrologia é uma ciência que oferece um caráter espacial, assim, os modelos hidrológicos distribuídos demandam de grandes quantidades de dados; entretanto,

os modelos são representações não exatas do movimento da água no sistema, razão esta pela qual devem ser trabalhados/calibrados a partir dados observados.

2.7. Modelos hidrológicos

De acordo com Tucci (2005) o modelo é a representação de algum objeto ou sistema, com o objetivo de compreendê-los e buscar suas respostas para diversas variáveis ou formas de entrada. Os modelos hidrológicos surgiram com a necessidade de se obter séries hidrológicas mais longas e representativas de vazões para diferentes projetos de recursos hídricos. As séries de chuva, normalmente, são maiores que as séries de vazão, sendo essa última alterada devido a modificação das bacias pela construção de obras hidráulicas e alterações no uso do solo, deixando de serem séries homogêneas ou estacionárias. Com isso, partindo da precipitação, é possível determinar ou estimar as vazões desconhecidas para os novos cenários existentes ou previstos para as bacias.

O início da modelagem hidrológica pode ser atribuído ao desenvolvimento da engenharia civil na segunda metade do século XIX 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).

Os modelos hidráulicos-hidrológicos são construídos a partir de abordagens físicas dos processos hidrológicos utilizando-se das equações da conservação de massa e da equação da quantidade de movimento em sua forma completa ou simplificada (SANTOS, 2009).

Um dos principais objetivos relacionados ao desenvolvimento de modelos hidrológicos é o de simular/predizer como as alterações no ambiente (sistema solo, planta e água), resultantes das atividades agrícolas, refletem nas alterações do balanço de água no solo e afeta o transporte de sedimentos e erosão, o que, por sua vez, causam diversas modificações nos ecossistemas aquáticos e terrestres (TOLEDO, 2001).

De acordo com Tucci (2005) os modelos podem ser assim classificados:

- Concentrado ou distribuído: o modelo é dito concentrado quando não leva em consideração a variabilidade espacial da bacia. Já o modelo é considerado

distribuído quando suas variáveis e parâmetros dependem do espaço e/ou tempo;

- Estocástico ou determinístico: quando a chance de ocorrência das variáveis for levada em consideração, e o conceito de probabilidade é introduzido na formulação do modelo, o processo e o modelo são ditos estocásticos. Já, quando para uma mesma entrada, o modelo produz uma mesma saída (com condições iniciais iguais) o modelo é classificado como determinístico;
- Conceitual ou empírico: os modelos são ditos conceituais quando levam em consideração os conceitos físicos relacionados aos processos hidrológicos. Já os modelos empíricos são aqueles que utilizam funções que não tenham relação com os processos físicos envolvidos e são baseados em análises estatísticas, como métodos de correlação e análise de regressão.

O mesmo autor (TUCCI, 2005) ainda classifica esses modelos de acordo com sua finalidade para o gerenciamento dos recursos hídricos, sendo:

- Modelos de comportamento: são utilizados para descrever o comportamento do sistema, ou seja, da bacia hidrográfica. O modelo é usado para prognosticar a resposta da bacia hidrográfica, sendo que essa está sujeita a diversas entradas e modificações, como é o caso do estudo de cenários de uso e ocupação do solo;
- Modelos de otimização: são modelos que buscam as melhores soluções de um problema a ser resolvido. Muito utilizado no setor urbano, principalmente quando envolve abastecimento de água, comportamento hidráulico, dimensionamento de rede de drenagem e reservatórios.
- Modelos de planejamento: Levam em consideração não somente os processos físicos. Normalmente engloba questões socioeconômicas e ambientais, buscando disciplinar as ações e investimentos.

Os modelos necessitam de calibração para que represente o mais próximo possível o fenômeno observado. Em alguns modelos dependendo do método de calibração, surge uma série de parâmetros que representam os processos físicos em uma bacia hidrográfica. Santos (2009) classifica esses parâmetros em três tipos:

- Parâmetros que são obtidos através de ensaios em uma área experimental, em laboratórios ou de acordo com as características geométricas dos elementos;
- Parâmetros que são obtidos através da literatura, com base em trabalhos efetuados na bacia em estudo ou em áreas semelhantes;
- Parâmetros que precisam de calibração.

Na prática, a escolha do modelo apropriado para o problema a ser resolvido deve ser a primeira preocupação que o modelador deve ter. Reproduzir adequadamente os vários aspectos dos hidrogramas de saída, que são de interesse para o hidrólogo, deve ser uma premissa a ser atendida pelo modelo escolhido. No entanto, existem outras características a serem atendidas pelo modelo, em que as escolhas das escalas espacial e temporal são algumas delas (LIBOS, 2008).

A utilização dos modelos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas são imprescindíveis para a quantificação dos fenômenos físicos, sejam eles decorrentes das mudanças e alterações antrópicas ou não, sendo que podem os seus resultados serem extrapolados para áreas não monitoradas e hidrológicamente semelhantes, permitindo a estimativa tanto do escoamento como da erosão do solo em toda a região, podendo fornecer subsídios técnicos para a melhor gestão dos recursos hídricos e uso correto do solo (SANTOS, 2009; FERNADES et al., 2012).

2.7.1 Modelo SWAT

Dentre os modelos utilizados na simulação hidrológica, o SWAT (Soil and Water Assessment Tool) é um modelo matemático, um dos mais empregados mundialmente, devido a sua estrutura e capacidade de representação adequada e permite que variados processos sejam simulados em uma bacia hidrográfica (ARNOLD & ALLEN, 1996). O SWAT é um modelo hidrológico de parâmetros distribuídos desenvolvido com o objetivo de prever impactos que os variados tipos e alterações dos usos do solo podem causar nos corpos hídricos, na perda de solos e no transporte de nutrientes em bacias hidrográficas (BALDISSERA, 2005; ARNOLD et al., 2012).

O modelo SWAT tem sido muito utilizado em bacias brasileiras, como exemplos podem ser citados Paim e Menezes (2009), Baltokoski et al. (2010), Lelis et al. (2010), Pinto et al. (2013), Andrade et al. (2013), Aragão et al. (2013), Lima et al. (2015), Monteiro et al. (2015), Neto et al. (2014), Pereira et al. (2014), Bresciani et al. (2015), Fukunaga et al. (2015), Santos et al. (2015) Silva et al. (2015), Pereira et al. (2016).

O modelo SWAT necessita de uma grande quantidade de dados de entrada. As variáveis físicas de inserção no SWAT consistem do Modelo Digital de Elevação (MDE), mapa de uso e ocupação do solo e mapa de classes de solo. Posteriormente necessita-se da inserção de dados que caracterizam a bacia, como dados climáticos (precipitação, temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar) e características físicas do solo e do uso e ocupação do solo. O SWAT considera no processo de modelagem o delineamento da bacia em sub-bacias (TESHAGER et al., 2016) e posteriormente em Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs), que são áreas que agregam características semelhantes de tipo, uso e cobertura do solo e relevo do terreno. Por fim, o SWAT simula a variável de interesse para cada HRU (GASSMAN et al., 2007).

O modelo SWAT calcula o escoamento superficial a partir da fórmula modificada do Método da Curva Número - CN para calcular o escoamento superficial (USDA, 1972). O Método da Curva Número relaciona o escoamento superficial ao tipo de solo, uso da terra e práticas de manejo.

A produção de sedimentos é estimada pela Equação Universal de Perda de Solos Modificada (Modified Universal Soil Loss Equation - MUSLE) (WILLIAMS e BERNDT, 1977) (Equação 1).

$$\text{sed} = 11.8 \left(Q_{\text{surf}} \cdot q_{\text{peak}} \cdot \text{area}_{\text{hru}} \right)^{0.56} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS \cdot \text{CFRG} \quad (1)$$

Onde sed é a produção de sedimentos (Mg), Q_{surf} é o volume de escoamento superficial (mm ha^{-1}), q_{peak} é o índice máximo de escoamento ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), hru é a área de HRU (ha), K é fator de erodibilidade do solo ($\text{Mg h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$), P é o fator de prática de apoio (adimensional), C é fator de cobertura e de gestão

(adimensional), LS é fator topográfico (adimensional) e CFRG é o fator de fragmento bruto (adimensional).

As rotinas hidrológicas dentro SWAT representam processos em diversas zonas (infiltração, evapotranspiração, fluxos laterais, percolação e os fluxos de águas subterrâneas), ou seja, o ciclo da água simulada pelo SWAT baseia-se na equação do balanço hídrico (Equação 2) (NETSCH et al., 2011):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R - Q_{sup} - E_a - w_s - Q_{subt}) \quad (2)$$

Em que SW_t é a quantidade final de água no solo (mm), SW_0 é a umidade inicial do solo no dia (mm), t é o tempo (dias), R é a quantidade de precipitação no dia (mm), Q_{sup} é a quantidade de água de escoamento superficial no dia (mm), E_a é a quantidade de evapotranspiração no dia (mm), w_s é a quantidade de água que entra na zona de aeração do perfil do solo no dia (mm) e Q_{subt} é a quantidade de retorno do fluxo no dia (mm).

A análise de sensibilidade de um modelo é nada mais que a avaliação dos parâmetros utilizados na modelagem em relação ao desempenho de suas respostas em função de um conjunto de dados observados. Essa análise é feita no processo de calibração, que consiste no ajuste dos parâmetros, onde os dados simulados sejam estatisticamente similares aos dados observados. Após esse período de calibração, se valida o modelo aplicando os mesmos parâmetros da calibração. Além desses dois processos, no início da simulação ocorrem grandes incertezas, devido ao desconhecimento das condições iniciais, principalmente a umidade do solo, justificando com isso a utilização de um período de aquecimento do modelo, onde ao iniciar a simulação, as variáveis estudadas estejam livres da influência das condições iniciais (MELLO et al., 2008).

Sendo assim, o software SWAT-CUP foi desenvolvido por Abbaspour e Srinivasan (2009), para se obter a análise de sensibilidade e processar de forma rápida a calibração da área estudada. O SWAT-CUP possui rápido processamento e possibilita a escolha entre cinco métodos (Glue, ParaSol, SUFI-2, MCMC e PSO), dentre esses o método SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting) que é um dos mais

utilizados por se tratar de um método similar ao Bayesiano inverso, na qual combina na otimização da função objetivo e análise de incerteza.

O algoritmo SUFI-2 emprega em sua análise de sensibilidade dois métodos de avaliação: Latin-Hypercube (LH) e One-factor-At-a-Time (OAT). O LH é baseado no método estatístico de simulação estocástica Monte Carlo, que utiliza a redução de variância como a amostragem estratificada para melhorar a eficiência computacional. Este subdivide a distribuição de cada parâmetro em N escalas, cada um com a probabilidade de ocorrência igual a $1/N$. Já o OAT é um método de integração de sensibilidade do local para o global, no qual, em cada simulação, somente um fator é mudado por vez. Desta forma, com as mudanças no resultado em cada loop, o modelo pode encontrar a solução para as ambiguidades que são atribuídas ao parâmetro de contribuição que foi alterado.

Kennedy e Eberhart (1995) propuseram um algoritmo conhecido como colônia de partículas que consiste em um método de simulação baseado no comportamento social de grupos. Assim como em outros métodos de otimização natural, o PSO trabalha com populações de soluções, em que numa mesma iteração, vários pontos do espaço de busca são avaliados através de uma função de aptidão.

A metodologia GLUE (Generalised Likelihood Uncertainty Estimation) é um procedimento de calibração fundamentado na tese da equifinalidade que permite a análise de incertezas. No método GLUE há o reconhecimento da equivalência de diferentes conjuntos de valores dos parâmetros na calibração de modelos distribuídos. O procedimento é baseado em inúmeras simulações em que são usados diferentes conjuntos de valores de parâmetros escolhidos aleatoriamente a partir de distribuições de probabilidades específicas (Beven e Binley, 1992).

O algoritmo PARASOL (Parameter Solutions) utiliza um método de otimização e de cálculo estatístico que determina a incerteza paramétrica de modelos complexos (van Griensven et al. 2006). Na otimização o algoritmo PARASOL minimiza a função objetivo usando o algoritmo SCE-UA e desenvolve a análise de incertezas provendo duas possíveis abordagens estatísticas: o Método do X^2 e o Método bayesiano.

MCMC (Markov chain e Monte Carlo) é outro método de calibração, validação e análise de incertezas que utiliza estatística bayesiana e densidade de

probabilidade para eleger, testar, rejeitar conjuntos de parâmetros para adequação da função objetiva (Kuczera e Parent, 1998).

O SWAT é um modelo que vem ampliando as suas fronteiras no ambiente científico devido a sua capacidade de representação e estrutura, além disso, detém um perfil de modelagem que possibilita englobar diferentes componentes hidrológicos e agronômicos, mostrando versatilidade e uma possível ferramenta para ser utilizada na tomada de decisões diante de situações de conflito de uso do solo que, por sua vez, afetam a gestão dos recursos hídricos (CHU et al., 2005; BRESCIANI et al., 2015).

3. Referências

ABBASPOUR, K.C.; SRINIVASAN, R. SWAT-CUP4: SWAT. **Calibration and uncertainty programs** - a user manual, 2009.

AMARAL, M. B.; RIOS, S. A. Geoprocessamento: mapeamento do uso e ocupação do solo no alto curso do Rio Piedade. **Revista de Geografia Física**, v.2, p.1-8. 2012.

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, p. 69-76, 2013.

ARAGÃO, R.; CRUZ, M. A. S.; DE AMORIM, J. R. A.; MENDONÇA, L. C.; DE FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S. 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, n. 4, p. 1091-1102, 2013.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; KANNAN, N. Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1491-1508, 2012.

ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. **Journal of Hydrology**, v.176, p.57-77, 1996.

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT**. 2005. 132f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente). Universidade Federal de Mato Grosso. Programa de Pós-Graduação em Física e Meio Ambiente, Cuiabá, 2005.

BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M. H. F.; MACHADO, R. E.; OLIVEIRA, M. P. 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**. v. 34, n. 1, p. 253-261, 2010.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 2008. 355 p.

BEVEN, K.; BINLEY, A. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. **Hydrological processes**, v. 6, n. 3, p. 279-298, 1992.

BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J. R. B.. Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo, sob cultivo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 3, p. 565-573, 2006.

BORDAS, M. P.; SEMMELMANN, F. R. Elementos de engenharia de sedimentos. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFGS; São Paulo: USP/ABRH, 2007. p. 915-43.

BORGES, R. F.; BORGES, F. A.; COSTA, F. P. M.; NISHIYAMA, L. Mapeamento do uso do solo e cobertura vegetal da porção do alto curso da bacia do rio Uberabinha - MG. In: II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias de Geoinformação. **Anais...** Recife, 2008.

BRESSIANI, D. D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N. B.; MENDIONDO, E. M. Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 9-35, 2015.

BROOKS, K.N.; FFOLLIOTT, P.F.; GREGERSEN, H.M.; THAMES, J.L. **Hydrology and the management of watersheds**. Ames, Iowa State University Press, 1991. 392p.

CHU, T. W; SHIRMOHAMMADI, A; MONTAS, H; ABBOTT, L; SADEGHI, A. Watershed level BMP evaluation with SWAT model. In: **SAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING**, 2005. Saint Joseph. (ASAE Paper n. 052098). 2005.

COGO, N.P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R.A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 743-753, 2003.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica em grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, p. 95-118, 2001.

DAVIS JUNIOR, C. **GIS: Dos conceitos básicos ao estado da arte.** In: Anuário Fator GIS 97, C1-C4, Editora Sagres, 1997.

ELTZ, F. L. F.; MEHL, H. U.; REICHERT, J. M. Perdas de solo e água em entressulcos em um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a quatro padrões de chuva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.3, p.485-493, 2001.

FERNANDES, J. G.; GALVINCIO, J. D.; FREIRE, M. B. G. S. O Modelo SWAT e suas Possibilidades de Aplicações em APL Agrícolas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, n. 01, p. 115-126, 2012.

FUKUNAGA, D. C.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S.; OLIVEIRA, L. T.; CAIADO, M. A. C. Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. **Catena**, v. 125, p. 206-213, 2015.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 4, p. 1211-1250, 2007.

KENNEDY, J. E EBERHART, R.C. Swarm Intelligence. In. **Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks**, p. 1942-1948, 1995.

KUCZERA, George; PARENT, Eric. Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm. **Journal of Hydrology**, v. 211, n. 1, p. 69-85, 1998.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L. A. Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 5, n. 2, p. 158-174, 2010.

LIBOS, M. I. P. C. 2008. **Modelagem hidrológica quali-quantitativa: estudo de caso da bacia hidrográfica do rio Manso-MT.** Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil) COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J., Brasil. 2008.

LIMA, J. E. F. W. **Recursos hídricos no Brasil e no Mundo.** Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. 46 p.

LIMA, J. E. F. W.; MONTENEGRO, S.; DE ASSUNÇÃO MONTENEGRO, A. A.; KOIDE, S. Comparative hydrology: relationships among physical characteristics, hydrological behavior, and results of the SWAT model in different regions of Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 6, p. 1187-1195, 2015.

LIMA, L. S. **Implementação de um modelo hidrológico distribuído na plataforma de modelagem Dinâmica EGO**. 2011. 95 f. Dissertação (Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais). Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Minas Gerais, 2011.

LIMA, W. P.; ZAKIA M. J. B. Hidrologia de matas ciliares. In: RODRIGUES; R. R.; LEITÃO FILHO; H. F. (Ed.) **Matas ciliares: conservação e recuperação**. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000. p.33-43.

MELLO, C. D.; VIOLA, M. R.; NORTON, L. D.; SILVA, A. M.; WEIMAR, F. A. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. **Catena**, v. 75, n. 3, p. 235-247, 2008.

MMA. **Ministério do Meio Ambiente. Ciclo hidrológico**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico>> Acesso em 25 de Novembro de 2016.

MONTEIRO, J. A.; STRAUCH, M.; SRINIVASAN, R.; ABBASPOUR, K.; GÜCKER, B. Accuracy of grid precipitation data for Brazil: application in river discharge modelling of the Tocantins catchment. **Hydrological Processes**, 2015.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. 2011. **Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009**. Texas Water Resources Institute, 2011.

NETO, J. DE O. M.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; MÉLLO JÚNIOR, A. V. Simulação Hidrológica Escalar com o Modelo SWAT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V. 19 n.1, p. 177-188, 2014.

OLIVEIRA, F. A. **Procedimentos para aprimorar a regionalização de vazões: estudo de caso da bacia do Rio Grande**. 2008. 173f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

OLIVEIRA, J. G. R.; RALISCH, R. G.; MARIA, F.; BARBOSA, G. M. C.; FILHO, J. T. Erosão no plantio direto: perda de solo, água e nutrientes. **Boletim Geografia**, Maringá, v. 30, p. 91-98, 2012.

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.

PANACHUKI, E.; SOBRINHO, T. A.; VITORINO, A. C.; CARVALHO, D. D.; URCHEI, M. A. Parâmetros físicos do solo e erosão hídrica sob chuva simulada, em área de integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 261-268, 2006.

PEREIRA, D. D. R.; ALMEIDA, A. Q. D.; MARTINEZ, M. A.; & ROSA, D. R. Q. Impacts of deforestation on water balance components of a watershed on the Brazilian East Coast. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 4, p. 1350-1358, 2014.

PEREIRA, D. D. R.; ALMEIDA, A. Q. D.; MARTINEZ, M. A.; ROSA, D. R. Q. Impacts of deforestation on water balance components of a watershed on the Brazilian East Coast. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 4, p. 1350-1358, 2014.

PEREIRA, D. D. R.; MARTINEZ, M. A.; DA SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT Model Part II: Simulation of hydrological variables and soil use scenarios. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 5, p. 149-163, 2016.

PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. D.; MATOS, A. D. Desprendimento e arraste do solo pelo escoamento superficial. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 423-429, 2003.

PINTO, D. B. F.; SILVA, A. M.; BESKOW, S.; MELLO, C. R.; COELHO, G. 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, n. 2, p. 697-709, 2013.

PIROLI, E. L.; BECKER, E. L. S.; BOLFE, E. L.; PEREIRA, R. S. Análise do uso da terra na microbacia do Arroio do Meio – Santa Maria RS, por sistema de informações geográficas e imagem de satélite. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n.3, p. 407-412, 2002.

SÁ, T. F. F.; FILHO, J. F. C.; FRANCISCO, P. R. M.; BRAGA JUNIOR, J. M. Sistema de informações geográficas (SIG) para a gestão ambiental de bacias hidrográficas. In: II Simpósio brasileiro de ciências geodésicas e tecnologias da geoinformação. **Anais...** Recife - PE, 2010.

SANTOS, J. Y. G.; SILVA, R. M.; NETO, J. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, A. M. Land cover and climate change effects on streamflow and sediment yield: a case study of Tapacurá River basin, Brazil. **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences**, v. 371, p. 189, 2015.

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

SANTOS, M. L. F. dos; SOUSA, L. H. G. de. SILVA NETO, C.F.da. Análise do uso e ocupação do solo da Área de Proteção Ambiental Tambaba – litoral sul da Paraíba. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. **Anais...** Curitiba, PR, INPE, 2011.

SINGH, V. P.; WOOLHISER, D. A. Mathematical modeling of watershed hydrology. **Journal of Hydrologic Engineerig**, v. 7, n. 4, p. 270-292, 2002.

SILVA, M. G.; DE AGUIAR NETTO, A. D. O.; DE JESUS NEVES, R. J.; DO VASCO, A. N.; ALMEIDA, C.; FACCIOLI, G. G. Sensitivity Analysis and Calibration of Hydrological Modeling of the Watershed Northeast Brazil. **Journal of Environmental Protection**, v. 6, n. 8, p. 837, 2015.

SOUSA, H. T. **Sistema computacional para regionalização de vazões**. 2009. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

SPAROVEK, G.; JONG VAN LIER, Q. Definition of tolerable soil erosion values. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 21:467-471, 1997.

SPAROVEK, G.; WEILL, M. M.; RANIERI, S. B. L.; SCHNUG, E.; SILVA, E. F. The life-time concept as a tool for erosion tolerance definition. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.54, n Especial, p130-135, 1997.

TESHAGER, A. D.; GASSMAN, P. W.; SECCHI, S.; SCHOOF, J. T.; MISGNA, G. Modeling Agricultural Watersheds with the Soil and Water Assessment Tool (SWAT): Calibration and Validation with a Novel Procedure for Spatially Explicit HRUs. **Environmental management**, v. 57, n. 4, p. 894-911, 2016.

TOLEDO, A. M. A. **Evolução espaço-temporal da estrutura da paisagem e sua influência na composição química das águas superficiais dos ribeirões Piracicamirim e Cabras (SP)**. 2001. 94f. Dissertação. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 669p, 2005

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2009, 943 p.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Soil Conservation Service, SCS. **National Engineering Handbook**, Section 4: Hydrology. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C. Manual, 1972.

VAN GRIENSVEN, A. et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. **Journal of hydrology**, v. 324, n. 1, p. 10-23, 2006.

VIEUX, B. E. **Distributed hydrologic modeling using GIS**. 2 ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. 289p.

WILLIAMS, J. R.; BERNDT, H. D. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. **Transactions of the ASAE**, v. 20, n. 6, p. 1100-1104, 1977.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning**. Washington, USDA, 1978. 58p. (Agriculture Handbook).

ZOLIN, C. A.; FOLEGATTI, M. V.; MINGOTI, R.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M., PAULINO, J.; GONZÁLES, A. M. G. O. Minimização da erosão em função do tamanho e localização das áreas de floresta no contexto do programa conservador das águas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 2157-2166, 2011.

ZOLIN, C.A. **Análise e otimização dos projetos de Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA) utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG) – o caso do município de Extrema.** 2010. 130f. Tese. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

CAPÍTULO 2- Modelagem hidrológica da bacia do Alto Teles Pires na região de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado

RESUMO - A aplicação da modelagem hidrológica é de fundamental importância para a gestão e planejamento sustentável e conservação dos recursos hídricos em bacias hidrográficas. A utilização desta técnica para subsidiar a tomada de decisão em regiões onde os dados climáticos e hidrológicos são escassos, ou, em alguns casos, inexistentes, torna-se imprescindível. No presente trabalho utilizou-se o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) com objetivo de avaliar seu desempenho para simulação do escoamento superficial em três sub-bacias hidrográficas do Alto Teles Pires, sob condições de escassez de dados. Como dados de entrada para alimentação do modelo foram utilizados o Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução de 30m, mapas com os tipos do solo e uso e cobertura do solo, bem como alimentado o modelo WXGEN, disponível no SWAT, para a geração dos dados diários de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar. Neste trabalho foi realizada a calibração e validação para níveis diários e mensais de escoamento superficial em três estações fluviométricas e verificado seu desempenho de acordo com parâmetros estatísticos. Com base nos valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS e NS_{log}), P_{BIAS} e RSR o modelo SWAT foi capaz de simular de forma adequada o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do Alto Teles Pires, mesmo em condições limitadas de dados, demonstrando a robustez do modelo para todas as seções avaliadas.

Palavras-chave: calibração, validação, simulação hidrológica, sustentabilidade, SWAT.

Hydrological modeling in a data scarce basin in the transition zone between Amazon and Cerrado biomes in Brazil

ABSTRACT - Hydrologic modeling is of fundamental importance to support decision makers in water resource management and conservation. This is even more critical in data scarce regions when urgent requirements for regional water resource assessments are needed. The Upper Teles Pires Basin is located in the Brazilian agriculture frontier between the Amazon and Cerrado transition zone, where hydrological and climate data are scarce and, in some cases, inexistence. Although hydrologic modeling studies has growing in Brazil, there still remain a lack of information for basins that are crucial for agriculture development in the center-north part of the county. We used the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess the linkages between the various interdependent components of the water cycle in the Upper Teles Pires Basin, performing the model calibration and validation in daily

and monthly scale in three streamflow stations checking the model performance according to Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) and its logarithm form NSlog, percent bias (PBIAS), and ratio of the root mean square error to the standard deviation of measured data (RSR) statistical parameters. Based on all statistical parameters the SWAT model was able to properly simulate the hydrological behavior of the Upper Teles Pires Basin showing robustness even under data scarce conditions.

keywords: calibration, validation, hydrological simulation, sustainability, SWAT.

1. Introdução

A expansão da agricultura para atender a crescente demanda por alimentos, fibras e energia, tem levado a significativas mudanças no uso e cobertura dos solos nas regiões tropicais (HANSEN et al., 2008). Neste cenário, o Brasil se destaca com o maior potencial para a expansão da agricultura e conseqüentemente com a contribuição de parcela significativa da produção de alimentos em escala global (NEPSTAD et al., 2008).

O estado de Mato Grosso, por sua vez, é um dos estados com maior expressão agrícola, tanto nacional como internacional, contemplando uma das principais fronteiras agrícolas do mundo, a região de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado, onde a agricultura tem se expandindo rapidamente nas últimas décadas. Esta maior expansão das áreas para agricultura altamente mecanizada impõe uma nova dinâmica com impactos ambientais significativos (FORSTER et al., 2007) e, portanto, merece ser analisada em maiores detalhes (MORTON et al., 2006).

Embora com considerável notoriedade agrícola no contexto nacional e internacional, ainda são escassos os estudos que apresentem informações sobre a dinâmica hidrológica e de uso e ocupação do solo nas áreas de fronteira agrícola do estado de Mato Grosso, como é o caso da bacia do rio Teles Pires, e que forneça subsídios para a gestão racional dos recursos hídricos e melhor planejamento das atividades agropecuárias.

A bacia do rio Teles Pires assume particular importância para Mato Grosso, com destaque para região do Alto Teles Pires, pois contém áreas de transição entre os Biomas Amazônico e Cerrado e com intensa atividade agropecuária distribuída em praticamente toda a sua abrangência. Nesta bacia ocorre parte significativa da

produção de grãos do estado, onde se encontram alguns dos municípios com maior expressão agrícola do país, como Lucas do Rio Verde, Sorriso, Sinop e Nova Mutum. De acordo com EPE (2009), o Alto Teles Pires representa 66,3% do PIB da bacia, enquanto o Médio e Baixo representam 18,7 e 15% do PIB, respectivamente.

Esta região apresenta enorme carência de informações e base de dados climáticos e hidrológicos, que subsidiem as tomadas de decisão no contexto da agropecuária. Nesse sentido, o estudo e entendimento dos processos que estão direta ou indiretamente, relacionados ao comportamento hídrico das bacias estratégicas para a produção agrícola constitui uma importante etapa para a gestão sustentável e conservação dos recursos hídricos (RIEGER et al., 2016), bem como para o desenvolvimento adequado da agricultura. A utilização de modelos hidrológicos se torna ainda mais relevante para as regiões com escassez de informações. Dentre as principais limitações do SWAT, é a aplicação deste para grandes bacias, requer uma grande quantidade de informações, não permite a análise temporal dos mapas de entrada e dificuldade de se encontrar parâmetros regionais que alimentem o seu banco de dados.

Devido à modelagem hidrológica considerar a distribuição espacial e temporal de variáveis iniciais para o escoamento de água e geração de sedimentos, a utilização dessa técnica é indispensável para conhecer informações e prever fenômenos relacionados aos processos hidrológicos.

A modelagem hidrológica consiste em representar os processos do ciclo hidrológico (infiltração, escoamento superficial, vazão e evapotranspiração) por meio de equações matemáticas, de tal forma que seja possível prever a resposta hidrológica de uma bacia sob diferentes condições (TUCCI, 2009; COE et al., 2009; SANTOS, 2009; WINZ et al., 2009).

Vários modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos e utilizados a fim de representar as interações dos fatores determinantes do ciclo hidrológico nas bacias hidrográficas, dentre eles: *Systeme Hydrologique Europeen* - SHE (ABBOTT et al., 1986), TOPMODEL (BEVEN e KIKRBY, 1979), *Soil Moisture Accounting Procedure* - SMAP (LOPES et al., 1981; SARAIVA et al., 2011), *Variable Infiltration Capacity* - VIC (LIANG et al., 1994), WATFLOOD (KOUWEN, 2000), Hydrologic Engineering Center - HEC (HEC, 2000) Modelo de Grandes Bacias - MGB (COLLISCHONN,

2001), *Terrestrial Hydrologic Model with Biogeochemistry* – THMB (COE et al., 2008), *Annualized Agricultural Non-Point Source Pollution Model* - annAGNPS (YUAN et al., 2011) e *Lavras Simulation of Hydrology* - LASH (BESKOW et al., 2011; VIOLA et al., 2013).

Dentre os modelos utilizados na simulação hidrológica, o SWAT (Soil and Water Assessment Tool) é um dos mais empregados mundialmente, devido a sua estrutura e capacidade de representação adequada dos fenômenos físicos durante o ciclo hidrológico e da capacidade de permitir que variados processos sejam simulados em uma bacia hidrográfica (ARNOLD et al., 1998). O SWAT é um modelo hidrológico de parâmetros distribuídos desenvolvido com o objetivo de prever impactos decorrentes das variações espaciais das principais características do terreno (solo e topografia), do clima e vegetação (ARNOLD et al., 2012).

Embora os estudos de modelagem hidrológica tenham ganhado força no Brasil na última década, ainda existe grande carência de tais estudos para as diferentes condições do país, de maneira especial nas regiões centro-norte, onde tais estudos são escassos e/ou inexistentes.

Outro fator agravante para os estudos de modelagem hidrológica nesta região é a escassez de dados climáticos com séries longas e distribuídas espacialmente, o que se torna um desafio adicional para a calibração e validação adequado dos modelos. Embora com ampla aplicação pelo globo, trabalhos com o modelo SWAT para as condições climáticas da região de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado são praticamente inexistentes.

Com o exposto, objetiva-se no presente trabalho i) elaborar uma base de dados mínimos que subsidie o uso do módulo de geração de variáveis climáticas do SWAT ii) calibrar e validar o modelo SWAT para a bacia do Alto Teles Pires sob condições de dados limitados na região de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado; e; iii) avaliar, com base em parâmetros estatísticos, o desempenho do modelo SWAT para a simulação hidrológica em condições limitadas de distribuição espacial de dados.

2. Material e Métodos

2.1 A bacia do rio Teles Pires

O rio Teles Pires é o principal tributário da margem direita do rio Tapajós, que por sua vez é um dos mais importantes contribuintes do rio Amazonas. O rio Teles Pires é o divisor territorial dos estados de Mato Grosso e Pará (Figura 1) e sua área de contribuição é de aproximadamente 141.278 km².

A bacia do rio Teles Pires tem sido uma questão de crescente preocupação, uma vez que nesta bacia esta inserida parte da região conhecida como “fronteira agrícola brasileira”, que vem experimentando rápidas mudanças no uso e cobertura do solo com a substituição de áreas de florestas por área de pastagens e culturas, com esperado potencial de impacto na hidrologia desta bacia (COLLISCHONN et al., 2008).

A bacia do alto rio Teles Pires (BATP) possui área de aproximadamente 37.500 km² e apresenta a maior vazão específica da bacia 28,14 L s⁻¹ km⁻² (EPE, 2009). Em termos climáticos, a bacia é dominada pelos climas do tipo Am (monsoon) e Aw (with dry winter). A precipitação anual na BATP é elevada, com valores variando de 1.800-2.300 mm (clima Am) a 2.000-3.000 mm (clima Aw) (ALVARES et al., 2013), sendo que a maior parcela da chuva ocorre numa época do ano bem definida, entre outubro e abril.

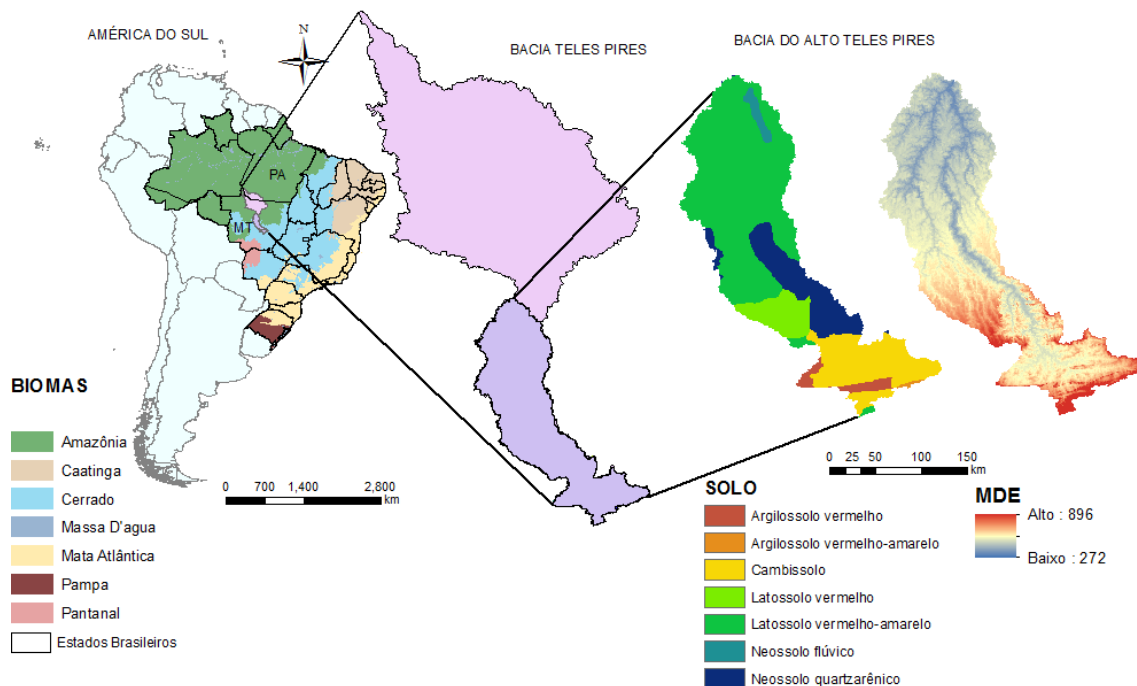


Figura 1. Distribuição dos biomas brasileiros e a localização, classes de solo e elevação da bacia do Alto Teles Pires.

Os tipos de solo predominante na bacia são Cambissolo, Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo, Argissolo Vermelho, Argissolo Vermelho-Amarelo, Neossolo Quartzarênico e Neossolo Flúvico (SANTOS et al., 2011) (Figura 1). Os usos preponderantes do solo estão relacionados com a agropecuária (culturas anuais e pastagens) e fragmentos florestais (ZAIATZ et al., 2016).

2.2 O modelo SWAT e disponibilidade de dados

O modelo SWAT é um modelo físico, semi-distribuído e contínuo no tempo, desenvolvido para a análise dos impactos de diferentes alternativas de manejo sobre os recursos hídricos em grandes bacias (ARNOLD et al., 2012). Adicionalmente, o modelo necessita de diversos tipos de dados de entrada, o que gera desafios para a parametrização e calibração, principalmente em bacias com limitações de dados. O SWAT considera no processo de modelagem o delineamento da bacia em sub-bacias (TESHAGER et al., 2016) e posteriormente em Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs), que são áreas que agregam características semelhantes de tipo, uso e cobertura do solo e relevo do terreno. Por fim, o SWAT simula o balanço hidrológico para cada HRUs (GASSMAN et al., 2007).

Um aspecto importante do modelo SWAT é que este apresenta em seu conteúdo, o modelo de geração de dados climáticos WXGEN (Weather Generator) (SHARPLEY & WILLIAMS, 1990), que permite a geração de dados meteorológicos para o preenchimento de falhas na série de dados meteorológicos diários, bem como para a geração de dados inexistentes, o que é de grande valia em regiões como a de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado. O WXGEN define os dias úmidos por meio de uma cadeia de Markov de primeira ordem, e gera a quantidade de precipitação usando uma distribuição assimétrica (skewed distribution) com três parâmetros ou uma distribuição exponencial com um parâmetro (NICKS, 1974; HARMEL et al., 2000; SCHUOL e ABBASPOUR, 2007). Esta capacidade do

WXGEN é de particular importância para bacias com escassez de dados, como a BATP.

A rede de estações meteorológicas e fluviométricas na BATP é bastante reduzida, tendo apenas três estações fluviométricas (Tabela 1) e sete estações meteorológicas (Tabela 2), sendo destas, apenas uma automática. Adicionalmente, nem toda a série de dados das estações está completa, o que causa ainda mais dificuldades no processo de simulação hidrológica desta bacia.

Tabela 1. Estações fluviométricas utilizadas para a obtenção de séries históricas da bacia hidrográfica do rio Teles Pires.

Código	Estação	Latitude	Longitude	Área de contribuição (km ²)
17200000	Porto Roncador	13°33'27"	55°20'05"	10.800
17210000	Teles Pires	12°40'27"	55°47'34"	13.900
17280000	Cachoeirão	11°39'06"	55°42'09"	34.600

Fonte: ANA, 2016

Das estações meteorológicas de Paranatinga, Porto Roncador, Teles Pires, Cachoeirão e Nova Mutum (não automáticas) utilizou-se apenas os dados diários de precipitação do anos de 1991 a 2011 (Tabela 2) obtidos por meio do Sistema de Informação Hidrológica (Hidroweb).

Foram incorporados dados estatísticos ao modelo WXGEN, correspondentes às duas estações meteorológicas, da estação de Sorriso localizada no município de Sorriso-MT disponibilizada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e a estação de Gleba do município de Vera-MT (Tabela 2), resultantes das Normais Climatológicas do Brasil (INMET, 2016). Utilizou-se o modelo WXGEN para a geração dos dados diários de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar. Para tanto, Os valores utilizados (Tabela 3) no WXGEN foram calculados com base na metodologia exposta por Guerreiro e Martins (2004). Foram utilizadas somente as variáveis de número de dias com precipitação e temperatura máxima e mínima da estação meteorológica Gleba Celeste, que não contempla todos os dados necessários para alimentar o WXGEN, portanto, foi

utilizada a estação de Sorriso para completar os dados, já que ambas as estações são relativamente próximas.

Tabela 2. Estações pluviométricas e de clima utilizadas para a obtenção de séries históricas e dados estatísticos do clima da bacia hidrográfica do Alto Teles Pires

Código	Estação	Tipo	Latitude	Longitude	Período de dados
1454000	Paranatinga	Convencional	-14°25'04"	-54°02'58"	1991-2011
1355001	Porto Roncador	Convencional	-13°33'23"	-55°19'54"	1991-2011
1255001	Teles Pires	Convencional	-12°40'30"	-55°47'35"	1991-2011
1155000	Cachoeirão	Convencional	-11°39'04"	-55°42'09"	1991-2011
1356002	Nova Mutum	Convencional	-13°48'56"	-56°07'20"	1991-2011
83264	Gleba Celeste	Convencional	-12°17'18"	-55°17'37"	1961-1990
MT_A904	Sorriso	Automática	-12°33'00"	-55°43'00"	2003-2014

Fonte: ANA, 2016

Tabela 3. Parâmetros climáticos obtidos a partir dos dados da estação de Sorriso (2003-2014) e normais climatológicas da estação Gleba Celeste (1961-1990).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TMPMX	30,7	30,7	31,1	31,5	31,3	31,4	31,7	33,2	32,9	32,6	31,1	30,5
TMPMN	19,9	19,8	19,7	19,6	18,1	15,6	14,9	15,5	17,6	19,6	19,9	20,0
TMPSTDMX	1,9	2,2	1,3	1,2	1,4	20,3	1,3	11,4	2,8	2,4	2,2	2,4
TMPSTDMN	0,8	0,9	0,7	0,8	1,2	1,7	1,8	1,5	1,6	0,6	0,9	0,8
PCPMM	317,2	364,3	295,6	139,3	49,0	13,1	2,3	10,9	64,1	180,8	280,8	374,4
PCPSTD	16,8	26,3	8,6	6,8	0,7	4,5	0,1	0,6	4,2	12,7	7,9	26,6
PCPSKW	0,8	1,5	1,3	1,2	2,3	4,0	4,7	2,4	2,0	0,9	0,4	0,8
PR_W1	0,2	0,2	0,4	0,4	0,5	1,0	0,1	1,0	0,6	0,6	0,4	0,1
PR_W2	0,8	0,8	0,6	0,6	0,5	0,1	1,0	0,1	0,4	0,4	0,6	0,9
PCPD	20,0	20,0	19,0	10,0	4,0	1,0	0,0	1,0	4,0	12,0	17,0	20,0
RAINHHMX	65,5	76,0	39,6	36,1	3,8	24,6	0,0	3,3	29,6	45,7	30,2	93,5
SOLARAV	18,8	17,6	18,8	18,6	18,9	18,4	19,1	20,3	19,0	20,0	17,7	17,2
DEWPT	21,4	21,4	21,7	22,2	20,0	19,9	15,7	14,0	18,1	20,9	21,6	22,0
WNDVAV	7,6	8,0	7,5	6,8	6,4	7,6	8,3	9,1	8,6	9,0	7,8	7,6

TMPMX, TMPMN – média da temperatura máxima e mínima diária do mês (°C); TMPSTDMX, TMPSTDMN – desvio padrão da temperatura máxima e mínima diária do mês (°C); PCPMM – média da precipitação total mensal (mm); PCPSTD – desvio padrão para precipitação diária do mês (mm); PCPSKW – coeficiente de assimetria para a precipitação diária do mês; PR_W1, PRW2 – probabilidade de dia húmido seguido de dia seco e probabilidade de dia húmido seguido de dia húmido (%); PCPD – número de dias de precipitação (dias); RAINHHMX – precipitação máxima de 0.5 hora (mm); SOLARAV – média da radiação solar no mês (MJ. m⁻².dia⁻¹); DEWPT – média da temperatura do ponto de orvalho no mês (°C); WNDVAV – velocidade do vento (m.s⁻¹)

Dentre as variáveis físicas exigidas pelo SWAT, estão o relevo, pedologia e uso e cobertura da terra. Nesse trabalho foi utilizado o Modelo Digital de Elevação

(MDE) (Figura 1) do sensor orbital SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) com resolução espacial de 30m, disponibilizados pelo USGS (U.S. Geological Survey) (USGS, 2016). O mapa de uso e cobertura da terra utilizado neste trabalho foi baseado nos estudos conduzidos por Zaiatz et al. (2016), que separa as principais coberturas do solo na BATP em Agricultura (AGRL), Floresta (FRSE), Água (WATR) e Floresta secundária, menos densa (FRST). O mapa com os tipos de solo predominantes na BATP foi elaborado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), conforme Santos et al. (2011), e possui a seguinte distribuição: 18,25% para a classe de Cambissolo (CX); 7,32% para a classe de Latossolo Vermelho (LV); 55,39% para a classe de Latossolo Vermelho Amarelo (LVA); 2,65% para a classe de Argissolo Vermelho (PV); 0,28% para a classe de Argissolo Vermelho Amarelo (PVA); 14,38% para a classe de Neossolo Quartzarênico (RQ) e 1,76% para a classe de Neossolo Flúvico (RU).

Os parâmetros que caracterizam cada tipo de solo foram inseridos no modelo SWAT com base nos dados estudados por Baldissera (2005), Lima et al. (2013) e Mingoti et al. (2016), sendo estes: HYDCRP (grupo hidrológico), SOL_ZMX (profundidade máxima), SOL_Z (profundidade da camada), SOL_BD (densidade aparente), SOL_AWC (armazenamento de água no solo), SOL_K (condutividade hidráulica), SOL_CBN (carbono orgânico), CLAY (argila), SILT (silte), SAND (areia), ROCK (seixo), USLE_K (erodibilidade).

A divisão da BATP em sub-bacias e em Unidades de Resposta Hidrológica (Hydrologic Response Unit – HRU) foi realizada a partir dos dados de relevo (obtidos do MDE), de solos e de uso e cobertura da terra. Para a obtenção das HRUs, as declividades foram divididas em classes de 0-10%, 10-20% e superior a 20%.

A quantificação do ciclo hidrológico em fase terrestre no modelo SWAT é calculada a partir da seguinte equação do balanço hídrico (NEITSCH et al., 2011):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R - Q_{sup} - E_a - W_s - Q_{subt}) \quad (1)$$

Em que SW_t é a quantidade final de água no solo (mm), SW₀ é a umidade do solo inicial no dia i (mm), t é o tempo (dias), R é a quantidade de precipitação no dia i (mm), Q_{sup} é a quantidade de área de escoamento superficial no dia i (mm), E_a é

a quantidade de evapotranspiração no dia i (mm), W_s é a quantidade de água que entra na zona de aeração do perfil do solo no dia i (mm) e Q_{subt} é a quantidade de retorno do fluxo no dia i (mm).

Dentre os cinco algoritmos (Glue, ParaSol, SUFI-2, MCMC e PSO) para identificar quais parâmetros são mais sensíveis na calibração do escoamento superficial foi feita a análise de sensibilidade com o uso do algoritmo SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting) devido a melhor calibração da vazão em relação aos demais algoritmos. O SUFI-2 combina os dois seguintes métodos de análise de sensibilidade: Latin-Hypercube (LH) e One-factor-At-a-Time (OAT) (VAN GRIENSVEN et al., 2006). O método combinado Latin-Hypercube One-factor-At-a-Time (LH-OAT) opera por loops, em cada loop é calculado o efeito parcial da variação do parâmetro enquanto que o efeito final é a média desses efeitos parciais.

A análise da sensibilidade representa uma avaliação aplicada aos parâmetros utilizados na modelagem em função da qualidade de suas respostas em relação aos dados observados (NETO et al., 2014). Entre os diversos parâmetros que podem ser utilizados para calibração no modelo SWAT, foram escolhidos 15 parâmetros (Tabela 4), que foram ranqueados de acordo os valores de significância (P-Value) e grau de sensibilidade (t-Stat).

Tabela 4. Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade para calibração do escoamento superficial e intervalo de valores do modelo SWAT para a bacia do Alto Teles Pires.

Parâmetro	Descrição	Min.	Max.
CN2	Curva Número inicial para a condição de umidade AMC II (adimensional)	-0,2	0,2
ALPHA_BF	Fator de recessão do escoamento de base (dia)	0	1
GW_DELAY	Intervalo de tempo para a recarga do aquífero (dias)	30	450
GWQMN	Profundidade limite da água no aquífero raso para ocorrer fluxo subterrâneo (mm)	0	2
GW_REVA P	Coeficiente de re-evaporação da água subterrânea (adimensional)	0	0,2
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo (adimensional)	0,8	1,0
CH_N2	Coeficiente de Manning (n) do canal (adimensional)	0,0	0,4
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva no canal (mm.h ⁻¹)	5	130
ALPHA_BN K	Fator de escoamento de base para armazenamento de rampa (dias)	0	1
SOL_AWC	Capacidade de água disponível (mm.solo ⁻¹)	-0,2	0,4
SOL_BD	Densidade aparente do solo (g.cm ⁻³)	-0,5	0,6
REVAPMN	Profundidade da água no aquífero raso para ocorrer percolação (mm)	0	100
SHALLST	Profundidade inicial do aquífero raso (mm)	2.00 0	5.000
GWHT	Altura inicial da água subterrânea (m)	4	10
SURLAG	Tempo de retardo do escoamento superficial (dia)	-0,05	5,00

2.3 Análise de desempenho do modelo

Devido à variabilidade espacial dos processos simulados pelo SWAT, muitos dos parâmetros de entrada podem não ser exatamente conhecidos. Dessa forma, a calibração é necessária para estimar esses valores ou reduzir sua incerteza, aumentando a confiabilidade dos resultados da modelagem (LELIS et al., 2012). Para realização da calibração é necessário fazer modificações dos intervalos dos parâmetros dentro de um faixa aceitável, para que o modelo reflita as condições dos processos observados.

Adicionalmente, no início da simulação têm-se grandes incertezas quanto às condições iniciais de alguns parâmetros do modelo, dessa forma é necessário utilizar um “período de aquecimento”, com isso as variáveis avaliadas não sofrem influência das condições iniciais (MELLO et al., 2008; ANDRADE et al., 2013;

ARAGÃO et al., 2013). Neste trabalho foi utilizado um “período de aquecimento” de cinco anos (1991-1995) e um período de calibração de dez anos (1996-2006).

Após a calibração dos parâmetros, o modelo deve ser validado com dados de outro período para verificar sua acurácia (ALANSI et al., 2009). A validação do modelo é o processo que demonstra sua capacidade de tornar suficientemente precisas as simulações, além disso, envolve a execução de um modelo usando parâmetros que foram determinados durante o processo de calibração, comparando-os com os dados observados não utilizados na calibração (ARNOLD et al., 2012). Neste sentido, foram utilizados cinco anos (2007-2011) para o período de validação do modelo. Com o objetivo de contrastar os dados medidos com os dados simulados pelo modelo, foram utilizadas as séries históricas de vazão das estações fluviométricas Cachoeirão, Teles Pires e Porto Roncador (Tabela 1), com dados de vazão diários e mensais disponibilizados pelo Sistema de Informação Hidrológica (Hidroweb).

Para avaliar o desempenho do modelo SWAT foi utilizado o coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NS) e sua versão logarítmica (NSlog), a porcentagem BIAS (PBIAS) e a razão entre o erro quadrático médio e o desvio padrão dos dados medidos (RSR), conforme segue:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q}_m)^2} \quad (2)$$

$$NS_{\log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(Q_m) - \log(Q_s))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(Q_m) - \log(\bar{Q}_m))^2} \quad (3)$$

$$P_{BIAS} = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)_i}{\sum_{i=1}^n Q_m} \quad (4)$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}}{\sqrt{\sum_i (Q_m - \bar{Q}_m)^2}} \quad (5)$$

Em que Q_m é vazão observada no dia i ($m^3.s^{-1}$); Q_s é vazão simulada no dia i ($m^3.s^{-1}$); \bar{Q}_m é vazão média observada ($m^3.s^{-1}$); \bar{Q}_s é vazão média dos dados simulados ($m^3.s^{-1}$) e n é número de eventos.

O índice de eficiência de Nash-Sutcliffe e sua versão logarítmica (NS e NSlog) é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual quando comparado com a variação dos dados de medição. Moriasi et al. (2007) apresentam uma classificação da faixa de valores para NS e a respectiva avaliação do desempenho do modelo SWAT para a escala mensal, como sendo: $0,75 < NS$ o modelo é considerado muito bom; $0,65 < NS \leq 0,75$ o modelo é considerado bom; $0,50 < NS \leq 0,65$ o modelo é considerado satisfatório e $NS \leq 0,5$ o modelo é considerado insatisfatório.

O PBIAS corresponde ao percentual viés das vazões simuladas em relação às observadas. Valores negativos indicam que o modelo superestima a vazão simulada em relação à observada e se o valor for positivo, subestima. Liew et al. (2007) apresentam a seguinte classificação para os intervalos de porcentagem: $|PBIAS| < 10\%$, muito bom; $10\% < |PBIAS| < 15\%$, bom; $15\% < |PBIAS| < 25\%$, satisfatório e $|PBIAS| > 25\%$, o modelo é considerado insatisfatório.

O índice RSR é uma versão padronizada que inclui uma estatística de erro, o valor de RSR varia entre o valor ideal de zero (o que indica uma simulação perfeita do modelo) até valores positivos ou negativos, que segundo a classificação de Moriasi et al. (2007) tem os seguintes intervalos: $0,50 < RSR$ muito bom; $0,50 < RSR \leq 0,60$ bom; $0,6 < RSR \leq 0,70$ satisfatório e $RSR > 0,70$ insatisfatório.

3. Resultados e Discussão

Para o uso e ocupação do solo para BATP (Figura 2), foi obtido as seguintes percentagens para cada classe: AGRL (54.13%), FRSE (15.50%), WATR (0.25%) e FRST (30.11%).

Para a geração das HRU, a combinação da declividade em conjunto com o uso e ocupação do solo e classes de solo geraram 27 sub-bacias e 586 HRUs.

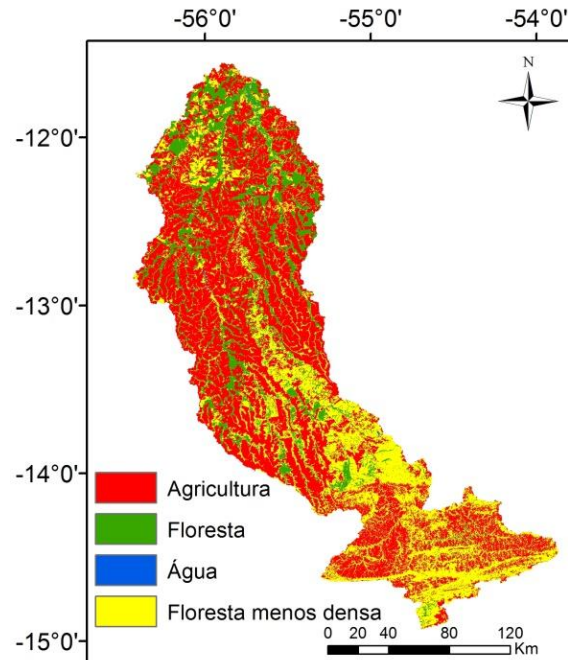


Figura 2. Mapa do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do Alto Teles Pires no cenário de 2014.

Na análise de sensibilidade dos dados diários (Tabela 5) é possível observar que os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade foram GW_DELAY, SOL_BD, CH_K2, GWQMN, SURLAG e REVAPMN e o mesmo foi encontrado para a significância da sensibilidade de cada parâmetro, ou seja, os parâmetros mais sensíveis foram os mesmos para o grau de sensibilidade e o teste de significância. Na calibração dos dados mensais, GW_DELAY, o SOL_BD (que é o parâmetro equivalente à densidade do solo) foram os mais significativos e também foram os parâmetros com maior grau de sensibilidade, seguidos de ALPHA_BNK, CH_K2, CH_N2 e SURLAG.

Tabela 5. Melhor valor calibrado e resultado da análise de sensibilidade global ranqueando os parâmetros mais sensíveis para calibração das vazões diárias e mensais para a bacia do Alto Teles Pires.

Parâmetro	Valor Calibrado	Novo Min.	Novo Max.	Ranking	
				Diário	Mensal
GW_DELAY	1.407,273	-154,895	2.969,440	1	1
SOL_BD	0,370	-0,0681	0,8081	2	2
CH_K2	288,636	-221,020	798,293	3	4
GWQMN	17,636	0,8761	26,512	4	7
SURLAG	20,159	0,5093	35,225	5	6
REVAPMN	45,455	-434,678	525,587	6	9
GWHT	80,909	60,272	101,546	7	8
ALPHA_BNK	0,2818	-0,0820	0,6456	8	3
GW_REVAP	0,1255	0,0621	0,1888	9	12
CH_N2	0,2727	0,1353	0,4102	10	5
SHALLST	3.718,1819	2. 850,1926	4.586,1714	11	10
SOL_AWC	0,2091	0,0028	0,4154	12	13
CN2	-0,1309	-0,2975	0,0357	13	11
ESCO	0,8055	0,7076	0,9033	14	14
ALPHA_BF	0,5364	0,2652	0,8075	15	15

CN2 - Curva Número inicial para a condição de umidade AMC II (adimensional); ALPHA_BF - Fator de recessão do escoamento de base (dia); GW_DELAY - Intervalo de tempo para a recarga do aquífero (dias); GWQMN - Profundidade limite da água no aquífero raso para ocorrer fluxo subterrâneo (mm); GW_REVAP - Coeficiente de re-evaporação da água subterrânea (adimensional); ESCO - Fator de compensação de evaporação do solo (adimensional); CH_N2 - Coeficiente de Manning (n) do canal (adimensional); CH_K2 - Condutividade hidráulica efetiva no canal (mm.h^{-1}); ALPHA_BNK - Fator de escoamento de base para armazenamento de rampa (dias); SOL_AWC - Capacidade de água disponível (mm.solo^{-1}); SOL_BD - Densidade aparente do solo (g.cm^{-3}); REVAPMN - Profundidade da água no aquífero raso para ocorrer percolação (mm); SHALLST - Profundidade inicial do aquífero raso (mm); GWHT - Altura inicial da água subterrânea (m); SURLAG - Tempo de retardo do escoamento superficial (dia).

Strauch et al. (2010) e Aragão et al. (2013) em seus estudos usando o SWAT para simulação de vazões e análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo, obtiveram como quinto parâmetro mais sensível o GW_DELAY. Segundo os resultados dos referidos autores, outro parâmetro que está entre os cinco mais sensíveis é o CH_K2. Este parâmetro obteve a terceira e quarta posição respectivamente para os dados diários e mensais na calibração da vazão para BATP.

O fato de o parâmetro ser mais ou menos sensível, está relacionado a características que englobam o sistema, desde a característica associada à classe de solo e uso e cobertura do solo até as variáveis climáticas inseridas no modelo. Na BATP a maior parte da precipitação é convertida em escoamento subsuperficial, sendo esta maior que o escoamento superficial, conseqüentemente tem-se uma maior contribuição para a recarga do aquífero, explicando de fato a maior sensibilidade do parâmetro GW_DELAY na simulação da vazão e menor sensibilidade dos parâmetros relacionados ao escoamento. O segundo parâmetro mais sensível SOL_BD, está associado à boa capacidade de drenagem, representando assim a não compactação do solo, principalmente nas classes de Latossolo que ocupam grande porcentagem da bacia e apresentam uma alta condutividade hidráulica. Além disso, há de se considerar que quase metade da área da bacia é ocupada por florestas, em que a densidade aparente do solo deve estar em seu estado natural.

De acordo com a avaliação da sensibilidade dos parâmetros em estudos para bacias hidrográficas brasileiras, os parâmetros que aparecem com maior frequência e grau de sensibilidade são ALPHA_BF e CN2, sempre ocupando as três primeiras posições como parâmetros mais sensíveis na modelagem (PAIM e MENEZES, 2009; ANDRADE et al., 2010; BALTOKOSKI et al., 2010; STRAUCH et al., 2010; LELIS et al., 2012; ARAGÃO et al., 2013; PINTO et al., 2013;), sendo que neste trabalho estes parâmetros ocupam as últimas posições, corroborando com os resultados de Ferrigo et al. (2013). Com isso verifica-se que na simulação da vazão para BATP utilizando o SWAT, os parâmetros relacionados ao escoamento superficial tem baixo grau de sensibilidade, sendo os mais sensíveis os relacionados com a condutividade hidráulica e coeficiente de Manning do canal, profundidade de água no aquífero, tempo de retardo do escoamento superficial e densidade do solo.

Nas Figuras 3 e 4 são apresentados os hidrogramas para o nível diário e mensal dos valores observados e simulados pelo modelo SWAT, nas fases de calibração e validação, podendo-se observar que o modelo fornece uma boa simulação da tendência na geração das vazões na bacia e mostra sua robustez mesmo para as condições limitadas de distribuição espacial de dados climáticos.

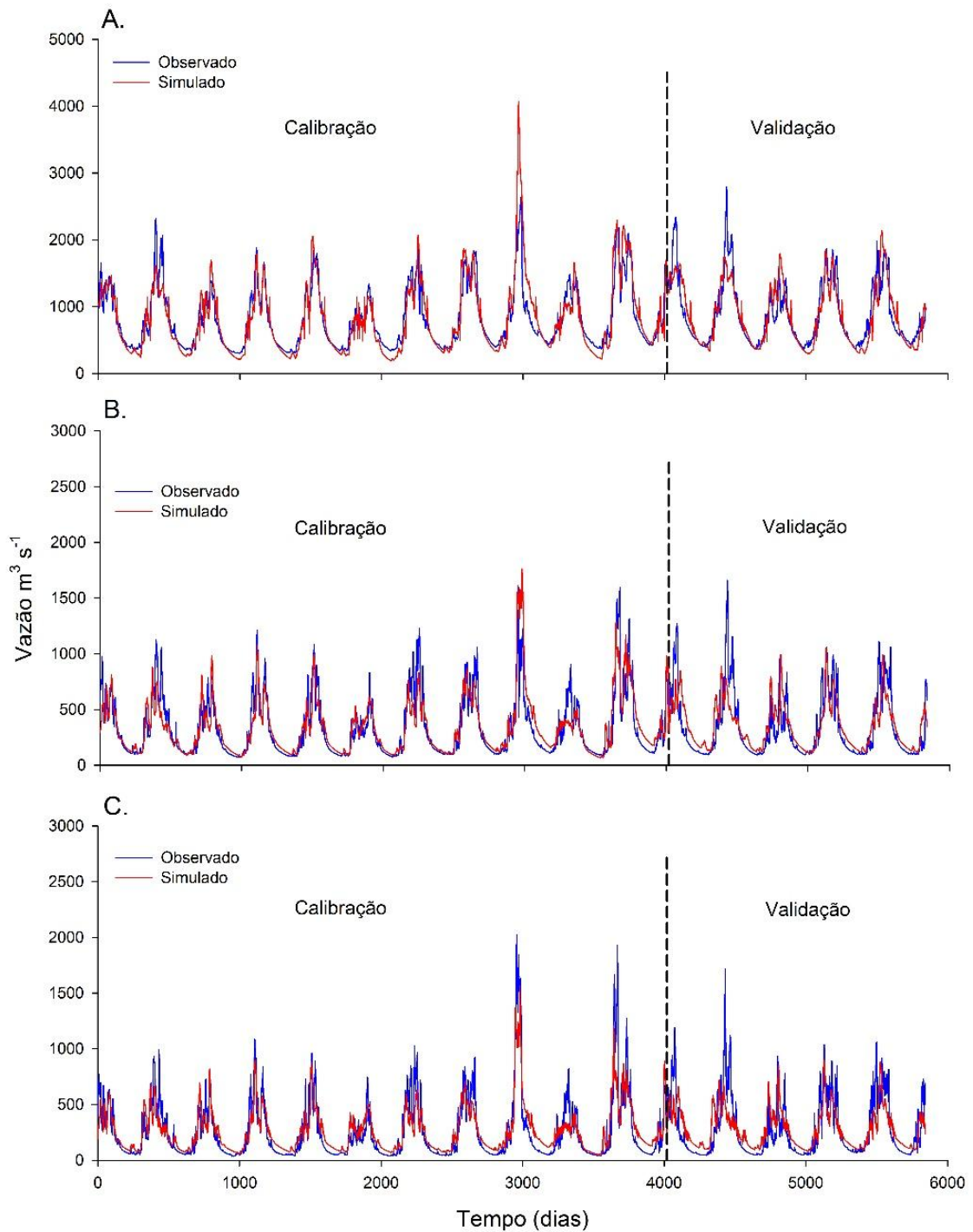


Figura 3. Hidrogramas das vazões diárias observadas e simuladas no período de calibração (1996 – 2006) e validação (2007 – 2011) para as estações Cachoeirão (A), Teles Pires (B) e Porto Roncador (C) na bacia hidrográfica do Alto Teles Pires.

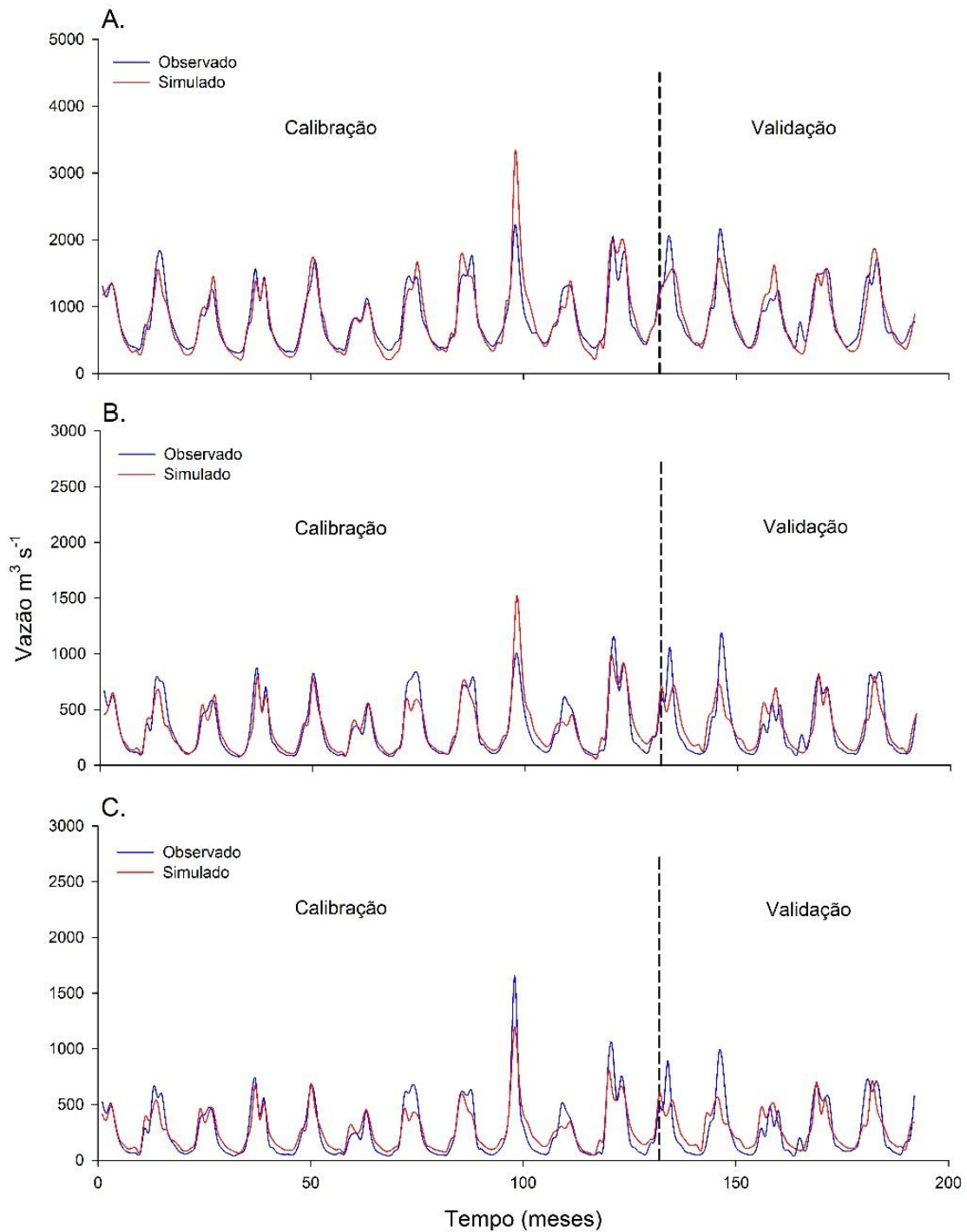


Figura 4. Hidrogramas das vazões mensais observadas e simuladas no período calibração (1996 – 2006) e validação (2007 – 2011) para as estações Cachoeirão (A), Teles Pires (B) e Porto Roncador (C) na bacia hidrográfica do Alto Teles Pires.

Os valores do coeficiente Nash-Sutcliffe, que retrata a performance do modelo, sobretudo na estimativa de vazões de pico, para as vazões diárias no período de calibração foram de 0,77; 0,74 e 0,75, respectivamente para as estações de Cachoeirão, Teles Pires e Porto Roncador (Tabela 6). No período da validação para os dados diários de vazões, o coeficiente de Nash foi inferior quando comparado com o período de calibração.

Tabela 6. Indicadores de desempenho do modelo SWAT na bacia do Alto Teles Pires, nos períodos de calibração (1996 – 2006) e validação (2007 – 2011) para as vazões diárias.

Estação	Calibração					Validação				
	R ²	NS	NS _{log}	RSR	P _{BIAS}	R ²	NS	NS _{log}	RSR	P _{BIAS}
Cachoeirão	0,83	0,77	0,81	0,48	0,40	0,73	0,72	0,79	0,53	2,50
Teles Pires	0,74	0,74	0,86	0,51	-2,30	0,54	0,54	0,74	0,68	-2,10
Porto Roncador	0,77	0,75	0,79	0,50	-3,10	0,47	0,47	0,66	0,73	-0,70

Na simulação da vazão para os dados mensais (Tabela 7) no intervalo de calibração, o coeficiente NS para as três estações foram superiores a 0,80, portanto o modelo pode ser classificado como muito bom (MORIASI et al., 2007). Para o período de validação, no entanto, para as estações Cachoeirão, Teles Pires e Porto Roncador os coeficientes foram 0,80; 0,67 e 0,60 respectivamente, variando de muito bom a satisfatório.

Tabela 7. Indicadores de desempenho do modelo SWAT na bacia do Alto Teles Pires, nos períodos calibração (1996 – 2006) e validação (2007 – 2011) para as vazões mensais.

	Calibração					Validação				
	R ²	NS	NS _{log}	RSR	P _{BIAS}	R ²	NS	NS _{log}	RSR	P _{BIAS}
Cachoeirão	0,88	0,82	0,86	0,43	0,00	0,81	0,80	0,79	0,45	2,90
Teles Pires	0,84	0,83	0,91	0,41	-2,06	0,69	0,67	0,79	0,57	-1,20
Porto Roncador	0,89	0,85	0,83	0,49	-3,40	0,61	0,60	0,69	0,64	0,20

É comum o índice estatístico de Nash-Sutcliffe no período de validação ser menor do que os índices para o período de calibração (STRAUCH et al., 2011;

LELIS et al., 2012; NETO et al., 2014; FUKUNAGA et al., 2015; MONTEIRO et al., 2015), no entanto, em alguns trabalhos ocorre o inverso. Silva et al. (2015) avaliaram o desempenho do SWAT no ajuste de vazões diárias em uma bacia na região do nordeste do Brasil, e verificaram valor de NS inferior na calibração (0,74) e maior na validação (0,88). Resultados semelhantes foram verificados por Andrade et al. (2013), onde na calibração obteve-se o valor do coeficiente de NS de 0,66 e para a validação o valor de 0,87.

O NSlog é adequado para verificar o desempenho do modelo na parte de recessão do hidrograma, ou seja, ele reflete no desempenho do modelo de simular as vazões mínimas. Tanto para o período de calibração como o de validação nas escalas diárias (Tabela 6) e mensais (Tabela 7) de vazão, o coeficiente de NSlog variou entre as faixas de classificação de muito bom e bom, apresentando maior valor na estação Teles Pires (0,91) para dados mensais e menor valor na validação da estação Porto Roncador (0,66 e 0,69) para os escalas diárias e mensais, onde constata-se discrepância maior entre dados simulados e observados para os tempos de recessão do hidrograma (Figura 3C e 4C).

De acordo com os indicadores que refletem no desempenho do modelo, a estação Cachoeirão foi a que apresentou os melhores coeficientes, isso talvez devido ao fato da distribuição das estações com os dados climáticos de entrada no SWAT, estarem mais concentradas na região e norte da bacia, principalmente a estação de Gleba Celeste que foi utilizada na alimentação do gerador climático para geração das variáveis (umidade relativa, velocidade do vento, temperatura e radiação solar), sendo esta relativamente próxima a estação Cachoeirão e as variáveis sendo geradas com maior precisão para esta região e sendo distante da região sul, conseqüentemente também das demais estações fluviométricas.

Mesmo com essas limitações, o modelo é viável para representação da vazão na BATP, sendo possível a extrapolação para bacias da região que não são monitoradas e que apresentem características parecidas, ou seja, sejam hidrologicamente semelhantes.

Pereira et al. (2016) utilizaram a versão logarítmica do coeficiente NS para verificar o desempenho do modelo SWAT para bacia do rio Pomba, no estado de Minas Gerais, e de acordo com a classificação utilizada em seu estudo, três das 11

estações avaliadas apresentaram NSlog acima de 0,75, em cinco estações o modelo foi classificado como satisfatório na simulação das vazões de recessão e nas demais estações considerado como insatisfatório com NSlog variando entre 0,16 e -0,32.

De acordo com os valores de percentuais viés (PBIAS) das Tabelas 6 e 7, a simulação foi considerada muito boa, ou seja, todos os valores de tendência percentual foram menores que 10%, o que indica boa adequação do modelo SWAT para a B ATP. De acordo com o PBIAS, os dados de vazão diária e mensal para estação Cachoeirão no período de calibração e validação foram subestimados e o mesmo ocorreu no período de validação dos dados mensais para a estação de Porto Roncador. Dentre os valores de RSR, evidencia-se apenas um valor insatisfatório (0,73), que foi obtido no período de validação dos dados diários para a estação de Porto Roncador.

De forma geral, o modelo SWAT apresentou bom desempenho e foi capaz de reproduzir adequadamente o regime de vazões pra a B ATP, apresentando robustez mesmo nas condições de dados climáticos com má distribuição espacial. Adicionalmente, os resultados encontrados com o modelo SWAT serão fundamentais para subsidiar a tomada de decisão quanto à gestão racional e sustentável dos recursos hídricos nesta região de expansão agrícola, que apresenta grande carência de tais informações. Trabalhos futuros analisando a dinâmica acelerada da mudança do uso da terra e seus impactos no balanço hídrico e geração de sedimentos estão em elaboração e comporão uma base detalhada para subsidiar a gestão dos recursos hídricos, expansão da agricultura e conservação do solo na região de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado.

4. Conclusões

1. Em função dos dados das estações meteorológicas disponíveis, elaborou-se uma base de dados consistentes para utilização no SWAT e no modelo de geração de variáveis climáticas.
2. Com base nos parâmetros estatísticos, pode-se inferir que o SWAT foi capaz de simular as vazões da B ATP de forma adequada, mesmo em condições de

dados limitadas de distribuição espacial, demonstrando robustez e permitindo um bom ajuste entre as vazões observadas e simuladas, tanto na escala diária quanto mensal.

3. Os parâmetros GW_DELAY (intervalo de tempo para a recarga do aquífero) e SOL_BD (densidade aparente do solo) foram os que apresentaram maior sensibilidade na simulação da vazão para a BATP.
4. O modelo SWAT apresentou melhores resultados de simulações para o período de calibração do que para o de validação e sendo melhores para bacias com maiores áreas, viabilizando a utilização desta ferramenta para gerenciamento de recursos hídricos da bacia em estudo.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a Embrapa Agrossilvipastoril, a Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) por meio do programa de pós-graduação em Agronomia (Campus de Sinop), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT).

6. Referências

ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. An introduction to the european system: Systeme Hydrologique Europeen (SHE). **Journal of Hydrology**, n. 87, p. 61-77, 1986.

ALANSI, A.W.; AMIN, M.S.M.; ABDUL HALIM, G.; SHAFRI, H.Z.M. & AIMRUN, W. Validation of SWAT model for stream flow simulation and forecasting in Upper Bernam humid tropical river basin, Malaysia. **Hydrol. Earth System Sci. Discus.**, 6:7581-7609, 2009.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANA - Agência Nacional das Águas. **Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas**. 2016. <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. 15 Abril 2016.

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, p. 69-76, 2013.

ARAGÃO, R.; CRUZ, M. A. S.; DE AMORIM, J. R. A.; MENDONÇA, L. C.; DE FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S. 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, n. 4, p. 1091-1102, 2013.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; KANNAN, N. Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1491-1508, 2012.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I. model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, p. 73-89, 1998.

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT**. 2005. 132f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente). Universidade

Federal de Mato Grosso. Programa de Pós-Graduação em Física e Meio Ambiente, Cuiabá, 2005.

BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M. H. F.; MACHADO, R. E.; OLIVEIRA, M. P. 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**. v. 34, n. 1, p. 253-261, 2010.

BESKOW, S.; MELLO, C. R. DE; NORTON, L. D. Development, sensivity and uncertainty analysis of LASH model. **Scientia Agricola**, v. 68, n. 3, p. 265-274, 2011.

BEVEN, K. J.; & KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. **Hydrological Sciences Journal**, v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979.

COE, M. T.; COSTA, M. H.; SOARES FILHO, B. S. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon river: land surface processes and atmospheric feedbacks. **Journal of Hydrology**, n. 369, p. 165-174, 2009.

COE, M. T.; COSTA, M. H.; HOWARD, E. A. Long-term simulations of surface waters of the Amazon river basin: impacts of new river geomorphic and flow parameterizations. **Hydrological Processes**, n. 22, p. 2542–2553, 2008.

COLLISCHONN, B.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. **Journal of Hydrology**, v. 360, n. 1, p. 207-216, 2008.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n.2, 2001.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2009). **Avaliação Ambiental Integrada da Bacia Hidrográfica do Rio Teles Pires**. EPE/CONCREMAT, Brasília/DF

FERRIGO, S.; MINOTI, R.; ROIG, H.; KOIDE, S. Avaliação da utilização de diferentes métodos na calibração automática do modelo SWAT. In: SIMPÓSIO

BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves, 2013.

FORSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; BERNTSEN, T.; BETTS, R.; FAHEY, D.W.; HAYWOOD, J.; LEAN, J.; LOWE, D.C.; MYHRE, G.; NGANGA, J.; PRINN, R.; RAGA, G.; SCHULZ, M.; VAN DORLAND, R. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. Chapter 2. In: **Climate Change 2007. The Physical Science Basis**. 2007.

FUKUNAGA, D. C.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S.; OLIVEIRA, L. T.; CAIADO, M. A. C. Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. **Catena**, v. 125, p. 206-213, 2015.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 4, p. 1211-1250, 2007.

GUERREIRO, M. J.; MARTINS, C. Parameterização das Variáveis Climáticas Necessárias para Uso do Modelo SWAT. **Revista da Faculdade de Ciência e Tecnologia**, v.1, p.117-122, 2004.

HANSEN, J.; M. SATO, P.; KHARECHA, D.; BEERLING, R.; BERNER, V.; MASSON-DELMOTTE, M.; PAGANI, M. RAYMO, D. L.; ROYER, AND J. C. ZACHOS. Target atmospheric CO₂: Where should humanity aim? **Open Atmospheric Science Journal**. v. 2, p.217-231, 2008.

HARMEL, R. D.; RICHARDSON, C. W.; KING, K. W. Hydrologic response of a small watershed model to generated precipitation. **Transactions of the ASAE**, v. 43, n. 6, p. 1483, 2000.

HEC - Hydrologic Engineering Center. **Hydrologic modeling system HEC-HMS: Technical reference manual**, U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, Calif, 2000.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil 1961 - 1990**. 2016.
<<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. 15 Abril 2016.

KOUWEN, N. **WATFLOOD/SPL: hydrological model and flood forecasting system**. Department of Civil Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Canada, 2000. Disponível em: < www.civil.uwaterloo.ca/watflood/>. Acesso em Fev. 2016.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; DA FONSECA SANTIAGO, A.; DE LIMA, D. C.; DE OLIVEIRA ROCHA, E. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 623-634, 2012.

LIANG, X.; LETTENMAIER, D. P.; WOOD, E. F.; BURGERS, S. J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for GSMs. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. D7, p. 14415-14428, 1994.

LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: Comparison on USDA agricultural research service watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007.

LIMA, J.; DA SILVA, E. M.; STRAUCH, M.; LORZ, C. Desenvolvimento de base de dados de solos para a aplicação do modelo SWAT em bacia do bioma cerrado. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, v. 17, 2013.

LOPES, J. E. G.; BRAGA JÚNIOR, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. Simulação hidrológica: aplicação de um modelo simplificado. In: **Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, v. 2, p. 42-62, 1981.

MELLO, C. D.; VIOLA, M. R.; NORTON, L. D.; SILVA, A. M.; WEIMAR, F. A. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. **Catena**, v. 75, n. 3, p. 235-247, 2008.

MINGOTI, R.; SPADOTTO, C. A.; MORAES, D. A. C. Determinação de regiões susceptíveis a contaminação da água subterrânea em função de propriedades dos solos no Cerrado brasileiro. 2016. No Prelo.

MONTEIRO, J. A.; STRAUCH, M.; SRINIVASAN, R.; ABBASPOUR, K.; GÜCKER, B. Accuracy of grid precipitation data for Brazil: application in river discharge modelling of the Tocantins catchment. **Hydrological Processes**, v. 30, p. 1419-1430, 2015.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. W. VAN; BINGER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MORTON, D. C.; DEFRIES R. S.; SHIMABUKURO Y. E.; ANDERSON L. O.; ARAI E.; ESPIRITO-SANTO F. D.; FREITAS R.; MORISETTE J. Cropland expansion changes deforestation dynamics in the southern Brazilian Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 103, n. 39, p. 14637-14641, 2006.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. 2011. **Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009**. Texas Water Resources Institute, 2011.

NEPSTAD, D. C.; STICKLER, C. M.; SOARES-FILHO, B.; MERRY, F. Interactions among Amazon land use, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1498, p. 1737-1746, 2008.

NETO, J. DE O. M.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; MÉLLO JÚNIOR, A. V. Simulação Hidrológica Escalar com o Modelo SWAT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V. 19 n.1, p. 177-188, 2014.

NICKS, A. D. Stochastic generation of the occurrence, pattern, and location of maximum amount of daily rainfall. In: **Proc. Symposium on Statistical Hydrology**. 1974. p. 154-171.

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.

PEREIRA, D. D. R.; MARTINEZ, M. A.; DA SILVA, D. D.; & PRUSKI, F. F. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT Model Part II: Simulation of hydrological variables and soil use scenarios. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 5, p. 149-163, 2016.

PINTO, D. B. F.; SILVA, A. M.; BESKOW, S.; MELLO, C. R.; COELHO, G. 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, n. 2, p. 697-709, 2013.

RIEGER, F. A.; ZOLIN, C. A.; PAULINO, J.; SOUZA, A. P. D.; MATOS, E. D. S.; MAGALHÃES, C. A. D. S.; FARIAS NETO, A. L. D. Water Erosion on an Oxisol under Integrated Crop-Forest Systems in a Transitional Area between the Amazon and Cerrado Biomes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1-12, 2016.

SANTOS, H.; JÚNIOR, W. C.; DART, R. O.; ÁGLIO, M. L. D.; SOUZA, J.; PARES, J. G.; OLIVEIRA, A. P. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada - Dados eletrônicos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2011.

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

SARAIVA, I.; FERNANDES, W.; NAGHETTINI, M. Simulação hidrológica mensal em bacias sem monitoramento fluviométrico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, p. 115-125, 2011.

SCHUOL, J.; ABBASPOUR, K. C. Using monthly weather statistics to generate daily data in a SWAT model application to West Africa. **Ecological Modelling**, v. 201, n. 3, p. 301-311, 2007.

SHARPLEY, A.N.; WILLIAMS, J.R. Erosion/productivity impact calculator. Model documentation. Washington, D.C: USDAARS Technical, 1990. 235p. **Bulletin** 1768.

SILVA, M. G.; DE AGUIAR NETTO, A. D. O.; DE JESUS NEVES, R. J.; DO VASCO, A. N.; ALMEIDA, C.; FACCIOLI, G. G. Sensitivity Analysis and Calibration of Hydrological Modeling of the Watershed Northeast Brazil. **Journal of Environmental Protection**, v. 6, n. 8, p. 837, 2015.

STRAUCH, M.; BERNHOFER, C.; KOIDE, S.; VOLK, M.; LORZ, C.; MAKESCHIN, F. Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. **Journal of Hydrology**, v. 414, p. 413-424, 2012.

TESHAGER, A. D.; GASSMAN, P. W.; SECCHI, S.; SCHOOF, J. T.; MISGNA, G. Modeling Agricultural Watersheds with the Soil and Water Assessment Tool (SWAT): Calibration and Validation with a Novel Procedure for Spatially Explicit HRUs. **Environmental management**, v. 57, n. 4, p. 894-911, 2016.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2009, 943 p.

USGS – U.S. Geological Survey. **Global Data Explorer**. 2016. <<http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>>. 11 Abril 2016.

VAN GRIENSVEN, A.; MEIXNER, T.; GRUNWALD, S.; BISHOP, T.; DILUZIO, M.; SRINIVASAN, R. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multivariable catchment models. **Journal of Hydrology**, v. 324, n. 1, p. 10-23, 2006.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R. de; BESKOW, S.; NORTON, L. D. Applicability of the LASH Model for hydrological simulation of the Grand River Basin, Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 18, n. 12, p. 1639-1652, 2013.

WINZ, I.; BRIERLEY, G.; TROWSDALE, S. The use of system dynamics simulation in water resources management. **Water Resources Management**, Nova York, n 23, p. 1301-1323, 2009.

YUAN, Y.; BINGER, R. L.; LOCKE, M. A.; THEURER, F. D.; STAFFORD, J. Assessment of subsurface drainage management practices to reduces nitrogen loadings using AnnAGNPS. **Applied Engineering in Agriculture**, v.27, p. 335-344, 2011.

ZAIATZ, A. P. S. R.; ZOLIN, C. A.; PAULINO, J.; VENDRUSCULO, L. G.; LOPES, T. R. Dinâmica do uso e ocupação do solo na sub-bacia do Alto rio Teles Pires no ecótono Cerrado/Amazônia. 2016. No Prelo.

CAPÍTULO 3- Dinâmica do uso e ocupação do solo e seu impacto nos componentes do balanço hídrico em uma bacia na região de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado

RESUMO - As mudanças no uso e ocupação do solo geram vários impactos no que diz respeito ao balanço hídrico em uma bacia hidrográfica, quali e quantitativamente. Uma ferramenta muito importante para o conhecimento das variáveis hidrológicas é a modelagem hidrológica, pois essa pode indicar as consequências das mudanças do uso e cobertura do solo sobre aquelas. Foi utilizado o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) com o objetivo verificar o efeito das mudanças do uso e ocupação do solo ocorridas na bacia hidrográfica do Alto Teles Pires entre 1986 e 2014 e seu reflexo no escoamento superficial, lateral e subsuperficial, evapotranspiração, produção de água e conteúdo de água no solo. Foram utilizados quatro cenários de uso e ocupação do solo, sendo eles 1986, 1996, 2006 e 2014. Foi realizada a calibração e validação para verificação da adequabilidade do modelo e após simulada o efeito dos cenários nos componentes do balanço hídrico, sendo eles, escoamento superficial, lateral e subsuperficial, evapotranspiração, produção de água e conteúdo de água no solo, como também o efeito desses cenários nas vazões máximas e mínimas. O modelo SWAT se mostrou útil para a simulação dos efeitos de diferentes cenários sobre os componentes do balanço hídrico nos diferentes cenários de uso e ocupação do solo. O cenário de 2006 gerou uma maior lâmina de escoamento superficial e produção de água, já no cenário de 1986 e 1996 as maiores lâminas foram de evapotranspiração, escoamento lateral e subsuperficial.

Palavras-chave: modelagem hidrológica, ciclo hidrológico, impacto ambiental.

Dynamics of soil use and occupation and its impact on hydric balance components in a basin in the transition region between Amazon and Cerrado biomes

ABSTRACT - The changes in land use and occupation generate several impacts to the water balance in a watershed, quantitative and qualitative. A very important tool for the knowledge of the hydrological variables is the hydrological modeling, since it can verify the consequences of ground cover and use changes on those ones. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) was used to verify the effect of changes in land use and occupation occurred in the Upper Teles Pires basin from 1986 to 2014 and its reflection on the surface, lateral and subsurface runoff, evapotranspiration, water production and soil water content. Four land use and occupation scenarios were used: 1986, 1996, 2006 and 2014. Calibration and validation were performed to verify the suitability of the model and after simulating the effects of the scenarios on the components of the water balance, such as

surface, lateral and subsurface runoff, evapotranspiration, water production and soil water content, and also the effects of these scenarios on maximum and minimum flows. The SWAT model proved to be useful for the simulation of the effects of different scenarios on the water balance components in the different land use and occupation scenarios. The 2006 scenario generated a larger surface runoff and water production blade, already in the scenario of 1986 and 1996, as larger evaporation slides, lateral and subsurface flow.

keywords: hydrological modeling, hydrological cycle, environmental impact.

1. Introdução

Nos últimos anos vários estudos têm sido realizados com relação às mudanças de uso e cobertura da superfície terrestre, com destaque para aplicações em avaliações de desmatamento, expansão de fronteiras agrícolas, pecuária e urbanização (RIVERO et al., 2009; DOMINGUES e BERMANN, 2012; ZAIATZ et al., 2016). Os diferentes cenários e mudanças de uso da terra geram impactos nas bacias hidrográficas, principalmente sobre o balanço hídrico, como a diminuição na evapotranspiração devido à exploração madeireira e aumento do escoamento superficial (NÓBREGA, 2014). De forma geral, a consequência final dessas modificações é percebida apenas quando da ocorrência de eventos hidrológicos extremos, tais como estiagens severas, inundações, produção e transporte de sedimentos em bacias hidrográficas, prejudicando de maneira drástica a agricultura além da possibilidade de aumento no aporte de nutrientes em mananciais com influência direta na qualidade da água e eutrofização dos corpos hídricos (ANDRADE et al., 2013; COLLISCHONN e TUCCI, 2001).

Atualmente o tema “uso sustentável dos recursos hídricos” gerou leis por todo o mundo, com a finalidade de melhor gerenciar a utilização da água, como no caso do Brasil que é contemplado com o Plano Nacional de Recursos Hídricos - PNRH (Brasil, 2006), como instrumento de gestão com objetivo de melhorar a oferta de água, em qualidade e quantidade, gerenciando as demandas e considerando a água um elemento estruturante para a implementação das políticas setoriais.

Mesmo com a elaboração do Plano Nacional de Recursos Hídricos, que é um importante passo para a melhor gestão dos recursos hídricos, são poucos os estudos em relação às bacias da região centro-norte do Brasil, contemplando-se

nesse grupo as bacias do estado de Mato Grosso. Nesse contexto, merece destaque a bacia hidrográfica do Alto Teles Pires (BATP), que possui grande extensão e situa-se na faixa do ecótono Cerrado-Amazônia, região esta com grande dinâmica do uso e ocupação do solo e expansão da agricultura. Nesta sub-bacia ocorre parte significativa da produção de grãos do estado, onde estão inseridos alguns dos municípios com maior expressão agrícola, como Lucas do Rio Verde, Sorriso, Sinop e Nova Mutum. De acordo com EPE (2009), o Alto Teles Pires representa 66,3 % do PIB da bacia, enquanto o Médio e Baixo representam 18,7 e 15 % do PIB, respectivamente.

Dentre os municípios da BATP, estão alguns dos maiores produtores de grãos do Brasil, o que demonstra a grande importância econômica desta bacia. Adicionalmente, a rápida dinâmica da mudança do uso e ocupação do solo ocorrida nas últimas duas décadas na bacia, impulsionada principalmente pela expansão de novas áreas para a agricultura e pecuária, que se deu por meio da conversão da mata nativa em áreas destinadas a agropecuária, pode estar afetando diretamente a resposta hidrológica desta bacia, com resultados importantes sobre os aspectos quantitativos e qualitativos dos recursos hídricos (FOSTER et al., 2007). Nesse sentido, o estudo e entendimento dos processos que estão direta ou indiretamente relacionados ao comportamento hídrico das bacias estratégicas, constitui uma importante etapa para a gestão sustentável e conservação dos recursos hídricos (RIEGER et al., 2016).

Uma ferramenta importante e muito utilizada para conhecimento das variáveis do balanço hídrico é a simulação hidrológica (NETO et al., 2011). Segundo Collischonn e Tucci (2001), a simulação hidrológica pode ser utilizada para diversos fins, como na previsão da vazão em curto e médio prazo, disponibilidade dos recursos hídricos e variabilidade hidrológica em consequência das mudanças do uso e cobertura do solo e mudanças climáticas.

Dentre os modelos utilizados na simulação hidrológica, o SWAT (Soil and Water Assessment Tool) é um dos modelos matemáticos mais empregados, devido a sua estrutura e capacidade de representação adequada, permitindo que variados processos sejam simulados em uma bacia hidrográfica (ARNOLD e ALLEN, 1996). Até o ano de 2013, tinha-se 102 estudos utilizando o

SWAT aplicado a bacias brasileiras, onde desse total, 12% eram direcionadas a região norte e centro-oeste e 3% ao estado do Mato Grosso (BRESCIANI et al., 2015), verificando assim a grande carência de tais estudos para as diferentes condições do país, de maneira especial nas regiões centro-norte do Brasil, onde tais estudos são, em alguns casos, inexistentes.

Com base no exposto acima, este trabalho tem como objetivo verificar o efeito das mudanças do uso e ocupação do solo ocorridas na bacia hidrográfica do Alto Teles Pires (BATP), entre 1986 e 2014, nos componentes do balanço hídrico utilizando o modelo SWAT.

2. Material e Métodos

2.1 A bacia do rio Teles Pires

O rio Teles Pires é um dos formadores do rio Tapajós, que por sua vez é um dos mais importantes contribuintes da bacia Amazônica. A BATP, com sua maior parte inserida no estado do Mato Grosso e pequena parte no estado do Pará, possui cerca de 141.483 km² de área de drenagem (VEIGA et al., 2012). O alto curso do rio Teles Pires possui uma área de aproximadamente 37.500 km² e situa-se na faixa 15°00' e 11°00' de latitude sul e 54°00' e 57°00' de longitude oeste e encontra-se na região de transição Cerrado-Amazônia (Figura 1).

Em termos climáticos, a bacia é dominada pelos climas do tipo Am (monsoon) e Aw (with dry winter). A precipitação anual na BATP é elevada, com valores variando de 1.800 - 2.300 mm (clima Am) a 2.000 - 3.000 mm (clima Aw) (Alvares et al., 2013).

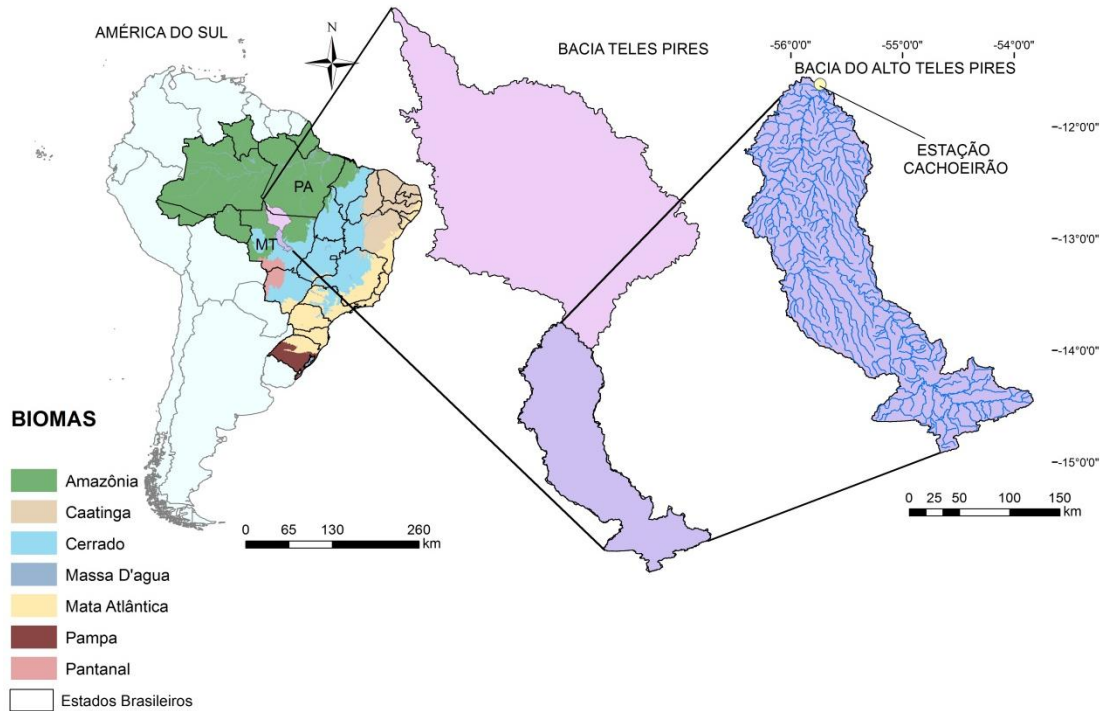


Figura 1. Distribuição espacial dos biomas Brasileiros e localização da bacia do Alto Teles Pires.

2.2 Simulação do balanço hídrico pelo SWAT

Os componentes do balanço hídrico para BATP foram simulados e separados de acordo com a equação a seguir:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R - Q_{sup} - E_a - W_s - Q_{subt}) \quad (1)$$

Em que SW_t é a quantidade final de água no solo (mm), SW_0 é a umidade do solo inicial no dia i (mm), t é o tempo (dias), R é a quantidade de precipitação no dia i (mm), Q_{sup} é a quantidade de área de escoamento superficial no dia i (mm), E_a é a quantidade de evapotranspiração no dia i (mm), W_s é a quantidade de água que entra na zona de aeração do perfil do solo no dia i (mm) e Q_{subt} é a quantidade de retorno do fluxo no dia i (mm).

Foram modelados os componentes do balanço hídrico para quatro cenários diferentes, sendo eles o uso e ocupação do solo nos anos 1986, 1996, 2006 e 2014.

Para tanto, foram utilizadas imagens do satélite TM-Landsat-5 e TM-Landsat-8 e feita classificação supervisionada através do software ENVI 5.0. A comparação entre o uso e cobertura da terra gerados e a confirmação de campo foi feita com uso dos índices de exatidão e verificação a campo (Zaiatz et al., 2016).

2.3 Análise de desempenho do modelo

A confiança da simulação dos componentes do balanço hídrico foi verificada a partir da comparação dos dados simulados pelo modelo com dados de vazão observados no exutório da bacia da estação Cachoeirão obtido pelo Sistema de Informação Hidrológica (HIDROWEB) (ANA, 2016). Para isso foi utilizado o uso do solo elaborado para o ano de 2014, tomando este como cenário mais próximo do real, como utilizado por Pereira et al. (2014, 2016) e posteriormente foi simulado o balanço hídrico para os demais cenários de uso do solo nos anos de 1986, 1996 e 2006. Os dados das séries de vazões disponíveis compreendem 20 anos de dados (1991-2011), que foi dividido em 3 fases, sendo os cinco primeiros anos (1991-1995) utilizados para o “aquecimento” do modelo, ou seja, para a diminuição dos efeitos das condições iniciais utilizadas (COLLISCHONN e TUCCI, 2001), os dez anos subsequentes (1996-2006) foram utilizados para a calibração do modelo e os últimos cinco anos (2006-2011) para a sua validação.

Para avaliar a performance do modelo SWAT foram analisados os seguintes parâmetros estatísticos: coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NS) e sua versão logarítmica (NSlog), a porcentagem BIAS (PBIAS) e a razão entre o erro quadrático médio e o desvio padrão dos dados medidos (RSR), dados pelas seguintes equações:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q}_m)^2} \quad (2)$$

$$NS_{log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(Q_m) - \log(Q_s))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(Q_m) - \log(\bar{Q}_m))^2} \quad (3)$$

$$P_{BIAS} = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)_i}{\sum_{i=1}^n Q_m} \quad (4)$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}}{\sqrt{\sum_i (Q_m - \bar{Q}_m)^2}} \quad (5)$$

Em que Q_m é vazão observada no dia i ($m^3 s^{-1}$); Q_s é vazão simulada no dia i ($m^3 s^{-1}$); \bar{Q}_m é vazão média observada ($m^3 s^{-1}$); \bar{Q}_s é vazão média dos dados simulados ($m^3 s^{-1}$) e n é número de eventos.

Motovilov et al. (1999) apresentam classificação da faixa de valores para o índice NS e sua versão logarítmica, conforme segue: $0,75 < NS$ o modelo é considerado bom; $0,36 < NS \leq 0,75$ o modelo é considerado satisfatório e $NS \leq 0,36$ o modelo é considerado insatisfatório. Segundo a classificação de Moriasi et al. (2007) o valor de RSR tem os seguintes intervalos: $0,50 < RSR$ muito bom, $0,50 < RSR \leq 0,60$ bom, $0,6 < RSR \leq 0,70$ satisfatório e $RSR > 0,70$ insatisfatório.

Liew et al. (2007) apresentam a seguinte classificação para os intervalos de porcentagem viés: $|PBIAS| < 10\%$, muito bom; $10\% < |PBIAS| < 15\%$, bom; $15\% < |PBIAS| < 25\%$, satisfatório e $|PBIAS| > 25\%$, o modelo é considerado insatisfatório.

2.4 Base de dados

As demais variáveis físicas e climatológicas exigidas pelo SWAT foram obtidas de diferentes bases de dados. O Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado foi o SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) com resolução espacial de 30m, disponibilizados pelo U.S. Geological Survey (USGS, 2016) (Figura 2A).

A classificação de solos foi obtida a partir da base de dados do IBGE elaborada por Santos et al. (2011) (Figura 2B), onde a distribuição espacial percentual das classes de solos encontrada para o BATP foi: Cambissolo (CX) 18,25%, Latossolo Vermelho (LV) 7,32%, Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) 55,39%, Argissolo Vermelho (PV) 2,65%, Argissolo Vermelho Amarelo (PVA) 0,28%, Neossolo Quartzarênico (RQ) 14,38% e Neossolo Flúvico (RU) 1,76%.

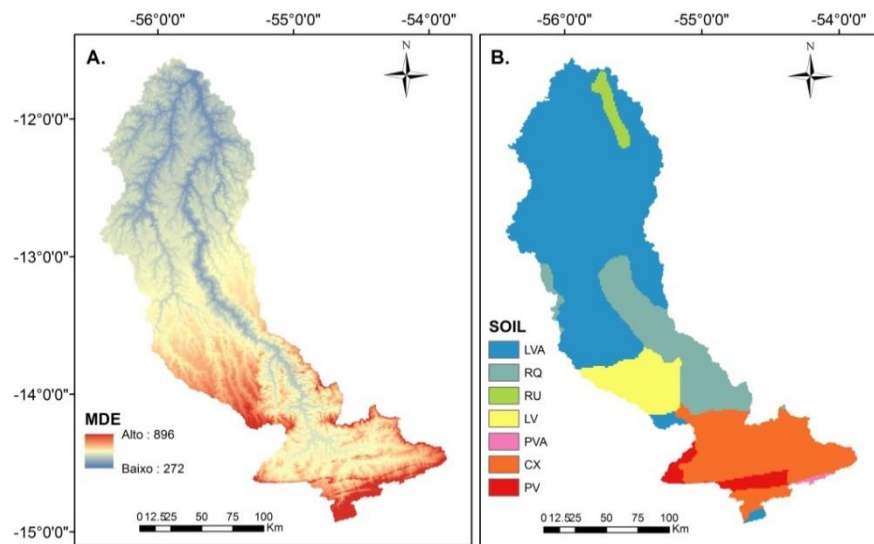


Figura 2. Mapa do Modelo Digital de Elevação (A) e os tipos predominantes de solo - Cambissolo (CX), Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), Argissolo Vermelho (PV), Argissolo Vermelho Amarelo (PVA), Neossolo Quartzarênico (RQ) e Neossolo Flúvico (RU) (B).

Os dados de precipitação diária foram inseridos com base nos dados pluviométricos das estações de Paranatinga, Porto Roncador, Teles Pires, Cachoeirão e Nova Mutum (Tabela 1) obtidos pelo HIDROWEB (ANA, 2016), já as informações de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar foram gerados a partir de dados estatísticos do clima da bacia inseridos ao WXGEN (Weather Generator) (SHARPLEY & WILLIAMS, 1990) calculados com base na metodologia exposta por Guerreiro et al., 2004. Para isso utilizou-se variáveis climáticas do banco de estações automáticas de Sorriso (município de Sorriso) disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e também dos dados das estações da Gleba Celeste (município de Vera) (Tabela 1) das Normais Climatológicas do Brasil (INMET, 2016).

Tabela 1. Estações pluviométricas e meteorológicas utilizadas para a obtenção de séries históricas e dados estatísticos do clima da bacia hidrográfica do Alto Teles Pires.

Código	Estação	Tipo	Latitude	Longitude	Período de dados
1454000	Paranatinga	Convencional	-14°25'04"	-54°02'58"	1991-2011
1355001	Porto Roncador	Convencional	-13°33'23"	-55°19'54"	1991-2011
1255001	Teles Pires	Convencional	-12°40'30"	-55°47'35"	1991-2011
1155000	Cachoeirão	Convencional	-11°39'04"	-55°42'09"	1991-2011
1356002	Nova Mutum	Convencional	-13°48'56"	-56°07'20"	1991-2011
83264	Gleba Celeste	Convencional	-12°17'18"	-55°17'37"	1961-1990
MT_A904	Sorriso	Automática	-12°33'00"	-55°43'00"	2003-2014

Fonte: ANA, 2016

Tabela 2. Parâmetros climáticos obtidos a partir dos dados da estação de Sorriso e normais climatológicas da estação Gleba Celeste utilizados no WXGEN.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TMPMX	30,7	30,7	31,1	31,5	31,3	31,4	31,7	33,2	32,9	32,6	31,1	30,5
TMPMN	19,9	19,8	19,7	19,6	18,1	15,6	14,9	15,5	17,6	19,6	19,9	20,0
TMPSTDMX	1,9	2,2	1,3	1,2	1,4	20,3	1,3	11,4	2,8	2,4	2,2	2,4
TMPSTDMN	0,8	0,9	0,7	0,8	1,2	1,7	1,8	1,5	1,6	0,6	0,9	0,8
PCPMM	317,2	364,3	295,6	139,3	49,0	13,1	2,3	10,9	64,1	180,8	280,8	374,4
PCPSTD	16,8	26,3	8,6	6,8	0,7	4,5	0,1	0,6	4,2	12,7	7,9	26,6
PCPSKW	0,8	1,5	1,3	1,2	2,3	4,0	4,7	2,4	2,0	0,9	0,4	0,8
PR_W1	0,2	0,2	0,4	0,4	0,5	1,0	0,1	1,0	0,6	0,6	0,4	0,1
PR_W2	0,8	0,8	0,6	0,6	0,5	0,1	1,0	0,1	0,4	0,4	0,6	0,9
PCPD	20,0	20,0	19,0	10,0	4,0	1,0	0,0	1,0	4,0	12,0	17,0	20,0
RAINHHMX	65,5	76,0	39,6	36,1	3,8	24,6	0,0	3,3	29,6	45,7	30,2	93,5
SOLARAV	18,8	17,6	18,8	18,6	18,9	18,4	19,1	20,3	19,0	20,0	17,7	17,2
DEWPT	21,4	21,4	21,7	22,2	20,0	19,9	15,7	14,0	18,1	20,9	21,6	22,0
WNDVAV	7,6	8,0	7,5	6,8	6,4	7,6	8,3	9,1	8,6	9,0	7,8	7,6

TMPMX, TMPMN – média da temperatura máxima e mínima diária do mês (°C); TMPSTDMX, TMPSTDMN – desvio padrão da temperatura máxima e mínima diária do mês (°C); PCPMM – média da precipitação total mensal (mm); PCPSTD – desvio padrão para precipitação diária do mês (mm); PCPSKW – coeficiente de assimetria para a precipitação diária do mês; PR_W1, PRW2 – probabilidade de dia húmido seguido de dia seco e probabilidade de dia húmido seguido de dia húmido (%); PCPD – número de dias de precipitação (dias); RAINHHMX – precipitação máxima de 0.5 hora (mm); SOLARAV – média da radiação solar no mês ($\text{MJ. m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); DEWPT – média da temperatura do ponto de orvalho no mês (°C); WNDVAV – velocidade do vento (m.s^{-1})

3. Resultados e Discussão

Na Figura 3 são apresentados o uso e ocupação do solo para os anos de 1986, 1996, 2006 e 2014. Observa-se um aumento da classe da agricultura nos

anos de 2006 e 2014 e conseqüentemente um decréscimo de área da classe mata durante este período. Rivero et al. (2009) e Geist e Lambin, (2001, 2002) destacam as principais causas do desmatamento na Amazônia em três categorias: expansão das pastagens e áreas agrícolas, extração de madeira e expansão da infraestrutura, que ocorrem, predominantemente, no sentido norte a partir da região central brasileira, ou seja, atingindo diretamente o ecossistema frágil correspondente à áreas de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia (DOMINGUES e BERMANN, 2012).

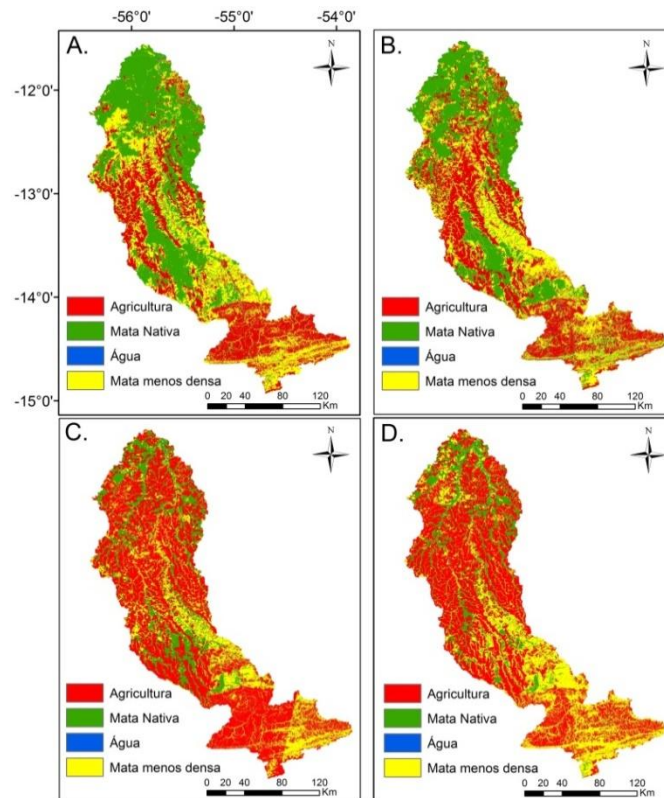


Figura 3. Dinâmica do uso e ocupação do solo para os anos de 1986 (A), 1996 (B), 2006 (C) e 2014 (D), adaptado de ZAIATZ et al. (2016).

Com base na porcentagem de ocupação de cada classe para BATP para os quatro cenários estudados (Tabela 3) observa-se um grande aumento da classe Agricultura, correspondendo a 31,03% do total da área da bacia em 1986, aumentando em 28,28% até o ano de 2006 e posteriormente reduzindo em 23,1% para o ano de 2014. Em relação à primeira, a classe Mata menos densa apresentou comportamento contrário a Agricultura, tendo decréscimo até o ano de 2006 e aumento a partir de então. De acordo com a Lei 12.651/2012 referente ao novo Código Florestal, os usuários foram obrigados a iniciar os processos de recomposição e recuperação de área de Reserva Legal, Áreas de Preservação Permanente e de uso restrito a partir da metade do ano de 2008, explicando assim a diminuição da classe Agricultura e aumento da classe Mata menos densa.

No decorrer dos anos pode-se observar uma redução da Mata nativa, respectivamente 4,83% entre 1986-1996, 15,7% entre 1996-2006 e 2,55% entre 2006-2014, totalizando uma redução de 23,08% dessa classe no período de 1986-

2014. A classe Água apresentou pouca variação para os anos analisados, correspondendo em média a aproximadamente 0,2% da área da bacia.

Fearnside (2006) realizou uma estimativa para a taxa de desmatamento na Amazônia e constatou um aumento de 27,9% ($23,06 \text{ km}^2 \text{ ano}^{-1}$) em 2002, quando comparada à taxa de $18,165 \text{ km}^2 \text{ ano}^{-1}$ observada em 2001. A taxa de desmatamento continuou aumentando até o ano de 2004, correspondente a $27,400 \text{ km}^2 \text{ ano}^{-1}$, o que demonstra que o aumento das áreas desmatadas ocorreu, de forma mais expressiva, entre os anos de 2001 e 2004, corroborando com o desmatamento verificado neste trabalho para a BATP.

Tabela 3. Porcentagem de ocupação de cada classe de uso da terra em relação à área total da bacia do Alto Teles Pires.

Uso do solo	1986	1996	2006	2014
	%			
Agricultura	31,03	36,13	59,31	54,13
Mata nativa	38,58	33,75	18,05	15,50
Mata menos densa	30,18	29,89	22,46	30,11
Água	0,21	0,22	0,18	0,25

Com relação ao hidrograma de vazões diárias, observado e simulado, bem como a tendência das vazões diárias acumuladas (Figura 4) utilizou-se como base de comparação nas simulações o uso do solo para o ano de 2014, ou seja, este foi utilizado e considerado com o cenário real para simular a vazão no exutório da bacia. No período de calibração (Figura 4A), a vazão simulada acompanhou a mesma tendência da vazão observada, sendo que para a vazão acumulada neste período, os dados simulados superestimaram a vazão observada, tendo uma diferença do valor total acumulado de -1,7%. Já para o período de validação (Figura 4B) os dados foram subestimados, apresentando uma diferença percentual de 7,3% para o valor total acumulado. Dessa forma, de acordo com a classificação Liew et al. (2007) para o percentual viés (PBIAS), o modelo pode ser considerado muito bom ($\text{PBIAS} < 10\%$).

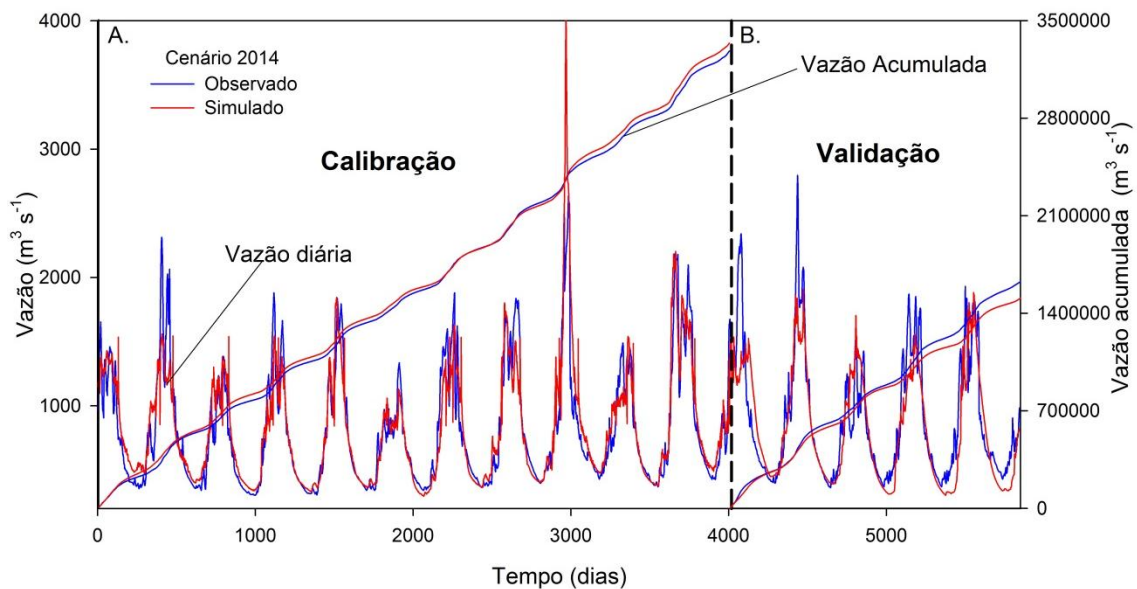


Figura 4. Hidrogramas observado e simulado da vazão diária e vazão diária acumulada no período de calibração (1996 – 2006) (A) e validação (2007 – 2011) (B) para estação de Cachoeirão.

O coeficiente de NS retrata a estimativa das vazões de pico, já sua versão logarítmica verifica a performance do modelo na simulação das vazões de recessão. Ambos os coeficiente de NS e NSlog apresentaram valores elevados no período de calibração (Tabela 4), respectivamente 0,81 e 0,90, demonstrando o bom desempenho do modelo, que pode ser classificado como bom (Motovilov et al., 1999). Para o período de validação os valores dos coeficiente de NS, NSlog e RSR foram de respectivamente 0,72, 0,75 e 0,53 demonstrando desempenho satisfatório para o modelo.

Tabela 4. Parâmetros estatísticos de Nash e Sutcliffe (NS), versão logarítmica de Nash Sutcliffe (NSlog), porcentagem BIAS (PBIAS) e razão entre o erro quadrático médio e o desvio padrão dos dados medidos (RSR) resultantes da calibração (1996 – 2006) e validação (2007 – 2011) da vazão no cenário de 2014 para estação de Cachoeirão.

Período	NS	NSlog	RSR	PBIAS
Calibração	0,81	0,90	0,43	-1,7
Validação	0,72	0,75	0,53	7,3

Os valores de percentual viés, referentes à vazão observada e simulada de 1996 a 2011 (Tabela 5), variaram entre -19,2% e -0,5%, ou seja, são valores considerados satisfatórios (LIEW et al., 2007). Verifica-se que na maioria dos anos, a vazão foi subestimada, sendo superestimada em apenas seis anos (1996, 1998, 2004, 2005, 2006 e 2009).

Tabela 5. Vazão anual acumulada observada e simulada durante o período de calibração e validação do modelo SWAT para a bacia do Alto Teles Pires na estação de Cachoeirão.

Período	Ano	Precipitação	Vazão Anual Acumulada		Erro
			Observado	Simulado	
		mm		m ³	%
Calibração	1996	1665,7	283209,9	324376,6	-14,5
	1997	1637,1	314006,9	295450,3	5,9
	1998	1518,4	242794,5	262514,6	-8,1
	1999	1447,2	262881,6	253241,8	3,7
	2000	1564,7	288999,5	285378,0	1,3
	2001	1568,2	251196,8	228255,2	9,1
	2002	1665,1	279207,3	276886,4	0,8
	2003	1759,2	334873,5	317727,9	5,1
	2004	2059,5	337455,6	402217,8	-19,2
	2005	1764,8	293071,6	295085,3	-0,7
Validação	2006	1990,4	386405,9	389496,2	-0,8
	2007	1575,7	331369,0	325816,4	1,7
	2008	1803,3	350325,1	319096,4	8,9
	2009	1695,4	285899,6	287251,8	-0,5
	2010	1686,8	332861,2	270335,9	18,8
	2011	1970,5	327342,3	306063,1	6,5

De acordo com os valores obtidos para os coeficientes de NS, NSlog, RSR e erro das vazões anuais, pode-se considerar que o modelo SWAT apresentou um desempenho satisfatório para a simulação dos efeitos da mudança do uso e ocupação do solo nos componentes do balanço hídrico.

A média anual de escoamento superficial (Qsup) (Figura 5) para cenário do uso do solo de 1986 foi de 121,45mm, sendo este o menor valor quando comparado com os demais cenários. A explicação desta ocorrência é devido ao fato da classe

Mata nativa no cenário de 1986, ocupar 38% da área da bacia, que conseqüentemente promove aumento na taxa de infiltração, retenção de água no solo e principalmente o aumento do escoamento subsuperficial (Q_{sub}) (Figura 5) em relação aos outros cenários.

A retirada da vegetação deixa a superfície do solo mais exposta à ação direta das gotas das chuvas, facilitando o movimento da água na superfície, diminuindo a velocidade de infiltração e conseqüentemente gerando maior escoamento superficial (CARDOSO et al., 2012; RODRIGUES et al., 2013). Em áreas agrícolas, o mau uso do solo, a mecanização intensiva, a monocultura, destruição das áreas de preservação permanente e o elevado uso de insumos químicos podem alterar as características naturais do solo, causando esgotamento, degradação e erosão (OLIVEIRA et al., 2012). O cenário de 2006 mostrou uma maior ocupação da classe Agricultura na BATP, que conseqüentemente resultou num maior escoamento superficial na simulação dos componentes do balanço hídrico, bem como maior produção de água e menor taxa de evapotranspiração e escoamento lateral, o mesmo ocorre para o ano de 2014, contudo, em menor proporção devido ao fato de apresentar um decréscimo na área agricultável e aumento da área com mata menos densa.

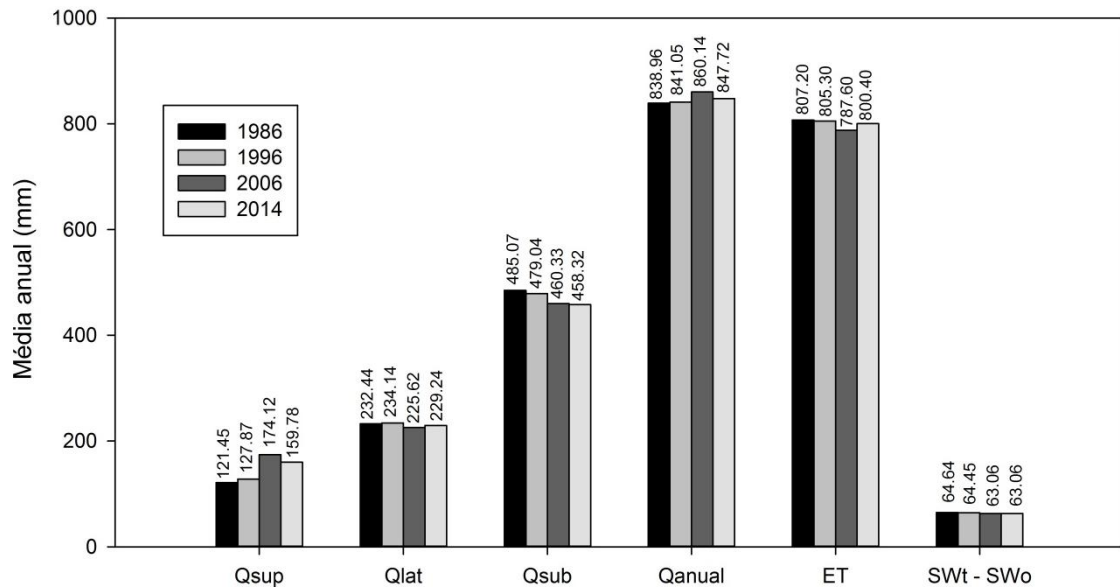


Figura 5. Variação média anual dos componentes do balanço hídrico, escoamento superficial (Qsup), escoamento lateral (Qlat), escoamento subsuperficial (Qsub), produção de água (Qanual), evapotranspiração (ET) e variação do conteúdo de água no solo (SWt – SWo) para os anos simulados desde 1996 a 2011, para o cenários de 1986, 1996, 2006 e 2014.

Pereira et al. (2014) também avaliaram o efeito da mudança de cenários de uso e ocupação do solo no balanço hídrico utilizando o SWAT e verificaram maior escoamento superficial no cenário pessimista, onde as classes que ocupavam maior parte da bacia eram pastagem e agricultura. Já no cenário onde a mata nativa ocupava 97% da área da bacia o escoamento superficial e a produção de água foi menor e a evapotranspiração aumentou. Lima et al. (2015) utilizaram o SWAT para representar o balanço hídrico em biomas brasileiros e concluíram que, no bioma caatinga o escoamento superficial e o fluxo de base foram menores em relação aos mesmos componentes no bioma cerrado, que por sua vez apresentou uma taxa de evapotranspiração menor. Embora existam estudos para alguns biomas Brasileiros referentes à quantificação dos componentes do balanço hídrico, não se tem trabalhos para a região de transição Cerrado/Amazônia.

Na Figura 6 estão apresentados as variáveis evapotranspiração (ET), armazenamento de água no solo (AWC), escoamento superficial (SURQGEN) e escoamento lateral e subterrâneo (GWQ) de forma espacializada.

Com relação à evapotranspiração (ET) (Figura 6A a 6B), observa-se um aumento ao longo dos anos. No cenário de 1986, a faixa de ET entre 939,7 e 1746,3 mm ocupava 13,15% da área total da bacia e no cenário de 2014 passou a ocupar 26,66%. Mesmo aumentando a evapotranspiração no cenário de 2014, a média anual no cenário de 1986 foi maior pelo fato da classe mata ocupar parte expressiva da bacia (14,304 km²) resultando em lâminas de evapotranspiração variando de 736,8 a 829,1 mm, o que representou 41,27 % da bacia.

No cenário de 1996 (Figura 6E) ocorreu diminuição da lamina armazenada no solo quando comparada ao cenário de 1986 (Figura 6F), principalmente na região sul da BAP. No cenários de 2006 e 2014 (Figuras 6G e H) observa-se um aumento do conteúdo de água no solo nas região central e norte da bacia, tendo uma aumento significativo na região sul no cenário de 2014.

O escoamento superficial diminuiu em relação à área dos cenários 1986 para 1996, visualmente na região sul da bacia (Figuras 6I e J), onde em 1986 as faixas de 0 a 52,5 mm representavam uma área de 17.133 km², já no cenário de 1996 esta faixa ocupava área 13,50% maior, ou seja, 21.812 km². Nos cenários de 2006 e 2014 (Figuras 6K e L) aumenta as áreas com menor escoamento, tendo acréscimo de escoamento superficial somente na cabeceira e exutório da bacia. No escoamento lateral e subterrâneo simulado pelo modelo SWAT, verifica-se uma diminuição desses componentes próximos ao exutório da bacia nos cenários de 2006 e 2014 (Figuras 6O e P) comparados ao cenário de 1986 e 1996.

Entre o comportamento das médias anuais dos componentes do balanço hídrico para toda a bacia (Figura 5) e o comportamento especializado em porcentagem de área da bacia (Figura 6), indica que o gerenciamento dos recursos hídricos possa seguir diferentes manejos a se adotar pontualmente, bem como os processos de decisão de outorga do direito do uso da água, planejamento das atividades agropecuárias e melhor conservação e uso do solo.

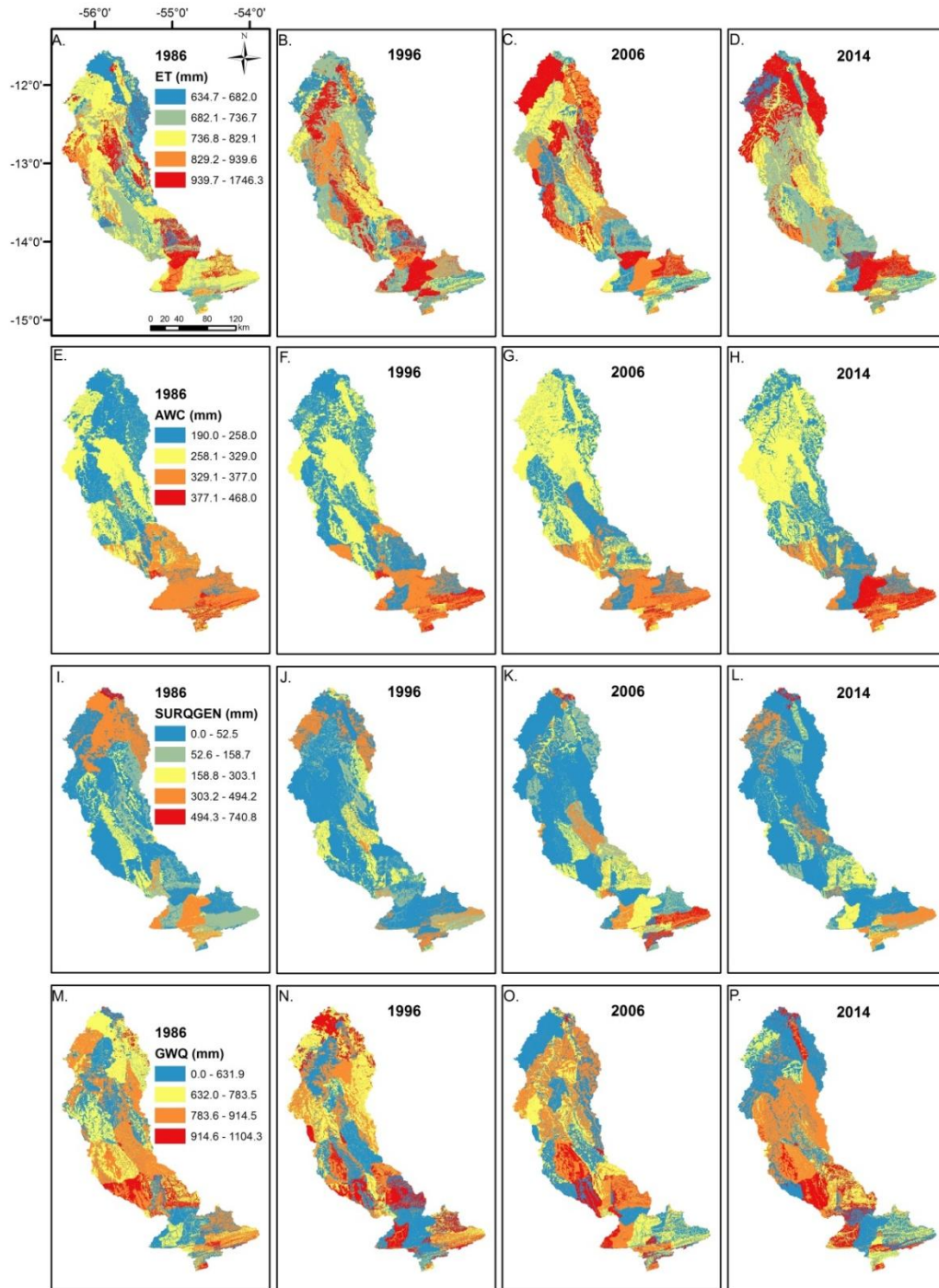


Figura 6. Distribuição espacial dos componentes do balanço hídrico variando de acordo com os diferentes cenários. Evapotranspiração (ET) para 1986 (A), 1996 (B), 2006 (C) e 2014 (D); Armazenamento de água no solo (AWC) para 1986 (E), 1996 (F), 2006 (G) e 2014 (H); Escoamento superficial (SURQGEN) para 1986 (I), 1996 (J), 2006 (K) e 2014 (L); Escoamento lateral e subterrâneo (GWQ) para 1986 (M), 1996 (N), 2006 (O) e 2014 (P).

Na análise das vazões mínimas (Tabela 6), não se observa diferença expressiva entre os dados observados e simulados, tendo discrepância maior (4.94%) a vazão de permanência de 95% no cenário de 2014, quando comparada ao valor observado.

Tabela 6. Vazões mínimas observadas e erro percentual (P_{BIAS}) simulado para cada cenário de uso do solo.

Vazão mínima	Observado	2014	2006	1996	1986
	$m^3 s^{-1}$	Erro (%)			
Q 95%	361.40	4.94	4.11	3.28	4.23
Q 90%	386.00	1.79	0.84	0.80	2.64
Q 7,10	318.60	1.43	2.47	1.00	-1.33

As vazões mínimas simuladas, em geral, subestimaram a vazão observada, com exceção da vazão Q7,10 no cenário de 1986, que foi superestimada em 1,33%. Os menores erros foram observados para a vazão de permanência de 90% nos cenários de 1996 (0,80%) e 2006 (0,84%).

4. Conclusões

1. O modelo SWAT se mostrou adequado para simulação da vazão na BATP em função da boa concordância encontrada para os valores de vazão observados e simulados, conforme os índices NS, NSlog, PBIAS e RSR. A parametrização do modelo foi adequada para a reprodução do regime de vazões da BATP.
2. A calibração e validação do SWAT para a BATP permite analisar o regime hidrológico atual da bacia. Adicionalmente o modelo SWAT pode ser utilizado para o estudo de alternativas de manejo/gestão dos recursos hídricos sob diferentes cenários de uso e ocupação do solo.
3. O cenário de 2006 gerou uma maior lâmina de escoamento superficial e produção de água, já no cenário de 1986 e 1996 as maiores lâminas foram de evapotranspiração, escoamento lateral e subsuperficial.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a Embrapa Agrossilvipastoril, a Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) por meio do programa de pós-graduação em Agronomia (Campus de Sinop), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT).

6. Referências

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANA - Agência Nacional das Águas. Hidroweb: **Sistemas de informações hidrológicas**. 2016. <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. 15 Abril 2016.

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, p. 69-76, 2013.

ARNOLD, J.G.; ALLEN, P. M. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. **Journal of Hydrology**, v.176, p.57-77, 1996.

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Resolução No. 357, de 17 de março de 2005. Brasília, DF: SEMA. 23 p. 2005. Disponível em: www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>. Acesso em: 11 abril 2016.

BRESSIANI, D. D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N. B.; MENDIONDO, E. M. Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 9-35, 2015.

CARDOSO, D. P.; SILVA, M. L. N.; CARVALHO, G. J.; FREITAS, D. A. F.; AVANZI, J. C. Plantas de cobertura no controle das perdas de solo, água e nutrientes por erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.16, p.632–638, 2012.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica em grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, p. 95-118, 2001.

DOMINGUES, M. S.; BERMANN, C. O arco de desflorestamento na Amazônia: da pecuária à soja. **Ambiente & sociedade**, v. 15, n. 2, p. 1-22, 2012.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2009). **Avaliação Ambiental Integrada da Bacia Hidrográfica do Rio Teles Pires**. EPE/CONCREMAT, Brasília/DF.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. **Acta Amazônica**, v. 36, n. 3, p. 395-400, 2006.

FOSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; BERNTSEN, T.; BETTS, R.; FAHEY, D. W.; HAYWOOD, J.; LEAN, J.; LOWE, D. C.; MYHRE, G.; NGANGA, J.; PRINN, R.; RAGA, G.; SCHULZ, M.; VAN DORLAND, R. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. Chapter 2. In: **Climate Change 2007. The Physical Science Basis**. 2007.

GEIST, H. J.; LAMBIN, E. F. Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation Tropical forests are disappearing as the result of many pressures, both local and regional, acting in various combinations in different geographical locations. **BioScience**, v. 52, n. 2, p. 143-150, 2002.

GEIST, H. J.; LAMBIN, E. F. What drives tropical deforestation. **LUCR Report series**, v. 4, p. 116, 2001.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil 1961 - 1990**. 2016. <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. 15 Abril 2016.

LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: Comparison on USDA agricultural research service watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007.

LIMA, J. E. F. W.; MONTENEGRO, S.; DE ASSUNÇÃO MONTENEGRO, A. A.; KOIDE, S. Comparative hydrology: relationships among physical characteristics, hydrological behavior, and results of the SWAT model in different regions of Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 6, p. 1187-1195, 2015.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. W. VAN; BINGER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MOTOVILOV, Y. G.; GOTTSCHALK, L.; ENGELAND, K.; RODHE, A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 98, p. 257-277, 1999.

NETO, J. DE O. M.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; MÉLLO JÚNIOR, A. V. Simulação Hidrológica Escalar com o Modelo SWAT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V. 19 n.1, p. 177-188, 2014.

NÓBREGA, R. S. Impacts of deforestation and climate change on water resources in the Western Amazon using the SLURP model. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. SPE, p. 111-120, 2014.

OLIVEIRA, J. G. R.; RALISCH, R. G.; MARIA, F.; BARBOSA, G. M. C.; FILHO, J. T. Erosão no plantio direto: perda de solo, água e nutrientes. **Boletim Geografia**, Maringá, v. 30, p. 91-98, 2012.

PEREIRA, D. D. R.; ALMEIDA, A. Q. D.; MARTINEZ, M. A.; ROSA, D. R. Q. Impacts of deforestation on water balance components of a watershed on the Brazilian East Coast. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 4, p. 1350-1358, 2014.

PEREIRA, D. D. R.; MARTINEZ, M. A.; DA SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT Model Part II: Simulation of hydrological variables and soil use scenarios. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 5, p. 149-163, 2016.

RIEGER, F. A.; ZOLIN, C. A.; PAULINO, J.; SOUZA, A. P. D.; MATOS, E. D. S.; MAGALHÃES, C. A. D. S.; FARIAS NETO, A. L. D. Water Erosion on an Oxisol under Integrated Crop-Forest Systems in a Transitional Area between the Amazon and Cerrado Biomes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1-12, 2016.

RIVERO, S.; ALMEIDA, O.; ÁVILA, S.; OLIVEIRA, W. Pecuária e desmatamento: uma análise das principais causas diretas do desmatamento na Amazônia. **Nova economia**, v. 19, n. 1, p. 41-66, 2009.

RODRIGUES, J. O.; ANDRADE, E. A.; MENDONÇA, L. A. R.; ARAÚJO, J. C.; PALÁCIO, H. A. Q.; ARAÚJO, E. M. Respostas hidrológicas em pequenas bacias na região semiárida em função do uso do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, p.312-318, 2013.

SANTOS, H.; JÚNIOR, W. C.; DART, R. O.; ÁGLIO, M. L. D.; SOUZA, J.; PARES, J. G.; OLIVEIRA, A. P. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada - Dados eletrônicos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2011.

SHARPLEY, A.N.; WILLIAMS, J.R. Erosion/productivity impact calculator. Model documentation. Washington, D.C: USDAARS Technical, 1990. 235p. **Bulletin** 1768.

USGS – U.S. Geological Survey. **Global Data Explorer**. 2016. <<http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>>. 11 Abril 2016

VEIGA, A. M.; MELO D. C. R.; SOARES A. K.; TRINDADE M. C.; MELLO T. A.; SOUZA R. M. Diagnóstico das vazões do rio Teles Pires. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 20, 2012, Bento Gonçalves. **Anais...** Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2012.

ZAIATZ, A. P. S. R.; ZOLIN, C. A.; PAULINO, J.; VENDRUSCULO, L. G.; LOPES, T. R. Dinâmica do uso e ocupação do solo na sub-bacia do Alto rio Teles Pires no ecótono Cerrado/Amazônia. 2016. No Prelo.

CAPÍTULO 4- Análise da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Alto Teles Pires no ecótono Cerrado/Amazônia

RESUMO - A rápida mudança da dinâmica do uso e ocupação do solo decorrida da intervenção humana geram vários impactos no que diz respeito ao balanço hidrossedimentológico, causando erosão, enchentes, perda de nutrientes, assoreamento de rios e poluição, que conseqüentemente afeta a produtividade do solo e a qualidade e quantidade de água. Uma alternativa para verificação dos impactos decorrentes das ações antrópicas com relação à disponibilidade hídrica e a produção de sedimentos em grandes bacias hidrográficas é a modelagem hidrológica, pois essa simula/prediz como as alterações no ambiente refletem no balanço hidrossedimentológico. Foi utilizado o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) com o objetivo avaliar seu desempenho e quantificar a produção de sedimentos para a bacia do Alto Teles Pires. Foi realizada a calibração e validação para verificação da adequabilidade do modelo e após espacializado os fatores que compõe a Equação Universal Modificada de Perda de Solo (MUSLE), bem como a produção de sedimentos na bacia. O modelo SWAT se mostrou adequado para a simulação da vazão mensal e apesar da bacia não apresentar uma grande área com potencial de risco de erosão, pode-se tomar medidas de conservação para controlar efetivamente a perda de sedimentos em áreas susceptíveis.

Palavras-chave: SWAT, simulação, erosão, balanço hidrossedimentológico.

Sediment production modeling in the Upper Teles Pires hydrographic basin in the Cerrado/Amazon ecoton

ABSTRACT - The rapid change in land use and occupation dynamics resulting from human intervention generates a number of impacts in terms of hydrosedimentological balance, causing erosion, floods, nutrient loss, silting of rivers and pollution, which consequently affects soil productivity, quality and water concentration. An alternative way to verify the impacts of anthropic actions in relation to water availability and sediment production in large hydrographic basins is the hydrological modeling, since it simulates/predicts how changes in the environment reflect in the hydrosedimentological balance. The SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model was used to evaluate the performance of the model and to quantify sediment production for the Upper Teles Pires basin. The calibration and validation was carried out to verify the suitability of the model and then spacing the factors that make up the Modified Universal Equation of Soil Loss (MUSLE), as well as the sediment production in the basin. The SWAT model was adequate for the monthly flow simulation and although the basin does not present a large area with potential

erosion risk, conservation decisions can be taken to effectively control the loss of sediment in susceptible areas.

keywords: SWAT, simulation, erosion, hydrosedimentological balance.

1. Introdução

A mudança do uso e ocupação do solo é causada principalmente pela expansão dos núcleos urbanos e também pela dinâmica das atividades agropecuárias, ocasionando a retirada da vegetação nativa, uso insustentável do solo, não havendo preocupação com a conservação dos recursos naturais. Conseqüentemente essas atividades antrópicas desencadeiam outros processos, como erosão do solo, maior escoamento das águas pluviais, assoreamento e contaminação de cursos d'água, ou seja, verificam-se impactos em todo ciclo hidrológico e hidrosedimentológico nas bacias hidrográficas (ANDRADE et al., 2013).

A erosão do solo em uma bacia é o processo inicial responsável pela produção de sedimentos que serão transportados e depositados nos rios, lagos e reservatórios, contribuindo para o assoreamento dos mesmos e comprometendo a disponibilidade e qualidade da água. Portanto, quando se fala da conservação dos recursos hídricos, fala-se também, direta ou indiretamente, da conservação do solo uma vez que ambos os recursos estão intimamente relacionados (ZOLIN et al., 2011). A erosão acelerada, causada por intervenção humana, remove aos poucos as camadas superficiais do solo, causando vários problemas, como enchentes, perda de nutrientes do solo, redução da biodiversidade e da área agricultável.

Um dos problemas da erosão é que, muitas vezes, os nutrientes dos solos estão sendo levados sem que isso seja percebido, por ocorrer de forma contínua, porém devagar. Dessa forma, os solos cada vez mais estão sendo degradados e perdendo sua potencialidade de produção (VOLK et al., 2004).

O Brasil, um dos maiores produtores mundiais de alimentos, precisa adequar-se as transformações e causas que levam o decréscimo da produção, entre essas, está a perda de solos e de nutrientes. Atualmente o Estado de Mato Grosso encontra-se incluso na configuração desse novo cenário como um grande produtor

de grãos e fibras, sendo que o desenvolvimento econômico do estado está relacionado à expansão da fronteira agrícola do Centro-oeste (FIGUEIREDO et al., 2005). Além do estado mato-grossense ser um dos maiores produtores de alimentos do Brasil, a região centro norte do estado, onde se encontra a bacia hidrográfica do Teles Pires é uma área que vem sofrendo uma rápida mudança da dinâmica e uso do solo, devidamente por motivo da expansão das atividades agropecuárias que conseqüentemente afeta a resposta hidrossedimentológico desta bacia, com resultados importantes sobre os aspectos quantitativos e qualitativos do solo e da água.

Outro fato importante é que desde quando foi feito o inventário da bacia hidrográfica do rio Teles Pires por volta dos anos de 1980, já continha neste a proposta, de construir cinco aproveitamentos hidrelétricos na bacia, dentre elas: São Manoel (747 MW), Teles Pires (1820 MW), Colíder (342 MW), Sinop (461 MW) e Magessi (53 MW), estabelecendo uma previsão de que todas deverão estar em operação simultaneamente em 2017 e ainda hoje se tem poucos estudos de quais impactos esses empreendimentos causariam na região (EPE, 2009; VEIGA et al, 2012).

Ibama (2016) em seus estudos, aponta que a bacia do Rio Teles Pires dispõe de uma rede de estações climatológicas pequena e espacialmente mal distribuída, o que compromete também a realização de estudos de quais efeitos sinérgicos sofreriam essas usinas, como por exemplo, o transporte de sedimentos que conseqüentemente compromete a vida útil do reservatório das hidrelétricas.

Em uma bacia com uma rede hidrométrica de baixa densidade dificulta os estudos com relação à disponibilidade hídrica e com a produção de sedimentos em grandes bacias hidrográficas, com isso deve-se migrar para alternativas de estudo, como por exemplo, a modelagem hidrológica.

Um dos principais objetivos relacionados ao desenvolvimento de modelos hidrológicos é o de simular/predizer como as alterações no ambiente (sistema solo, planta e água), resultantes das atividades agrícolas, refletem nas alterações do balanço de água no solo e afetam a erosão e o transporte de sedimentos que, por sua vez, causam diversas modificações nos ecossistemas aquáticos e terrestres (NETO et al., 2011).

O SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (ARNOLD et al., 1998) é um dos modelos mais empregados no Brasil e no mundo, devido ao número de diferentes processos físicos que podem ser simulados em bacias hidrográficas, além disso, o SWAT é um modelo de parâmetros distribuídos, ou seja, suas variáveis e parâmetros dependem do espaço e/ou tempo. No Brasil a aplicação deste modelo cresceu significativamente nos últimos anos, visto que em seus estudos Bressiane et al. (2015) identificam que a categoria em estudos relacionados à vazão compreende 48% do total de estudos publicados sobre bacias brasileiras, seguidos de perda e transporte de sedimentos (36%), 9% dos estudos são relacionados a transporte de nutrientes, 6% de artigos de revisões e 1% relacionado à evapotranspiração. A maioria desses estudos são aplicados as regiões Sul, Sudeste e Nordeste Brasileiro, sendo poucos estudos relacionados à região Centro-oeste, principalmente no estado do Mato Grosso onde se tem aplicações do modelo apenas para a bacia do rio Cuiabá (BRESSIANE et al., 2015).

Com isso, embora os estudos de simulação hidrológica tenham ganhado força no Brasil na última década, ainda existe grande carência de tais estudos para as diferentes condições do país, de maneira especial nas regiões centro-norte do Brasil, onde tais estudos são, em alguns casos, inexistentes. A escassez de tais estudos e conseqüentemente de informações para a tomada de decisão compromete e, em alguns casos, impossibilita a tomada de decisão adequada para a gestão sustentável da água e do solo.

Com o exposto fica evidente a importância estratégica da bacia do rio Teles Pires para o desenvolvimento do estado de Mato Grosso, bem como a necessidade de informações que subsidiem a tomada de decisão quanto ao uso sustentável do solo e da água, justificando, portanto, a realização do presente estudo que tem como objetivo avaliar o desempenho do modelo SWAT e analisar a quantificação da produção de sedimentos para a bacia do Alto Teles Pires.

2. Material e Métodos

2.1 A bacia do rio Teles Pires

A bacia do rio Teles Pires ou rio São Manoel como também é conhecido, possui uma área de aproximadamente 141.278 km² e encontra-se situado nos estados de Mato Grosso e Pará. É tributário do rio Tapajós pela margem direita que por sua vez é contribuinte do rio Amazonas.

A bacia hidrográfica do Alto Teles Pires (BATP) encontra-se na faixa 15°00' e 11°00' de latitude sul e 54°00' e 57°00' de longitude oeste, localizada no ecótono Cerrado/Amazônia, possui uma área de aproximadamente 37.500 km² (Figura 1). A bacia apresenta uma rápida mudança na dinâmica do uso e ocupação do solo, devido à expansão agrícola da região nas últimas décadas que consequentemente influencia no ciclo hidrossedimentológico da bacia (ZAIATZ et al., 2016). Importante destacar que a bacia do Teles Pires apresenta grande potencial para o aproveitamento hidrelétrico, sendo que a sessão do Alto Teles Pires apresenta a maior vazão específica da bacia de 28,14 L s⁻¹ km⁻² (EPE, 2009).

Em termos climáticos, a bacia é dominada pelos climas do tipo Am (monsoon) e Aw (with dry winter). A precipitação anual na BATP é elevada, com valores variando de 1.800-2.300 mm (clima Am) a 2.000-3.000 mm (clima Aw) (ALVARES et al., 2013), sendo que a maior parcela da chuva ocorre numa estação bem definida, entre outubro e abril.

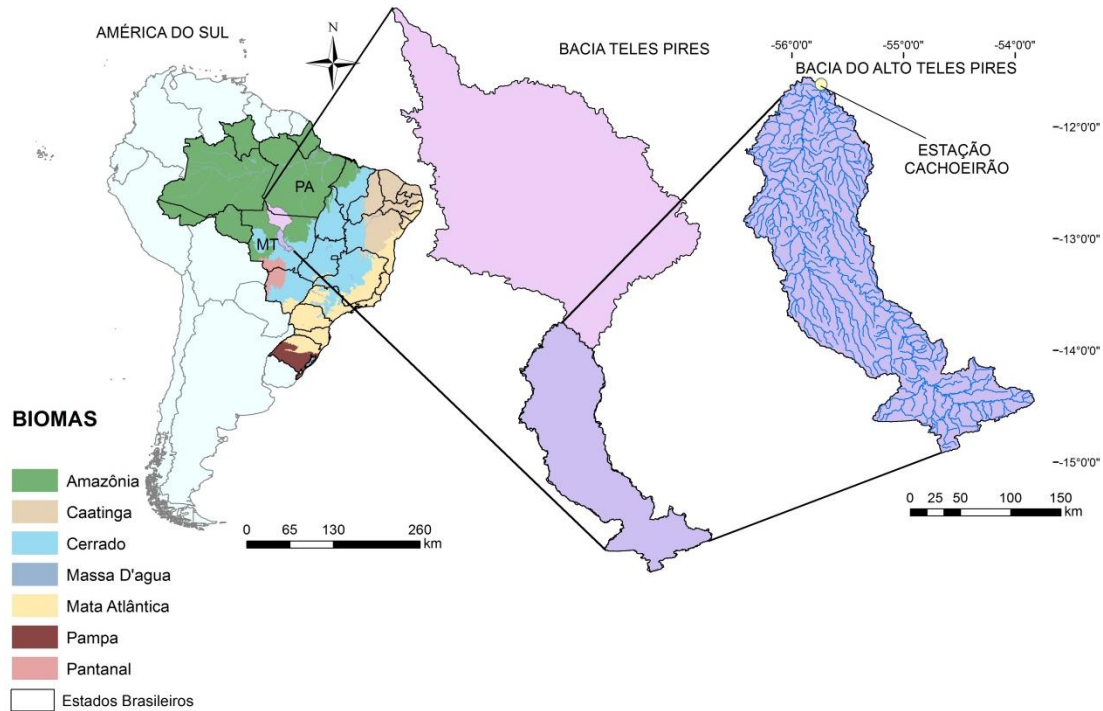


Figura 1. Distribuição espacial dos biomas Brasileiros e localização da bacia do Alto Teles Pires.

2.2 O modelo SWAT

SWAT é um modelo de tempo contínuo, de base física desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos - Agricultural Research Service (USDA-ARS) (Arnold et al, 1998) para prever a impacto das práticas de gestão de terras na água, nos sedimentos, e rendimentos químicos agrícolas em grandes bacias hidrográficas complexas.

O SWAT subdivide uma bacia em sub-bacias ligadas por uma rede de fluxo, e delinea em Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) que consistem em combinações de uso e cobertura da terra, solos e declividade. SWAT permite que um grande número de diferentes processos físicos seja simulado em uma bacia, obtendo a resposta por cada HRU.

A produção de sedimentos simulados pelo SWAT é estimada de acordo com a Equação Universal Modificada de Perda de Solo (MUSLE) (Equação 1):

$$\text{sed} = 11.8 (Q_{\text{surf}} \cdot q_{\text{peak}} \cdot \text{area}_{\text{hru}})^{0.56} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS \cdot \text{CFRG} \quad (1)$$

Onde sed é produção de sedimentos (Mg), Qsurf é o volume de escoamento superficial (mm ha^{-1}), qpeak é o índice máximo de escoamento ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), hru é a área de HRU (ha), K é fator de erodibilidade do solo ($\text{Mg h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$), P é o fator de prática de apoio, C é fator de cobertura e de gestão (adimensional), LS é fator topográfico (adimensional) e CFRG é o fator de fragmento bruto (adimensional).

As rotinas hidrológicas dentro SWAT representam processos em diversas zonas (i. e., a infiltração, evapotranspiração, fluxos laterais, percolação e os fluxos de águas subterrâneas), ou seja, o ciclo da água simulada pelo SWAT baseia-se na equação do balanço hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R - Q_{\text{sup}} - E_a - W_s - Q_{\text{subt}}) \quad (2)$$

Em que SWt é a quantidade final de água no solo (mm), SW0 é a umidade do solo inicial no dia (mm), t é o tempo (dias), R é a quantidade de precipitação no dia (mm), Qsup é a quantidade de água de escoamento superficial no dia (mm), Ea é a quantidade de evapotranspiração no dia (mm), Ws é a quantidade de água que entra na zona de aeração do perfil do solo no dia (mm) e Qsubt é a quantidade de retorno do fluxo no dia (mm).

2.3 Base de dados

As variáveis meteorológicas requeridas pelo modelo SWAT incluem precipitação diária, temperaturas máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar. Quando se tem a falta ou escassez destes dados para a bacia, pode-se gerar valores utilizando o modelo de geração de dados climáticos WXGEN (Weather Generator) (SHARPLEY & WILLIAMS, 1990), que permite a geração de dados meteorológicos para o preenchimento de falhas na série de dados meteorológicos diários.

Para BATP foram inseridos dados diários de precipitação de cinco estações, variando entre os anos de 1991 a 2011, obtidos por meio do Sistema de Informação Hidrológica (Hidroweb) (Tabela 1) das estações de Paranatinga, Porto Roncador,

Teles Pires, Cachoeirão e Nova Mutum. As demais variáveis foram geradas a partir WXGEN, no qual foram inseridos dados mensais e estatísticos do clima da bacia, para isso foram utilizadas duas estações, uma delas do município de Vera-MT (Gleba Celeste) (Tabela 1), que não contempla todos os dados necessários para alimentar o WXGEN, então só foram utilizadas as variáveis de número de dias com precipitação e temperatura máxima e mínima da base de dados das Normais Climatológicas do Brasil (INMET, 2016). As variáveis foram completadas a partir da estação automática de Sorriso-MT (Tabela 1), onde os valores inseridos no modelo são apresentados na Tabela 2.

Tabela 1. Estações pluviométricas e de clima utilizadas para a obtenção de séries históricas e dados estatísticos do clima da bacia hidrográfica do Alto Teles Pires

Código	Estação	Tipo	Latitude	Longitude	Período de dados
1454000	Paranatinga	Convencional	-14°25'04"	-54°02'58"	1991-2011
1355001	Porto Roncador	Convencional	-13°33'23"	-55°19'54"	1991-2011
1255001	Teles Pires	Convencional	-12°40'30"	-55°47'35"	1991-2011
1155000	Cachoeirão	Convencional	-11°39'04"	-55°42'09"	1991-2011
1356002	Nova Mutum	Convencional	-13°48'56"	-56°07'20"	1991-2011
83264	Gleba Celeste	Convencional	-12°17'18"	-55°17'37"	1961-1990
MT_A904	Sorriso	Automática	-12°33'00"	-55°43'00"	2003-2014

Fonte: ANA, 2016

Tabela 2. Parâmetros climáticos obtidos a partir dos dados da estação de Sorriso e normais climatológicas da estação Gleba Celeste inseridos no WXGEN.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TMPMX	30,7	30,7	31,1	31,5	31,3	31,4	31,7	33,2	32,9	32,6	31,1	30,5
TMPMN	19,9	19,8	19,7	19,6	18,1	15,6	14,9	15,5	17,6	19,6	19,9	20,0
TMPSTDMX	1,9	2,2	1,3	1,2	1,4	20,3	1,3	11,4	2,8	2,4	2,2	2,4
TMPSTDMN	0,8	0,9	0,7	0,8	1,2	1,7	1,8	1,5	1,6	0,6	0,9	0,8
PCPMM	317,2	364,3	295,6	139,3	49,0	13,1	2,3	10,9	64,1	180,8	280,8	374,4
PCPSTD	16,8	26,3	8,6	6,8	0,7	4,5	0,1	0,6	4,2	12,7	7,9	26,6
PCPSKW	0,8	1,5	1,3	1,2	2,3	4,0	4,7	2,4	2,0	0,9	0,4	0,8
PR_W1	0,2	0,2	0,4	0,4	0,5	1,0	0,1	1,0	0,6	0,6	0,4	0,1
PR_W2	0,8	0,8	0,6	0,6	0,5	0,1	1,0	0,1	0,4	0,4	0,6	0,9
PCPD	20,0	20,0	19,0	10,0	4,0	1,0	0,0	1,0	4,0	12,0	17,0	20,0
RAINHHMX	65,5	76,0	39,6	36,1	3,8	24,6	0,0	3,3	29,6	45,7	30,2	93,5
SOLARAV	18,8	17,6	18,8	18,6	18,9	18,4	19,1	20,3	19,0	20,0	17,7	17,2
DEWPT	21,4	21,4	21,7	22,2	20,0	19,9	15,7	14,0	18,1	20,9	21,6	22,0
WNAV	7,6	8,0	7,5	6,8	6,4	7,6	8,3	9,1	8,6	9,0	7,8	7,6

TMPMX, TMPMN – média da temperatura máxima e mínima diária do mês (°C); TMPSTDMX, TMPSTDMN – desvio padrão da temperatura máxima e mínima diária do mês (°C); PCPMM – média da precipitação total mensal (mm); PCPSTD – desvio padrão para precipitação diária do mês (mm); PCPSKW – coeficiente de assimetria para a precipitação diária do mês; PR_W1, PRW2 – probabilidade de dia húmido seguido de dia seco e probabilidade de dia húmido seguido de dia húmido (%); PCPD – número de dias de precipitação (dias); RAINHHMX – precipitação máxima de 0.5 hora (mm); SOLARAV – média da radiação solar no mês ($\text{MJ. m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); DEWPT – média da temperatura do ponto de orvalho no mês (°C); WNAV – velocidade do vento (m.s^{-1})

Dentre as variáveis físicas exigidas pelo SWAT, estão o relevo, pedologia e uso e cobertura da terra. Nesse trabalho foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) (Figura 2) do sensor orbital SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) com

resolução espacial de 30m, disponibilizados pelo USGS (U.S. Geological Survey) (USGS, 2016) e para a obtenção das HRUs as declividades foram divididas em classes de 0-10%, 10-20% e superior a 20% (Figura 2).

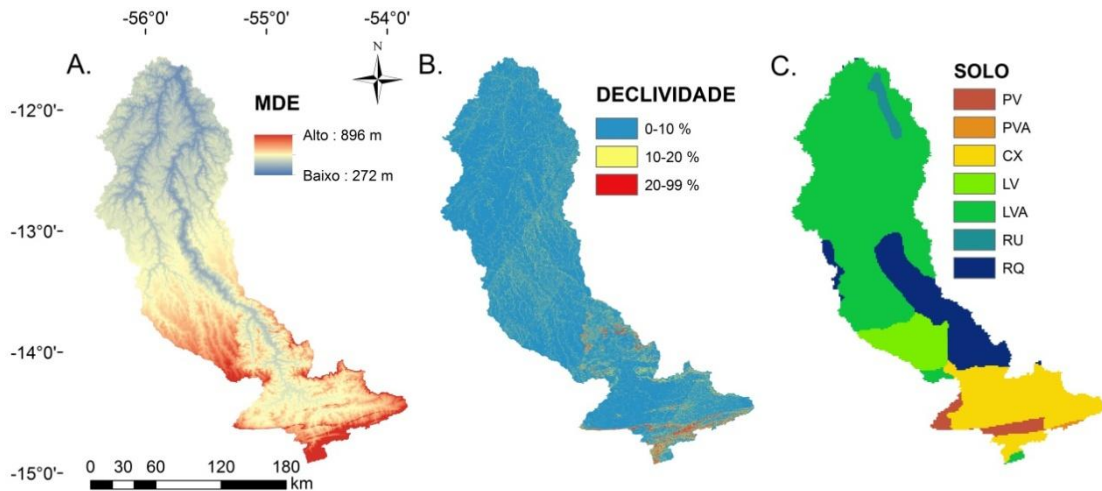


Figura 2. Modelo Digital de Elevação (MDE) (A), declividade (B) e classes de solo - Cambissolo (CX); Latossolo Vermelho (LV); Latossolo Vermelho Amarelo (LVA); Argissolo Vermelho (PV); Argissolo Vermelho Amarelo (PVA); Neossolo Quartzarênico (RQ) e Neossolo Flúvico (RU) para a bacia do Alto Teles Pires.

O mapa de uso e cobertura da terra utilizado neste trabalho foi baseado nos estudos conduzidos por Zaiatz et al. (2016), que separa as principais coberturas do solo na BATP em Agricultura (AGRL), Floresta (FRSE), Água (WATR) e Floresta secundária, menos densa (FRST) para o ano de 2014. O mapa com os tipos de solo predominantes na BATP foi elaborado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), conforme Santos et al. (2011) (Figura 2), e possui a seguinte distribuição: 18,25% para a classe de Cambissolo (CX); 7,32% para a classe de Latossolo Vermelho (LV); 55,39% para a classe de Latossolo Vermelho Amarelo (LVA); 2,65% para a classe de Argissolo Vermelho (PV); 0,28% para a classe de Argissolo Vermelho Amarelo (PVA); 14,38% para a classe de Neossolo Quartzarênico (RQ) e 1,76% para a classe de Neossolo Flúvico (RU).

Os parâmetros que caracterizam cada tipo de solo foram inseridos no modelo SWAT com base nos dados estudados por Baldissera (2005), Lima et al. (2013) e

Mingoti et al. (2016), sendo estes: HYDCRP (grupo hidrológico), SOL_ZMX (profundidade máxima), SOL_Z (profundidade da camada), SOL_BD (densidade aparente), SOL_AWC (armazenamento de água no solo), SOL_K (condutividade hidráulica), SOL_CBN (carbono orgânico), CLAY (argila), SILT (silte), SAND (areia), ROCK (seixo), USLE_K (erodibilidade). A porcentagem de seixo no solo foi considerada como zero, onde consequentemente o fator de fragmento bruto (CFRG) não é considerado na equação de produção de sedimentos.

Certos tipos de solos são erodidos com mais facilidade do que outros, mesmo que todos os outros fatores sejam os mesmos, ou seja, a erodibilidade é uma propriedade do solo que representa a sua susceptibilidade à erosão (MANNIGEL et al. 2008).

Os valores do fator de erodibilidade do solo (K) para as duas camadas de solo utilizadas (K-Layer 1 e K-Layer 2) (Tabela 3) foram inseridos com base nos dados estudados por Mingoti et al. (2016), que utilizaram o modelo SWAT para determinar as regiões susceptíveis a contaminação da água subterrânea em função de propriedades dos solos no Cerrado Brasileiro.

Tabela 3. Classificação de solos na bacia do Alto Teles Pires e valores de erodibilidade do solo (K), (MINGOTI et al. 2016).

Nº	Solo	K - Layer 1	K - Layer 2
1	CX	0,0254	0,0186
2	LV	0,0150	0,0050
3	LVA	0,0220	0,0090
4	PV	0,0228	0,0112
5	PVA	0,0350	0,0180
6	RQ	0,1500	0,1081
7	RU	0,0420	0,0420

Cambissolo (CX); Latossolo Vermelho (LV); Latossolo Vermelho Amarelo (LVA); Argissolo Vermelho (PV); Argissolo Vermelho Amarelo (PVA); Neossolo Quartzarênico (RQ) e Neossolo Flúvico (RU).

O fator C está relacionado ao uso da terra e é um fator de redução de vulnerabilidade a erosão do solo. Este fator representa a razão de perda de solo a partir de uma área com um determinado uso (BESKOW et al., 2009). Este fator foi adotado de acordo com a base de dados do SWAT (Land Cover/Plant Growth

Database) (ARNOLD e WILLIAMS, 1995), onde as classes correspondentes a florestas foi atribuído 0,001 e agricultura 0,2.

O fator topográfico (LS) representa a relação esperada de perda de solo por unidade de superfície com determinado comprimento e declive, influenciando assim tanto no escoamento superficial quanto na produção de sedimentos gerados (WILLIAMS e BERNDT, 1977). Esse fator foi obtido automaticamente do MDE, processado pelo modelo e obtendo os valores de inclinação, direção e acumulação de fluxo e comprimento do fluxo para cada célula (pixel).

As práticas de apoio ou praticas de gestão (P) são medidas utilizadas para reduzir o risco de erosão dos solos (BERTONI e LOMBARD NETO, 2005). A BATP é muito grande, portanto não se consegue fazer uma discretização detalhada e identificar áreas com praticas de apoio, então considerou-se P máximo.

2.4 Análise de desempenho do modelo

Para verificação da simulação correta dos componentes do balanço hídrico pelo modelo SWAT foi simulada a vazão mensal e comparado com os dados observados da estação Cachoeirão (17280000) (Figura 1) localizada no exutório da bacia. Os dados foram obtidos a partir da base de dados do Hidroweb (ANA, 2016).

Para aumentar a confiabilidade, reduzir as incertezas e erros dos resultados da modelagem procede-se um “aquecimento”, calibração e validação do processo ou variável simulada. Neste trabalho foi utilizado um período de aquecimento de cinco anos (1991-1995), um período de calibração de dez anos (1996-2006) e cinco anos (2007-2011) para o período de validação do modelo.

Para avaliar o desempenho do modelo SWAT foi utilizado o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NS) e sua versão logarítmica (NSlog), a porcentagem BIAS (PBIAS) e a razão entre o erro quadrático médio e o desvio padrão dos dados medidos (RSR), conforme segue:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q}_m)^2} \quad (3)$$

$$NS_{\log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(Q_m) - \log(Q_s))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(Q_m) - \log(\bar{Q}_m))^2} \quad (4)$$

$$P_{BIAS} = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)_i}{\sum_{i=1}^n Q_m} \quad (5)$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}}{\sqrt{\sum_i (Q_m - \bar{Q}_m)^2}} \quad (6)$$

Em que Q_m é vazão observada no dia i ($m^3 s^{-1}$); Q_s é vazão simulada no dia i ($m^3 s^{-1}$); \bar{Q}_m é vazão média observada ($m^3 s^{-1}$); \bar{Q}_s é vazão média dos dados simulados ($m^3 s^{-1}$) e n é número de eventos.

Moriasi et al. (2007) apresentam uma classificação da faixa de valores para o Coeficiente de Nash e Sutcliffe (NS e NSlog) e RSR e a respectiva avaliação do desempenho do modelo SWAT para a escala mensal, como sendo: $0,75 < NS$ o modelo é considerado muito bom; $0,65 < NS \leq 0,75$ o modelo é considerado bom; $0,50 < NS \leq 0,65$ o modelo é considerado satisfatório e $NS \leq 0,5$ o modelo é considerado insatisfatório. : $0,50 < RSR$ muito bom; $0,50 < RSR \leq 0,60$ bom; $0,6 < RSR \leq 0,70$ satisfatório e $RSR > 0,70$ insatisfatório.

Liew et al. (2007) apresentam a seguinte classificação para os intervalos de percentagem: $|PBIAS| < 10\%$, muito bom; $10\% < |PBIAS| < 15\%$, bom; $15\% < |PBIAS| < 25\%$, satisfatório e $|PBIAS| > 25\%$, o modelo é considerado insatisfatório.

Após verificação do desempenho do modelo, foi realizada a espacialização por HRU da produção de sedimentos para bacia, como também a dos fatores que compõem MUSLE. Segundo Irvem et al. (2007) as classes de perda potencial anual de solo ($Mg ha^{-1} ano^{-1}$) são as seguintes: $5 < sed$ é considerado muito baixo; $5 \leq sed < 12$ é considerado baixo; $12 \leq sed < 50$ é considerado moderado; $50 \leq sed < 100$ é considerado grave; $100 \leq sed < 200$ é considerado muito grave e $sed > 200$ é considerado extremamente grave.

3. Resultados e Discussão

Para o uso e ocupação do solo para BATH (Figura 3), foi obtido as seguintes percentagens para cada classe: Agricultura (AGRL) (54,13%), Floresta menos densa (FRSE) (15,50%), Água (WATR) (0,25%) e Floresta (FRST) (30,11%).

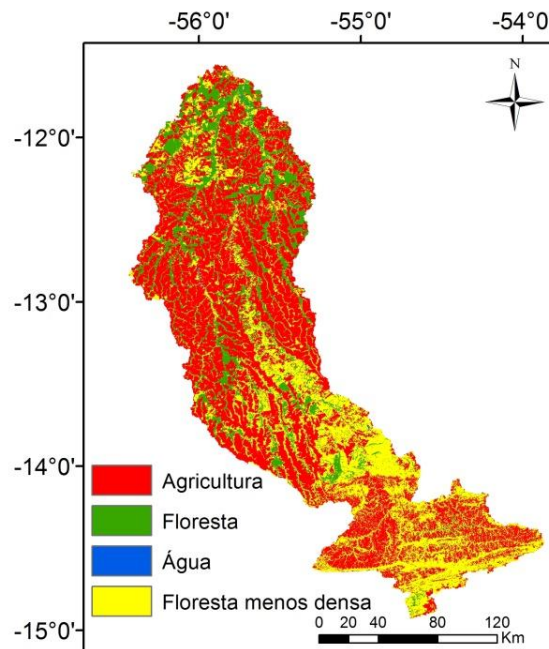


Figura 3. Mapa do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do Alto Teles Pires no cenário de 2014.

Na Figura 4 tem-se o hidrograma da vazão simulada pelo modelo e observada para o período de calibração e validação. Visualmente se observa uma boa simulação por parte do modelo devido à proximidade dos dados observados e simulados para os dois tempos estudados, seguindo ainda a mesma tendência da precipitação.

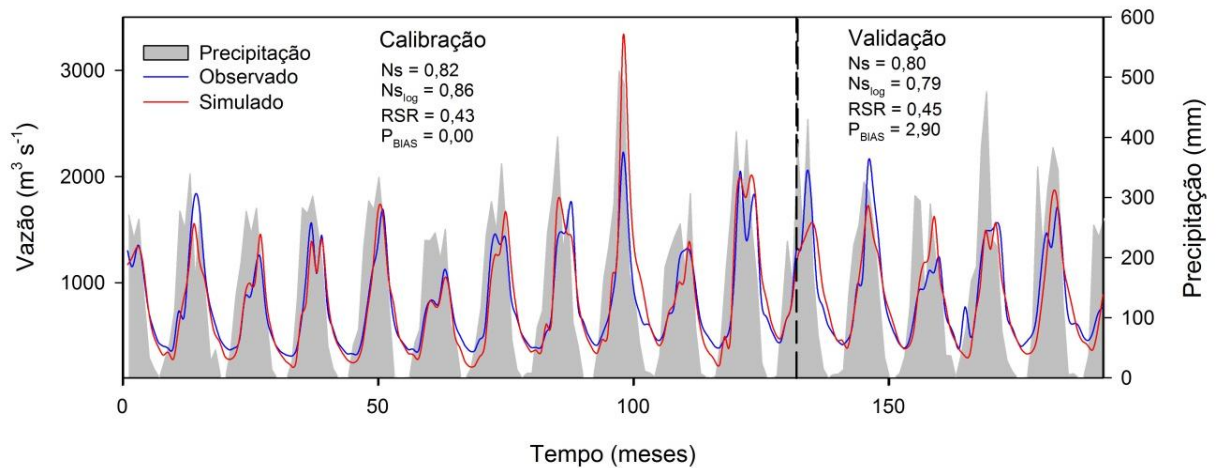


Figura 4. Hidrograma da vazão mensal observada e simulada no período calibração (1996 – 2006) e validação (2007 – 2011) para a estação Cachoeirão na bacia hidrográfica do Alto Teles Pires.

De acordo com os indicadores de desempenho de um modelo (Figura 4), no período de calibração e validação o modelo foi considerado muito bom de acordo com a classificação de Moriasi et al. (2007) e Liew et al. (2007) para os coeficiente NS, NSlog, PBIAS e RSR. Sendo assim o modelo é adequado para verificação das outras variáveis dependentes da precipitação, escoamento e vazão.

Na Figura 5A mostra a relação entre a produção de sedimentos e o escoamento superficial mensal e na Figura 5B a relação entre produção de sedimentos e precipitação mensal. Em ambas as correlações foram altas, obtendo um coeficiente de determinação de 0,94 quando a produção de sedimentos foi relacionada com o escoamento superficial e de 0,91 quando contrastada com a precipitação, mostrando assim que quanto maior for à lâmina precipitada e escoada, maior será o potencial erosivo da mesma.

Todos os ajustes foram significativos ($p < 0.0001$), sendo que o ajuste potencial foi o que a melhor se adequou para as duas correlações. Almeida et al. (2011) analisaram a correlação do potencial erosivo da região de Cuiabá e concluíam que o para se fazer a estimativa do índice de erosividade da chuva a partir de dados fluviométricos, o melhor ajuste é o modelo potencial. O mesmo resultado foi encontrado para os municípios do estado do Mato Grosso de Canarana, Vera, Poxoreó e São José do Rio Claro (Almeida et al., 2012). O melhor ajuste do modelo

potencial, também foi observado para municípios do estado de São Paulo, sendo eles Campinas (Lombardi Neto, 1977), Piracicaba (Pereira 1983), Mococa (Carvalho et al., 1989) e Pirajú (Roque et al., 2001).

Entre os métodos mais utilizados para o traçado da curva-chave sedimentométrica, estão o método do traçado visual e o método da regressão linear, e a relação mais comum é a curva-chave de sedimentos em forma de potência (Carvalho, 2008).

Em climas tropicais e subtropicais a lâmina precipitada é caracterizada de média a alta intensidade, especialmente durante o verão, onde se tem chuvas com alta intensidade e alta erosividade, chamadas de chuvas convectivas (BESKOW et al., 2009) que são altamente relevantes para estudos como este.

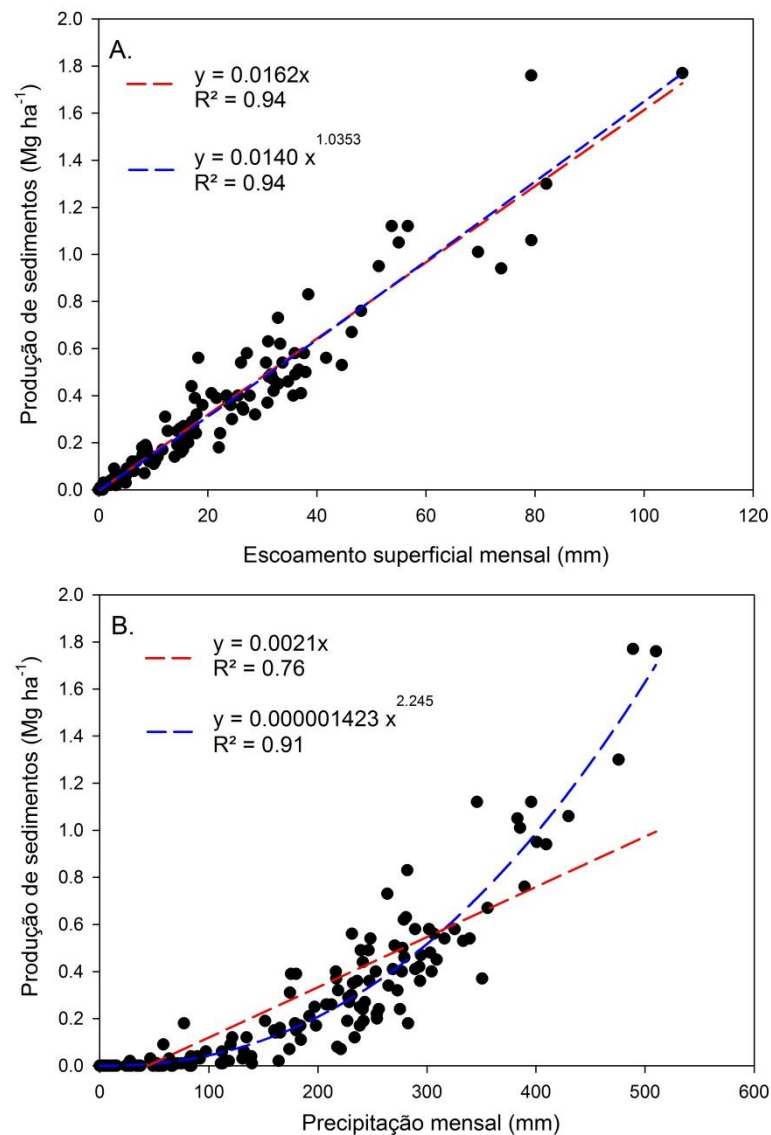


Figura 5. Relação entre a taxa produção de sedimentos simulados e escoamento superficial simulado (1996 – 2011) (A) e entre a taxa de produção de sedimentos simulado e a precipitação mensal (1996 – 2011) (B) para bacia do Alto Teles Pires.

Beskow et al. (2009) fez um ajuste linear correlacionando precipitação anual e transporte de sedimentos na bacia do rio Grande e encontrou um coeficiente de determinação de 0,63. Já Mosbahi et al. (2013) avaliando as perdas de solo para bacia do rio Sarrath, localizada na região noroeste da Tunísia, fez também uma correlação linear entre o escoamento e a perda de solo e encontrou um coeficiente de determinação de 0,84.

A espacialização do fator LS (Figura 6) tem valores variando de 0,46 a 5,22, sendo os maiores valores concentrados na parte sul e noroeste da bacia. A bacia apresenta na sua maior porção valores de LS variando entre 0,46 a 1,98, correspondendo a 97,22% da área da bacia, ou seja, o fator LS não infere/contribui para uma grande perda de solo na bacia, isso devido à bacia não apresentar altas declividades como se pode observar na Figura 2B, que 88,29% da área consiste em declividades menores de 10%.

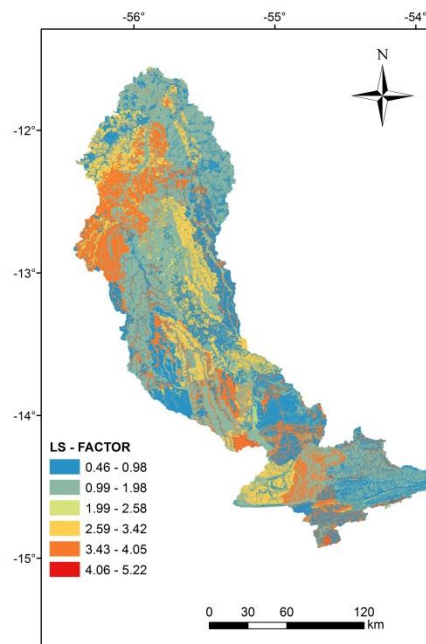


Figura 6. Distribuição do fator topográfico (LS) para a bacia do Alto Teles Pires.

Considerando o mapa da Figura 7, podemos associar alguns aspectos importantes sobre a bacia quanto à susceptibilidade a erosão pela água. A maior parte da área da bacia possui fator K abaixo de $0,030 \text{ Mg ha MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, mas também possui uma grande área susceptível a erosão com valores de K variando entre $0,031$ a $0,150 \text{ Mg ha MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, concentrando na parte central e sul da bacia onde se encontra Neossolos Quartzarenicos (RQ) e Cambissolos (CX) onde estes correspondem a 32.63% da área da BATP.

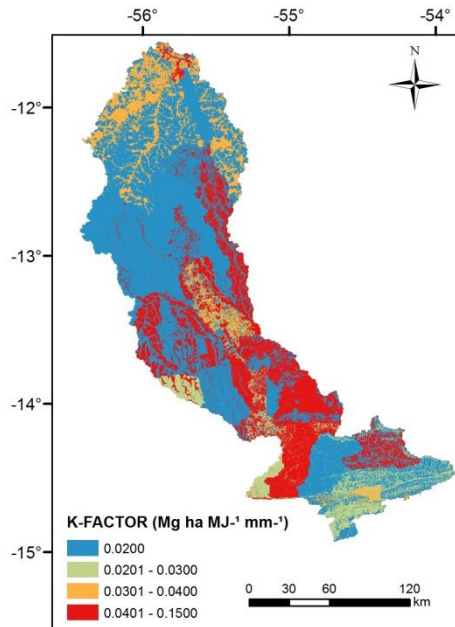


Figura 7. Distribuição do fator de erodibilidade do solo (K) para a bacia do Alto Teles Pires.

O Cambissolo (CX) é um dos solos mais resistentes ao processo de erosão (PAIM e MENEZES, 2009) e apesar disso o fator K apresentou valores altos onde se localiza este tipo de solo na B ATP, sendo dos sete tipos de solo, o quarto que apresenta maior valor do fator K. Já os Neossolos são solos mais susceptíveis a erosão, pois são solos originados de sedimentos arenosos ou arenitos, tem baixa capacidade de retenção de água e baixa fertilidade (MACEDO, 1994; ROSS, 2005; SALAMÃO, 1999) e quando há a ocorrência desta classe de solo em altas declividades, pode ser classificado de moderadamente susceptível a extremamente susceptível (XAVIER et al., 2010)

O escoamento dentro da B ATP variou de 0 a 708,80 mm (Figura 8), sendo que na parte sul, central e pequena parte da região norte da bacia ocorreram os maiores escoamentos, ou seja, superiores a 250,01mm. A maior parte da bacia possui escoamento baixo, variando de 0 a 20,00 mm, principalmente nas áreas onde contem Latossolo vermelho-amarelo (LVA), que são solos com alta porosidade e permeabilidade (SILVA et al., 2005).

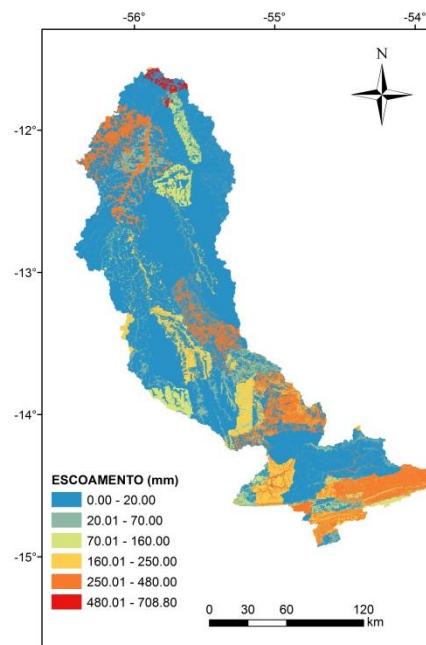


Figura 8. Distribuição do escoamento superficial para a bacia do Alto Teles Pires.

A B ATP não apresenta altas perdas de solos (Figura 9), sendo que a perda de solo média é de $7,74 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e apenas 3,9% da bacia têm perdas de solo superiores a $50,0 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ que são consideradas como grave e não ultrapassando a $140,1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ que no caso seria muito grave segundo a classificação de Irvem et al. (2007). Dentro da bacia não se tem produções de sedimentos acima de $200,0 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, que no caso seriam regiões que apresentariam risco extremamente grave de perda de solo.

Lelis e Calijuri (2010) fizeram a espacialização da perda de solo por sub-bacias utilizando o SWAT para três diferentes cenários originais de uso e ocupação do solo (2006, 2007 e 2008) para bacia hidrográfica do ribeirão São Bartolomeu, localizada na Zona da Mata de Minas Gerais, região Sudeste do Brasil e verificaram que a produção de sedimentos durante os anos de 2006, 2007 e 2008 foram de no máximo 82, 109 e $138 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ respectivamente.

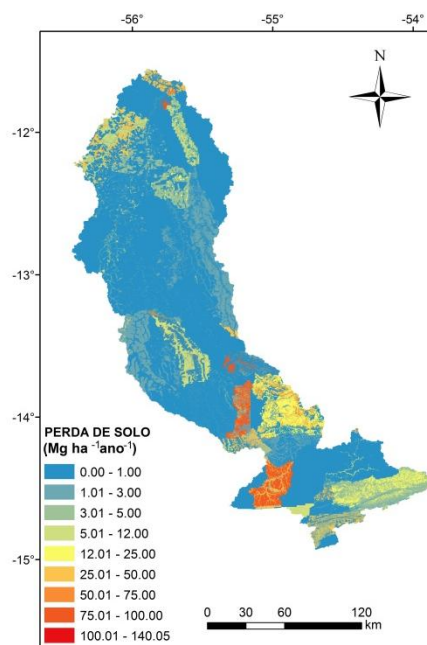


Figura 9. Distribuição da produção de sedimentos para a bacia do Alto Teles Pires.

A maioria da área da bacia (83,04%) tem uma categoria muito baixa de perda de solo que corresponde com uma produção de sedimentos menores que 5 Mg ano⁻¹, seguido por 4,70% da área sob risco de erosão baixa (5 – 12 Mg ha⁻¹ ano⁻¹). As categorias de moderado a muito grave somam 12,26% da área da bacia (Figura 10). Os maiores valores de perda de solo são encontrados na parte sul da bacia, onde consequentemente tem-se maior escoamento superficial, com lâminas variando de 160 a 708.8 mm, que está diretamente ao potencial erosivo da chuva. Na parte mais alta da bacia também se encontra as maiores declividades da bacia, influenciando assim em maiores valor do fator topográfico (LS), sendo estes superiores a 2.59 nas áreas com maiores perdas de solo. O fator de erodibilidade (K) são superiores a 0.0401 Mg ha MJ⁻¹ mm⁻¹, devido a presença de neossolos e cambissolos na região, na qual são solos susceptíveis a erosão. Na parte central da bacia com maior perda de solo, encontra-se em uma área de mata, podendo ser explicado pelo fato de ser adotado P igual a máximo, não identificando as práticas conservacionistas.

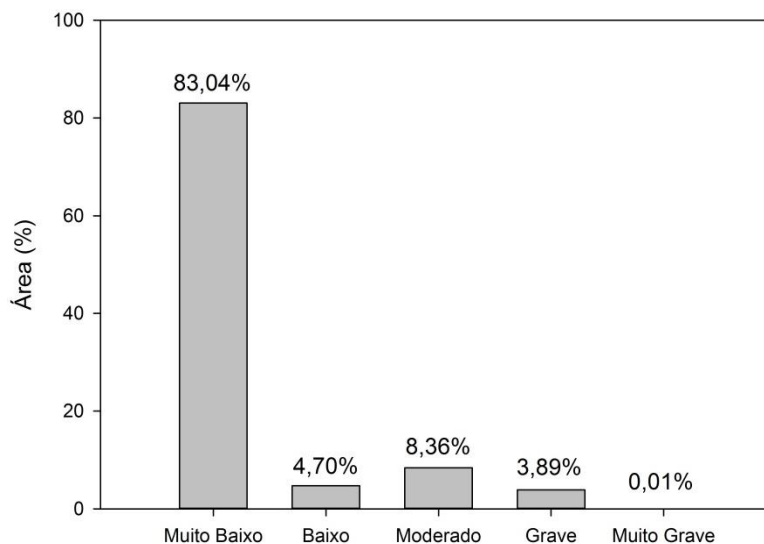


Figura 10. Distribuição das categorias de produção de sedimentos na bacia do Alto Teles Pires.

4. Conclusões

1. O modelo SWAT se mostrou adequado para simulação da vazão mensal na bacia hidrográfica do Alto Teles Pires onde verificou-se que os índices NS, NSlog, PBIAS e RSR apresentaram uma aderência muito boa, permitindo analisar a produção de sedimentos na B ATP.
2. A simulação da produção de sedimentos na B ATP demonstra uma média de $7,74 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.
3. Os mapas indicativos de parâmetros suscetíveis à erosão e o da distribuição da produção de sedimentos para B ATP, indica a averiguação de praticas de gestão para possíveis medidas de conservação para controle da erosão.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a Embrapa Agrossilvipastoril, a Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) por meio do programa de pós-graduação em Agronomia (Campus de Sinop), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT).

6. Referências

ALMEIDA, C. O.; AMORIM, R. S.; COUTO, E. G.; ELTZ, F. L.; BORGES, L. E. Potencial erosivo da chuva de Cuiabá, MT: Distribuição e correlação com a precipitação pluviométrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 178-184, 2011.

ALMEIDA, C. O.; AMORIM, R. S.; ELTZ, F. L.; COUTO, E. G.; JORDANI, S. A. Erosividade da chuva em municípios do Mato Grosso: distribuição sazonal e correlações com dados pluviométricos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 142-152, 2012.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANA - Agência Nacional das Águas. **Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas**. 2016. <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. 15 Abril 2016.

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, p. 69-76, 2013.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I. model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, p. 73-89, 1998.

ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R. **SWRRB - A watershed scale model for soil and water resources management**. In: SINGH, V.P. (ed). Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications, 1995. p.847-908.

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT**. 2005. 132f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente). Universidade Federal de Mato Grosso. Programa de Pós-Graduação em Física e Meio Ambiente, Cuiabá, 2005.

BERTONI, J.; LOMBARD NETO, F.L. **Conservação do solo**. São Paulo. Ed. Ícone, 2005. 5ª ed. p. 355.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; CURI, N.; VIOLA, M. R.; AVANZI, J. C. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. **Catena**, v. 79, n. 1, p. 49-59, 2009.

BRESSIANI, D. D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N. B.; MENDIONDO, E. M. Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 9-35, 2015.

CARVALHO, M. P.; LOMBARDI NETO, F.; VASQUES FILHO, J.; CATANEO, A. Índices de erosividade da chuva correlacionada com as perdas de um Podzólico Vermelho-amarelo eutrófico textura argilosa/muito argilosa de Mococa (SP): Primeira aproximação do fator erodibilidade dos solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.13 p.237-242, 1989.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. 2ªed., ver. atual e ampliada. Rio de Janeiro-RJ. Interciência, 2008.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2009). **Avaliação Ambiental Integrada da Bacia Hidrográfica do Rio Teles Pires**. EPE/CONCREMAT, Brasília/DF.

FIGUEIREDO, M. G. DE; BARROS, A. L. M. DE; GUILHOTO, J. J. M. Relação econômica dos setores agrícolas do Estado do Mato Grosso com os demais setores pertencentes tanto ao Estado quanto ao restante do Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 43, n. 3, p. 557-575, 2005.

IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis). Ministério do Meio Ambiente. (2016) **Parecer Técnico nº 111/210 – COHID/CGENE/DILIC/IBAMA**. Brasília,DF: 10/12/2010. <
[http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%B5es%20A-1%20e%20A-5%20\(Julho%20e%20Dezembro\)%202010/Parecer%20lbama%20n%C2%BA%2011-2010.pdf](http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%B5es%20A-1%20e%20A-5%20(Julho%20e%20Dezembro)%202010/Parecer%20lbama%20n%C2%BA%2011-2010.pdf)>. 2 Agosto 2016.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil 1961 - 1990 - 2016**.

<<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. 15 Abril 2016.

IRVEM, A.; TOPALOGLU, F.; UYGUR, V. Estimating spatial distribution of soil loss over Seyhan River Basin in Turkey. **Journal of Hydrology**. 336, 30-37, 2007.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L. A. Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 5, n. 2, p. 158-174, 2010.

LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: Comparison on USDA agricultural research service watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007.

LIMA, J.; DA SILVA, E. M.; STRAUCH, M.; LORZ, C. Desenvolvimento de base de dados de solos para a aplicação do modelo SWAT em bacia do bioma cerrado. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, v. 17, 2013.

LOMBARDI NETO, F. **Rainfall erosivity - its distribution and relationship with soil loss as Campinas, Brasil**. West Lafayette: Purdue University, 1977. 53p. Dissertação Mestrado

MACEDO, J. Solos dos cerrados. In: PEREIRA, V.P.; FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. (Ed.). **Solos altamente suscetíveis à erosão**. Jaboticabal: FCAV, 1994. p.69-76.

MANNIGEL, A. R.; DE PASSOS, M.; MORETI, D.; DA ROSA MEDEIROS, L. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 24, p. 1335-1340, 2008.

MINGOTI, R.; SPADOTTO, C. A.; MORAES, D. A. C. Determinação de regiões susceptíveis a contaminação da água subterrânea em função de propriedades dos solos no Cerrado brasileiro. 2016. No Prelo.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. W. VAN; BINGER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MOSBAHI, M.; BENABDALLAH, S.; BOUSSEMA, M. R. Assessment of soil erosion risk using SWAT model. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 6, n. 10, p. 4011-4019, 2013.

NETO, J. DE O. M.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; MÉLLO JÚNIOR, A. V. Simulação Hidrológica Escalar com o Modelo SWAT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V. 19 n.1, p. 177-188, 2014.

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.

PEREIRA, H. H. G. **Índice de erosividade de chuvas: distribuição e relações com a precipitação em Piracicaba (SP)**. Piracicaba, ESALQ/USP: 1983. 70p. Dissertação Mestrado

ROQUE, C. G.; CARVALHO, M. P.; PRADO, R. M. Fator erosividade da chuva de Piraju (SP): Distribuição, probabilidade de ocorrência, período de retorno e correlação com o coeficiente de chuva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.147- 156, 2001.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia: Ambiente e Planejamento**. 2005. 8ed. São Paulo: Contexto, (Repensando a Geografia). 85p.

SALOMÃO, F. X. T. Controle e prevenção dos Processos Erosivos. In GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. (orgs) 1999. **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 340p.

SANTOS, H.; JÚNIOR, W. C.; DART, R. O.; ÁGLIO, M. L. D.; SOUZA, J.; PARES, J. G.; OLIVEIRA, A. P. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada - Dados eletrônicos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2011.

SHARPLEY, A.N.; WILLIAMS, J.R. Erosion/productivity impact calculator. Model documentation. Washington, D.C: USDAARS Technical, 1990. 235p. **Bulletin** 1768.

SILVA, A. D.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; LIMA, J. D.; AVANZI, J. C.; FERREIRA, M. M. Perdas de solo, água, nutrientes e carbono orgânico em Cambissolo e Latossolo

sob chuva natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 12, p. 1223-1230, 2005.

USGS – U.S. Geological Survey. **Global Data Explorer**. 2016. <<http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>>. 11 Abril 2016.

VEIGA, A. M.; MELO D. C. R.; SOARES A. K.; TRINDADE M. C.; MELLO T. A.; SOUZA R. M. Diagnóstico das vazões do rio Teles Pires. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 20, 2012, Bento Gonçalves. **Anais...** Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2012.

VOLK, L. B. da S.; COGO, N. P.; STRECK, E. V. Erosão hídrica influenciada por condições físicas de superfície e subsuperfície do solo resultantes do seu manejo, na ausência de cobertura vegetal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 4, p. 763-774, 2004.

WILLIAMS, J. R.; BERNDT, H. D. Determining the universal soil loss equation's length-slope factor for watersheds. In: **A National Conference on Soil Erosion**. 1977. p. 24-26.

XAVIER, F. V.; CUNHA, K. L.; SILVEIRA, A.; DE TAVARES SALOMÃO, F. X. Análise da suscetibilidade à erosão laminar na Bacia do Rio Manso, Chapada dos Guimarães, MT, utilizando sistemas de informações geográficas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 11, n. 2, 2010.

ZAIATZ, A. P. S. R.; ZOLIN, C. A.; PAULINO, J.; VENDRUSCULO, L. G.; LOPES, T. R. Dinâmica do uso e ocupação do solo na sub-bacia do Alto rio Teles Pires no ecótono Cerrado/Amazônia. 2016. No Prelo.

ZOLIN, C. A.; FOLEGATTI, M. V.; MINGOTI, R.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M., PAULINO, J.; GONZÁLES, A. M. G. O. Minimização da erosão em função do tamanho e localização das áreas de floresta no contexto do programa conservador das águas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p. 2157-2166, 2011.