



## XIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

### **SIMULAÇÃO DE VAZÕES EM UMA BACIA DE MÉDIO PORTE NA PORÇÃO DE CERRADO DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO: O CASO DA BACIA DO RIO PRETO**

*Tadeu Mendonça de Novais Teixeira<sup>1</sup>; Felipe Damião Mello di Silva<sup>2</sup> &  
Jorge Enoch Furquim Werneck Lima<sup>3</sup>*

**RESUMO** – Grande parte da vazão que flui pelo rio São Francisco é proveniente do bioma Cerrado, região sob forte pressão em relação a mudanças do uso do solo e que, nos últimos anos, também tem apresentado mudanças em seu regime de chuvas. O objetivo foi avaliar a aplicabilidade do modelo hidrológico SWAT na simulação de vazões em uma bacia de médio porte na porção do bioma Cerrado da bacia do rio São Francisco. Buscando maior base física do modelo, utilizou-se base de dados e parâmetros desenvolvidos/adaptados à região do Cerrado. A série de vazões médias mensais de 1981 a 2000 foi utilizada para calibração do modelo, resultando em índice de Nash-Sutcliffe (NSE) igual a 0,50. A série de 2001 a 2010 foi utilizada para a verificação do modelo, resultando em NSE igual a 0,44. Os resultados indicam que o modelo gerado é apenas “satisfatório”, precisando melhorar, principalmente, nas simulações das fases de recessão das vazões, após os períodos de cheia. Por se tratar de um estudo preliminar, entende-se que os resultados obtidos até o momento são promissores, uma vez que está se buscando manter, na medida do possível, a maior base física possível do modelo gerado.

**ABSTRACT**– A great part of the water that flows through the mouth of the São Francisco River comes from the Brazilian Savanna Biome (Cerrado Biome), a region under pressure due to land use changes and, in recent years, also due to changes in its rainfall patterns. The objective of this article was to evaluate the applicability of the hydrological model SWAT on simulating the streamflow in a medium-sized watershed in the Cerrado biome portion of the São Francisco River Basin. Seeking a higher physical base of the model, database and parameters developed / adapted to the Cerrado region were used. Monthly data from 1981 to 2000 was used for model calibration, resulting in Nash-Sutcliffe index (NSE) of 0.50. Data from 2001 to 2010 was used for model verification, resulting in a NSE equal to 0.44. Results indicate that the generated model is only "satisfactory", still requiring improvement, especially in the simulations of a recession periods after the rainy season. As a preliminary study, it is considered that the obtained results until now are promising, since it is seeking to maintain, as far as possible, the physical basis of the generated model.

**Palavras-Chave** – Modelagem hidrológica, SWAT.

1) Graduando em Eng. Amb. da Univ. de Brasília; SHA Conj.6 Ch.472 Lt. 2B – Águas Claras/DF; (61) 99506-3030; [tadeumnteixeira@gmail.com](mailto:tadeumnteixeira@gmail.com).

2) Mestrando em Geografia da Universidade de Brasília – UnB. [felippedamiao@hotmail.com](mailto:felippedamiao@hotmail.com).

3) Pesquisador em Hidrologia da Embrapa Cerrados. [jorge.werneck-lima@embrapa.br](mailto:jorge.werneck-lima@embrapa.br).

## INTRODUÇÃO

O bioma Cerrado ocupa cerca de 50% da área total da bacia do rio São Francisco, estando presente em sua porção mais alta e respondendo por mais de 90% da vazão que passa em sua foz (Lima et al., 2007). Região de intensa mudança do uso do solo desde a década de 60, nos últimos anos, alterações no regime de chuvas em parte do Cerrado (Borges et al. 2014) têm gerado impacto significativo nas vazões ao longo do rio São Francisco, o que se comprova pelo fato de os reservatórios das UHEs Três Marias e Sobradinho terem recentemente alcançado seus menores níveis históricos de armazenamento de água, cerca de 1% de seus respectivos volumes úteis.

Diante do exposto, torna-se cada vez mais importante para a gestão dos recursos hídricos desta bacia uma melhor compreensão dos processos hidrológicos a que está submetida em suas diferentes regiões, assim como dos impactos que podem ser gerados pelas mudanças do uso do solo e/ou do clima, o que pode ser obtido por meio de modelos hidrológicos.

Este trabalho tem como objetivo a aplicação do modelo SWAT para a simulação de vazões em uma bacia de médio porte na porção do bioma Cerrado da bacia do rio São Francisco.

## 1. MATERIAL E MÉTODOS

### 1.1. Área de Estudo

A bacia hidrográfica do Rio Preto (10.310 km<sup>2</sup>) está compreendida na bacia do Rio Paracatu, que por sua vez pertence à bacia do São Francisco abrangendo parte do Distrito Federal e dos Estados de Goiás e Minas Gerais (Figura 1).



Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do Rio Preto.

O clima da área é tropical, onde as variações térmicas são pequenas, com o regime pluviométrico caracterizado por máximos no verão e mínimos no inverno. A precipitação varia de 1.000 mm a 1.600 mm, e estão concentradas nos meses de outubro a abril.

Historicamente a ocupação territorial da bacia do Rio Preto tem sido reservada para a implementação da agropecuária (Frota, 2006). A qual ocupa principalmente as áreas planas, que estão localizadas na porção superior e inferior da bacia, com o cultivo de grãos como feijão, soja, milho, sorgo, algodão, cítricos, café e criação de gado, aves, suínos dentre outros usos. A prática da irrigação é bastante utilizada na bacia, que também tem suas águas utilizadas para a geração de energia, onde se destaca a UHE Queimado. Na bacia, as áreas preservadas estão localizadas: nas porções mais íngremes do relevo, onde existem limitações para a produção em grande escala, como ocorre na região conhecida como Cristas de Unaí, e no Campo de Treinamento do Exército Brasileiro, no município de Formosa – GO.

## **1.2. Modelo SWAT**

O modelo hidrológico SWAT é capaz de analisar uma série de informações sobre as características físicas de uma dada região, como topografia, cobertura e tipologia dos solos e séries históricas de precipitação, e fornecer estimativas de diferentes processos hidrológicos ao longo do tempo, dentre os quais, os escoamentos superficial e de base, a recarga profunda e da taxa de evapotranspiração.

A metodologia proposta para o referido trabalho foi dividida em quatro etapas sequenciais: coleta e organização dos dados de entrada, processamento no SWAT, calibração no SWAT-CUP e validação no SWAT.

## **1.3. Entrada de Dados**

Inicialmente, foram coletadas informações básicas para a entrada de dados, a saber: Modelo Digital de Elevação (MDE), mapa de uso e cobertura do solo, mapa de classes do solo, séries históricas de precipitação, radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa, temperaturas máximas e mínimas do ar e vazão do exutório da bacia considerada.

O banco de dados original (*default*) do SWAT contém várias das principais classes de solo e uso e cobertura encontradas nos Estados Unidos, as quais na, maioria das vezes, não possuem qualquer similaridade com aquelas encontradas no Bioma Cerrado. Desse modo, em relação aos solos, foram utilizados os dados apresentados por Lima et al. (2013), que desenvolveram base de dados de solos específica para a aplicação do modelo SWAT no Bioma Cerrado. Quanto aos parâmetros relacionados ao uso e cobertura dos solos do Cerrado, foi utilizado o banco de dados compilados por Ferrigo (2014), desenvolvido com base na literatura.

As imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) utilizadas no trabalho foram disponibilizadas pelo website do *United States Geological Survey* (USGS). Para abranger toda a área da bacia do Rio Preto, foram necessárias 4 folhas de 30 metros de resolução espacial cada para compor o mosaico. A Figura 2.a apresenta o recorte da imagem SRTM para a bacia.

Foi utilizado o mapa de uso e cobertura do solo do *TerraClass*, projeto desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em parceria com a Embrapa, o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis (IBAMA), a Universidade Federal de Goiás (UFG) e a Universidade Federal de Uberlândia (UFU), sob coordenação do Ministério do Meio Ambiente. Com resolução espacial de 6,25 hectares, o mapa disponibilizado no *TerraClass* apresenta doze classes de uso e cobertura do solo, sendo elas agricultura anual e perene, água (corpos hídricos), mineração, mosaico de ocupações, não observado, natural, pastagem, silvicultura, solo exposto e urbano. O mapa (Figura 2.b) apresenta escala de 1:250.000 e é disponibilizado pelos sites do INPE e do Sistema de Observação e Monitoramento da Agricultura no Brasil (SOMA).

O mapa de tipos de solo utilizado, por sua vez, foi elaborado pela Diretoria de Geociências do IBGE em parceria com a Embrapa, com base nos levantamentos de solos desenvolvidos pelo Projeto RADAMBRASIL. O mapa foi produzido na escala de 1:5.000.000. No recorte da área analisada (Figura 2.c), foi verificado a presença de cinco classes de solos. Contudo, em decorrência da indisponibilidade de dados quanto a duas das classes de solos, foram propostas algumas considerações. Os solos tipo FF (Plintossolo Pítrico Concrecion) e RL (Neossolo Lítico Distrífico), que representam uma parcela da área da bacia, não foram catalogados no banco de dados utilizado neste trabalho e, desse modo, foram substituídos por FX (Plintossolo Híptico Distrífico) e o RQ (Neossolo Quartzarênico Hidromórfico), respectivamente.

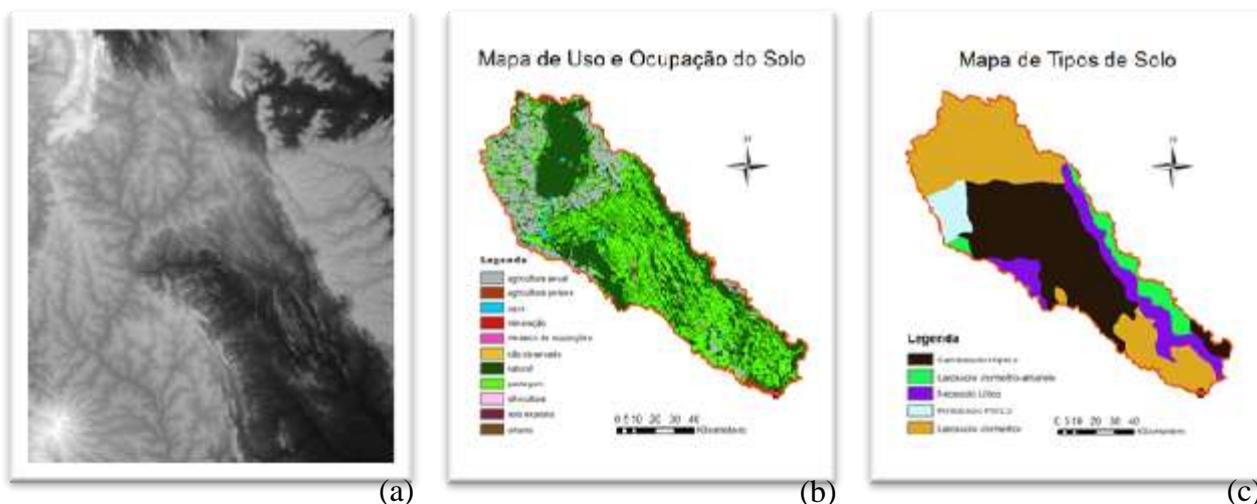


Figura 2 – (a) Modelo Digital de Elevação do Terreno; (b) Mapa de uso e ocupação do solo; (c) Mapa de tipos de solo.

As séries históricas de dados climáticos referentes à precipitação, radiação solar incidente, temperaturas máxima e mínima, umidade relativa e velocidade média do vento, todos com frequência diária, compreenderam o período de janeiro de 1981 a novembro de 2010. Os dados foram provenientes da estação climatológica de Unaí (cód. 83428), da rede do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (Figura 3).

Em razão da disponibilidade e da qualidade dos dados fluviométricos da bacia, neste estudo foi efetuada a simulação das vazões na Estação Unaí (cód. 42490000), com 5.360 km<sup>2</sup>, englobando aproximadamente metade da área total da bacia do Rio Preto (Figura 3).

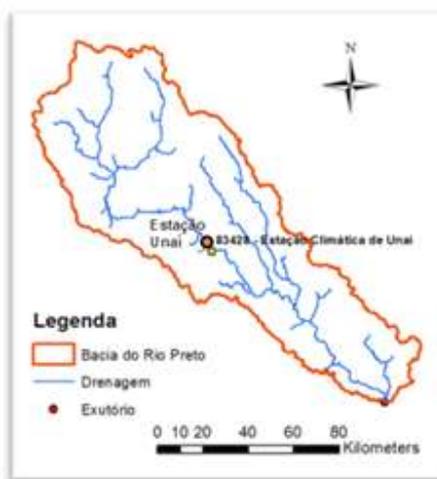


Figura 3 – Localização das estações climática e fluviométrica de Unaí, na bacia do Rio Preto.

Os dados de vazão média mensal foram obtidos da base de dados HIDRO, sob gestão da Agência Nacional de Águas (ANA), disponível no site HIDROWEB. Todos os dados utilizados passaram por análise de consistência para a eliminação de erros grosseiros na série histórica de vazões da estação.

Para que fossem inseridos no software, os dados foram organizados conforme especificações do manual do SWAT.

#### 1.4. Processamento no SWAT

A primeira etapa desenvolvida no SWAT consistiu na utilização do Modelo Digital de Elevação do terreno que compreende a área em estudo para que sejam definidas as sub-bacias. Com base nas informações topográficas da imagem Raster, o SWAT determinou o traçado das sub-bacias considerando uma área de acumulação de fluxo de 1.000 hectares. Este valor foi escolhido pela estimativa da área necessária para produzir um fluxo contínuo, evitando assim o desenvolvimento de drenagens secas na simulação.

Ao final desta etapa foram criadas as subdivisões da bacia hidrográfica, apresentando as especificações quanto a possível drenagem, bem como o caminho mais longo percorrido pela água em relação ao exutório de cada sub-bacia.

Na etapa seguinte de definição das Unidades de Resposta Hidrológica (*Hydrologic Response Units* - HRU) foram utilizados os mapas de uso e cobertura e tipo de solos apresentados anteriormente, bem como o mapa de declividade gerado pelo próprio SWAT, com base em especificações de classes propostas pelo usuário. Neste caso, o mapa de declividade foi proposto com 5 classes: 0-2, 2-5, 5-10, 10-20 e >20%. A escolha dos intervalos das classes levou em consideração o perfil topográfico do terreno, o qual dispunha de extensas regiões com relevo suave. Ao final do processo, o usuário acionou o comando de sobreposição das três camadas para a determinação de polígonos com mesmas características de uso e ocupação/solo/declividade.

O conceito de HRU implica na não interação entre as diferentes unidades em uma dada sub-bacia. Com base nessa afirmativa, percebe-se que as cargas de escoamento, sedimentos, nutrientes etc., em cada HRU são determinadas de modo independente e, apenas após esse processo, todas elas são somadas para a produção das cargas totais da sub-bacia. Neste contexto, a principal vantagem no uso de HRUs é o aumento da precisão nas estimativas de cargas (Arnold *et al.*, 2012 *apud* Ferrigo, 2014).

Para a definição das HRUs é necessário que se considere um limite mínimo de área da característica, seja ela de tipo do solo, uso e cobertura ou tamanho de sub-bacia, para que as frações menores que esses valores mínimos sejam anexadas às frações maiores mais próximas. Isso evita que áreas muito pequenas sejam consideradas na definição das HRUs, o que implicaria em uma grande quantidade de combinações únicas. Desse modo, o número total de HRUs bem como o tempo de processamento requerido pelas simulações seriam significativamente reduzidos. Para este projeto, foram propostos os limites de anexação das áreas de 20% da área de uso e cobertura sobre a área da sub-bacia; 0% do tipo de solo sobre as áreas de uso e cobertura; e 20% da classe de declividade sobre área de solo. Os valores foram propostos com base no nível de detalhamento dos mapas, superior para os mapas de uso e cobertura e reduzido para o de tipos de solo.

Continuando a sequência, foi necessário que o usuário forneça os dados climáticos diários de precipitação, radiação solar, temperatura, umidade relativa e velocidade média do vento da estação climatológica de Unai.

Finalmente, com todas as informações inseridas, foi executado uma simulação no SWAT para o período correspondente a série histórica de dados climáticos definido anteriormente. Foi considerado um período de aquecimento (*warm up*) de 3 anos para a simulação.

## 1.5. Calibração no SWAT-CUP

Finalizada a simulação inicial no SWAT, efetuou-se a calibração automática do modelo utilizando a ferramenta SWAT-CUP. Para tanto, o arquivo TxtInOut (localizado na pasta *Scenarios*), produzido na etapa anterior, é utilizado como base para a execução desta etapa. Esse arquivo contém todas as informações referentes as características da bacia gerado na primeira simulação, ou seja, sem calibração. Para esta etapa, foi considerado o período de medições de vazão entre janeiro de 1981 a dezembro de 2000.

O método de calibração utilizado foi o *Sequential Uncertainty Fitting* (Sufi2), comumente empregado nesse tipo de calibração de dados hidrológicos.

O passo seguinte foi estabelecer os parâmetros a serem utilizados no processo de calibração. Para tanto, a análise de sensibilidade foi realizada com parâmetros que o modelo utiliza nos cálculos de estimativa de vazão de forma direta ou indireta, permitindo identificar quais parâmetros tem maior influência na produção do escoamento. Desse modo, foram propostos os parâmetros apresentados na Tabela 1, com seus respectivos intervalos possíveis propostos para a análise da bacia.

Tabela 1 – Lista de parâmetros utilizados na simulação

Parâmetro	Definição	Extensão	Método	Intervalo utilizado	
				Mínimo	Máximo
CN2	Valor inicial de SCS curva número para condição de umidade II. A curva SCS é função das características de permeabilidade do solo, uso e cobertura e condições prévias de umidade no solo. Desse modo, as condições de deflúvio são dependentes do CN. (adimens.)	.mgt	Relativo	-0.5	0.2
ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base. Representa um índice direto da resposta do fluxo subterrâneo à variações na recarga. Valores elevados indicam maiores recargas do aquífero e menor fluxo de base. (adimens.)	.gw	Substituição	0	0.2
GW_DELAY	Tempo de retardo do fluxo subterrâneo. Intervalo de tempo para a recarga do aquífero. Dependente da formação geológica do solo. Os valores são inversamente proporcionais à taxa de recarga do aquífero. (dias)	.gw	Substituição	30	180
GWQMN	Profundidade limite da água no aquífero raso necessária para que o fluxo de retorno ocorra. Quanto maior o valor desse parâmetro, maiores parcelas do fluxo de base são retardadas. (mm H2O)	.gw	Substituição	0	6000
ESCO	Fator de compensação da evaporação no solo. Representa um percentual da capacidade de evaporação na camada superior do solo. Valores elevados significam altas taxas de evaporação. (adimens.)	.bsn	Substituição	0.8	1
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo. Utilizado para o cálculo do tempo de percolação da água no solo. (mm H2O/mm solo)	.sol	Substituição	0	0.22
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo. Relaciona a densidade do fluxo e o gradiente hidráulico. Representa uma medida da facilidade com que a água se movimenta pelo solo. (mm/hr)	.sol	Substituição	0	3000
CANMX	Capacidade máxima de armazenamento de água da cobertura formada pela vegetação. Influencia no escoamento superficial e na evaporação. (mm H2O)	.hru	Absoluto	0	20

## 1.6. Verificação do modelo SWAT

O conjunto de parâmetros ótimos produzidos pelo SWAT-CUP foi inserido no SWAT pela função *Manual Calibration Helper*. Cada parâmetro foi agregado de uma maneira, multiplicado ou substituído pelo valor inicial do parâmetro contido no banco de dados utilizado na simulação inicial, sem calibração. Em seguida foi feita uma nova simulação no SWAT para o período de verificação, que se estendeu de janeiro de 2001 a novembro 2010.

## 1.7. Análises Estatísticas

Para os períodos de calibração e verificação do modelo foram utilizados os indicadores estatísticos Nash-Sutcliffe (NSE), Porcentagem BIAS (PBIAS) e razão de desvio padrão (*Standard Deviation Ratio – RSR*).

O NSE varia entre - infinito a 1, onde valores mais próximos a 1 indicam uma melhor correlação dos valores. Moriasi *et al.* (2007) recomenda o uso desse indicador na avaliação de simulações de séries temporais, apresentando também um classificação dos resultados obtidos.

O PBIAS, por sua vez, avalia a tendência média dos valores simulados em ser maiores ou menores que os valores observados. Valores próximos à zero (0), tanto positivos quanto negativos, indicam boa acurácia da simulação. Resultados positivos indicam valores subestimados, enquanto negativos indicam valores superestimados (Gupta *et al.*, 1999).

O RSR, padronização do *Root Mean Square Error* (RMSE), varia entre o valor ótimo zero (0), o qual representa variação residual nula e, portanto, o resultado da simulação apresenta valores exatamente iguais aos observados, até grandes valores positivos (Moriasi *et al.*, 2007)

## 2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4 são apresentados os resultados obtidos na fase de calibração do modelo SWAT para a simulação da série de vazões observadas no Rio Preto, no local da Estação Unai.

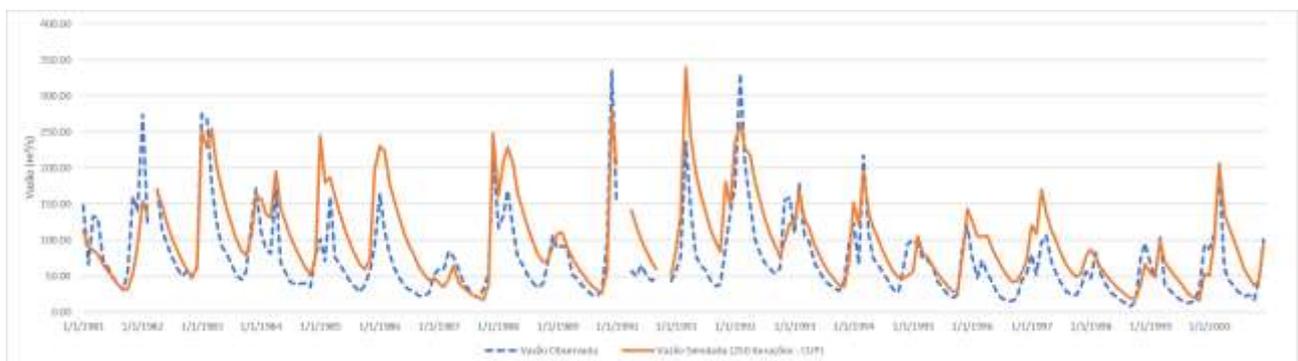


Figura 4 – Comparação entre as vazões observada e simulada pelo modelo SWAT no Rio Preto, no local da Estação Unai, para o período de calibração (1/1/1981 a 1/12/2000).

Como se observa na Figura 4, os resultados simulados representam bem a série de vazões médias mensais observadas, no entanto, verifica-se um retardamento sistemático na fase de recessão das vazões.

Na Tabela 2 é apresentado o conjunto de parâmetros considerados no processo de calibração, bem como os valores ótimos resultantes.

Tabela 2 – Conjunto de parâmetros e índices para obtenção de seus valores ótimos resultantes da etapa de calibração.

Parâmetro	Valor
r_CN2.mgt	-0.369800
v_ALPHA_BF.gw	0.076400
v_GW_DELAY.gw	169.500000
v_ESCO.bsn	0.998000
v_GWQMN.gw	2844.000000
v_SOL_AWC().sol	0.202840
v_SOL_K().sol	66.000000
a_CANMX.hru	10.440000

r=multiplica; v=substitui; e a=adiciona.

Na Figura 5 são apresentados os resultados obtidos na fase de verificação do modelo SWAT calibrado para a simulação da série de vazões observadas no Rio Preto, no local da Estação Unai.

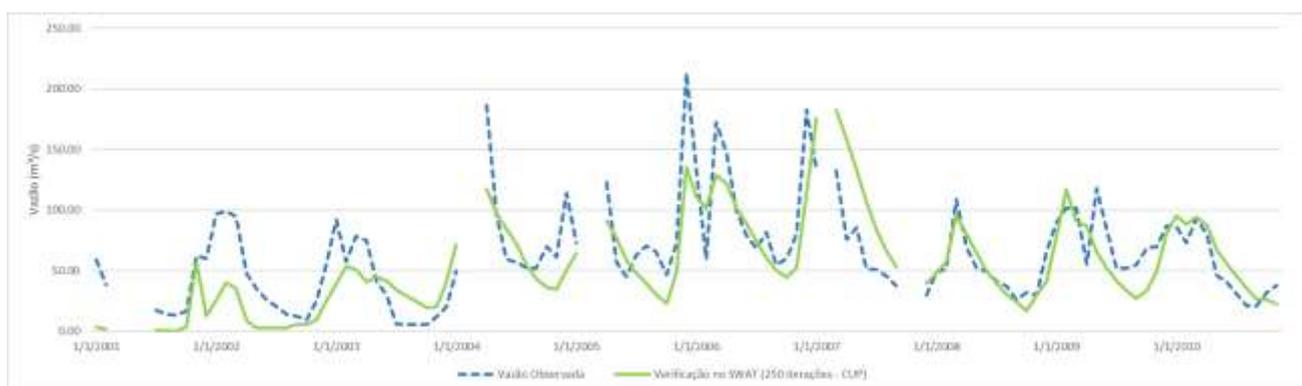


Figura 5 - Comparação entre as vazões observada e simulada pelo modelo SWAT no Rio Preto, no local da Estação Unai, para o período de verificação (1/1/2001 a 11/1/2010)

Na Tabela 3 são apresentados os valores dos indicadores estatísticos utilizados na avaliação dos resultados das simulações nas fases de calibração e verificação.

Tabela 3 – Valores dos indicadores estatísticos para os períodos de calibração e validação

Etapa	NSE	PBIAS	RSR
Calibração	0,50	-33,01	0,71
Validação	0,44	12,52	0,75

Analisando os indicadores apresentados na Tabela 3 segundo a classificação de Moriasi et al. (2007), tem-se que os resultados estão no limiar entre “satisfatório” e “insatisfatório”.

### 3. CONCLUSÕES

Os resultados indicam que o modelo gerado é satisfatório, no entanto, ainda é necessário melhorar, principalmente, a simulação da fase de recessão das vazões, após os períodos de cheia.

Por se tratar de um estudo preliminar, entende-se que os resultados obtidos até o momento são promissores.

### 4. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Fundo Clima/MMA, pelo financiamento do Projeto Chuva-Vazão; ao CNPq pelo financiamento do Projeto SWAT–Cerrado; à FINEP/CT-Hidro, pelo financiamento do Projeto REHIDRO – Rede Nacional de Bacias Experimentais e Representativas; à Embrapa, pelo financiamento dos Projetos EcoValoração, GeoCerrado e AgroHidro; e à Agência Nacional de Águas – ANA e à Universidade de Brasília, pela parceria neste trabalho em áreas do Cerrado.

### BIBLIOGRAFIA

BORGES, P.A.; FRANKE, J.; SILVA, R.D.S.; WEISS, H.; BERNHOFER, C. (2014). Differences between two climatological periods (2001-2010 vs. 1971-200) and trend analysis of temperature and precipitation in Central Brazil. *Theor. Appl. Climatol.*, 116: 191-202.

FERRIGO, S. (2014). *“Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática - Estudo de caso da bacia do lago Descoberto - DF.”* Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-159/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 164p.

LIMA, J.E.F.W.; SILVA, E.M.; STRAUCH, M.; LORZ, C. (2013). Desenvolvimento de base de dados de solos para a aplicação do modelo SWAT em bacia do Bioma Cerrado. In: *Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves: ABRH.* p. 1-8.

MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. (2007). *“Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.”* *Soil & Water Division of ASABE*, Vol. 50(30) pp. 885-900.