OPEN JOURNAL SYSTEMS
ISSN:2237-2202

Available on line at Directory of Open Access Journals
Journal of Hyperspectral Remote Sensing v.9, n.5 (2019) 254-268

www.periodicos.ufpe.br/revistas/jhrs

Journal of Hyperspectral Remote Sensing
www.ufpe.br/jhrs

Application of SWAT model to estimate evapotranspiration in the catchment area of river Piranhas-Açu in the state of Rio Grande do Norte

Mariana da S. de Siqueira[*], Madson T. Silva[**], Antônia S. de Andrade[***], Santana L. de Lima[***], Welinagila G. de Sousa[***], Rafaela R. Barbosa[***]

[*]Bolsista de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande-UFCG. E-mail: siqueira.s.mariana@gmail.com (autor correspondente)
[**]Professor Doutor da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas-UACA, UFCG. E-mail: madson.geotech@gmail.com.
[***]Bolsistas de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, UFCG. E-mails: silaniaandrade21@gmail.com, livialima24s@gmail.com,welinagilagrangeiro@gmail.com, ribeirorbeng@gmail.com.

Received 21 August 2019; accepted 30 October 2019

Abstract

The modeling has stood out for allowing the prediction of the functioning of several natural systems including watersheds, emerging as an alternative to obtain ET evapotranspiration estimates. The present work aimed to evaluate the performance of the SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) hydrological model, in the simulation of the ET for the Piranhas-Açu river basin (BHRPA), in the Rio Grande do Norte stretch, in the absence of calibration. The basin area information used in the simulation is for topography, using the Digital Elevation Model (MDE) provided by EMBRAPA, *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) weather data available from *Global Weather Data for SWAT*, soil classes and characteristics of use and occupation obtained from the Soil and Land Cover and Land Use Maps of Brazil acquired from the Brazilian Institute of Geography and Statistics-IBGE. To comparation the results of the hydrological simulation, the ET through the water balance (BH) was calculated for locations within the study area. The Nash and Sutcliffe (NSE) coefficient values ranged from satisfactory (0.61) to very good (0.82), from the performance index (c) from good (0.67) to very good (0.81), for all locations a strong correlation index (r) was obtained. The ME and Pbias statistical indices show an underestimation of the simulated ET compared to the calculated one. It was found that the SWAT model used without calibration presented a good performance to simulate ET for BHRPA.
Keywords: hydrological modeling, semiarid, estimation, validation.

Aplicação do modelo SWAT na estimativa da evapotranspiração na bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu no estado do Rio Grande do Norte

Resumo

A modelagem tem se destacado por possibilitar a realização da predição de funcionamento de diversos sistemas naturais incluindo bacias hidrográficas, surgindo como uma alternativa para obtenção de estimativas da evapotranspiração ET. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho do modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), na simulação da ET para a bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu (BHRPA), trecho do Rio Grande do Norte, diante da ausência de calibração. As informações para área da bacia utilizadas na simulação são referentes a topografia, com a utilização do Modelo Digital de Elevação (MDE) disponibilizado pela EMBRAPA, dados climatológicos do *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) disponíveis no *Global Weather Data for SWAT*, classes de solos e características de uso e ocupação obtidas a partir dos Mapas de Solos e de Cobertura e uso da Terra do Brasil adquiridos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. Para comparação dos resultados da simulação hidrológica foi calculada a ET por meio do balanço hídrico (BH) para localidades inseridas na área de estudo. Os valores do coeficiente de Nash e Sutcliffe (NSE) variaram de satisfatório (0,61) a muito bom (0,82), do índice de desempenho (c) de bom (0,67) a muito bom (0,81), para todas as localidades foi obtido índice de correlação (r) forte. Os índices estatísticos EM e Pbias evidenciam subestimativa da ET simulada em relação a calculada. Constatou-se que o modelo SWAT utilizado sem calibração apresentou um bom desempenho para simulação da ET para BHRPA.
Palavras-Chave: modelagem hidrológica, semiárido, estimativa, validação.

1. Introdução

A evapotranspiração é definida como um elemento climatológico fundamental, que corresponde ao processo oposto da chuva e também expressa na mesma unidade em milímetros (Pereira et al., 1997). A energia solar e a disponibilidade de água são condições necessárias para sustentar a evapotranspiração (Allen et al., 1998). Além ser influenciada por vários fatores do clima local é afetada por as condições da superfície terrestre (Zhang et al., 2009). Como principal responsável pela perda de água nas bacias hidrográficas, exerce uma grande influência sobre os processos hidrológicos, estando estreitamente relacionada com a dinâmica da umidade do solo, a recarga dos aquíferos e o escoamento superficial (Liang et al., 2010). Avaliar a influência dos fatores climáticos na evapotranspiração favorece o entendimento dos impactos das alterações climáticas nos processos hidrológicos (Zhang et al., 2011).

Diversos problemas são enfrentados para a realização de estudos que tratam da quantificação da evapotranspiração (ET) em unidades experimentais, como as dificuldades de monitoramento, a variabilidade espacial e temporal das variáveis que afetam o processo e os custos das coletas dos dados terrestres em longo prazo, além da falta de recursos humanos para a coleta e tratamento dos dados (Lima et al., 2001). A modelagem tem se destacado por possibilitar a realização da predição de funcionamento de diversos sistemas naturais incluindo as bacias hidrográficas. Os modelos distribuídos de base física vêm sendo amplamente utilizados em estudos de avaliação do comportamento e impactos das mudanças do uso do solo e suas influências nos processos de perdas de água e de solo como: escoamentos superficial e subterrâneo, desprendimento, transporte e deposição de sedimentos em bacias hidrográficas (Silva e Santos, 2008).

Os modelos matemáticos são ferramentas muito importantes e úteis para diagnóstico e previsão ou simulação de processos hidrológicos e sedimentológicos (Srinivasan et al., 2003). Dentre os modelos aplicados para modelagem ambiental, o "Soil and Water Assessment Tool" (SWAT) destaca-se o SWAT, utilizado com sucesso na simulação do escoamento, das cargas de sedimentos e da qualidade da água de pequenas bacias hidrográficas, apresentando-se em grande destaque, com seu uso em ampla ascensão em todo o mundo (Tripathi et al., 2003; Lelis e Calijuri, 2010; Carvalho Neto, 2011).

O modelo SWAT, desenvolvido com o objetivo de avaliar o efeito do uso do solo no escoamento superficial, no transporte de sedimento e na qualidade da água em bacias hidrográficas, tem se destacado por ser uma ferramenta eficaz capaz de simular processos hidrológicos, transporte de contaminantes, processos de perdas de água e de solo, e para avaliar o comportamento e os efeitos de mudanças climáticas, mudança no uso da terra e práticas de gestão dos recursos hídricos em diferentes condições ambientais (Abbaspour et al., 2015; Brighenti et al., 2016). É um modelo matemático de simulação hidrológica hidrossedimentológica, de base física, distribuído, considerando assim a variabilidade espacial, conceitual e empírico capaz de representar processos físicos ocorrentes em bacias hidrográficas, utilizado em diversas partes do mundo, pois permite diagnosticar e prever impactos gerados por alterações de uso e ocupação do solo no meio urbano e rural (Carvalho Neto et al., 2011). Para o Nordeste Brasileiro, entre outros, destacam-se os trabalhos de Carvalho Neto (2011), Taveira (2012), Alcântara (2013), Silva (2014), Silva et al. (2015), Silva et al. (2016), Silva et al. (2017) e Silva et al. (2018).

Dentre estudos realizados para avaliação da aplicabilidade do modelo SWAT no Brasil que consideraram a simulação do processo de evapotranspiração real, destacam-se os trabalhos de Salles (2012) para a bacia hidrográfica do Ribeirão Pipiripau, região hidrográfica do Paraná; de Castro, (2013) na bacia do Alto Rio Jardim, porção sudeste do Distrito Federal (Bacia experimental), uma bacia agrícola típica do bioma cerrado; de Santos et al. (2018) para analisar o balanço hídrico da sub-bacia do rio Arapepó, no Estado do Pará; de Melo Neto (2013), em que o modelo SWAT foi aplicado a bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguara e a microbacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, localizadas no sul de Minas Gerais, considerando diferentes discretizações quanto ao número de sub-bacias e número de camadas do perfil do solo; e de Carvalho Neto (2011) em duas unidades experimentais e em toda área da Bacia do Riacho dos Namorados no Cariri Paraibano.

A utilização dessa ferramenta de simulação surge como uma alternativa para obtenção de estimativas da evapotranspiração em escala local e regional, auxiliando na geração de informações não comumente disponíveis, importantes para estudos sobre sua dinâmica e comportamento, bem como para o processo de tomada de decisões, com intuito de gerenciamento e planejamento de recursos hídricos. O

presente trabalho visa a aplicação do modelo hidrossedimentológico SWAT para obtenção de estimativas mensais da evapotranspiração real diante da ausência da calibração de parâmetros de sensibilidade para uma bacia hidrográfica no semiárido do Nordeste brasileiro (NEB).

2. Material e métodos

Descrição da área de estudo

Localização

A bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu encontra-se localizada na região semiárida do Nordeste brasileiro, entre as latitudes -7°52'14'' e -5°25'17'' e entre as longitudes -38°47'32,6'' e -36°8'4,6'', seu território divide-se entre os Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte. A bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu é a maior unidade da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental, com área total de drenagem de 43.6831,50 km², equivalente a 15% da sua área total (ANA, 2016, 2018). A área da bacia inserida no Estado do Rio Grande do Norte (BHRPA) (Figura 1) foi selecionada para avaliação do desempenho do modelo hidrológico (SWAT) na simulação da evapotranspiração.

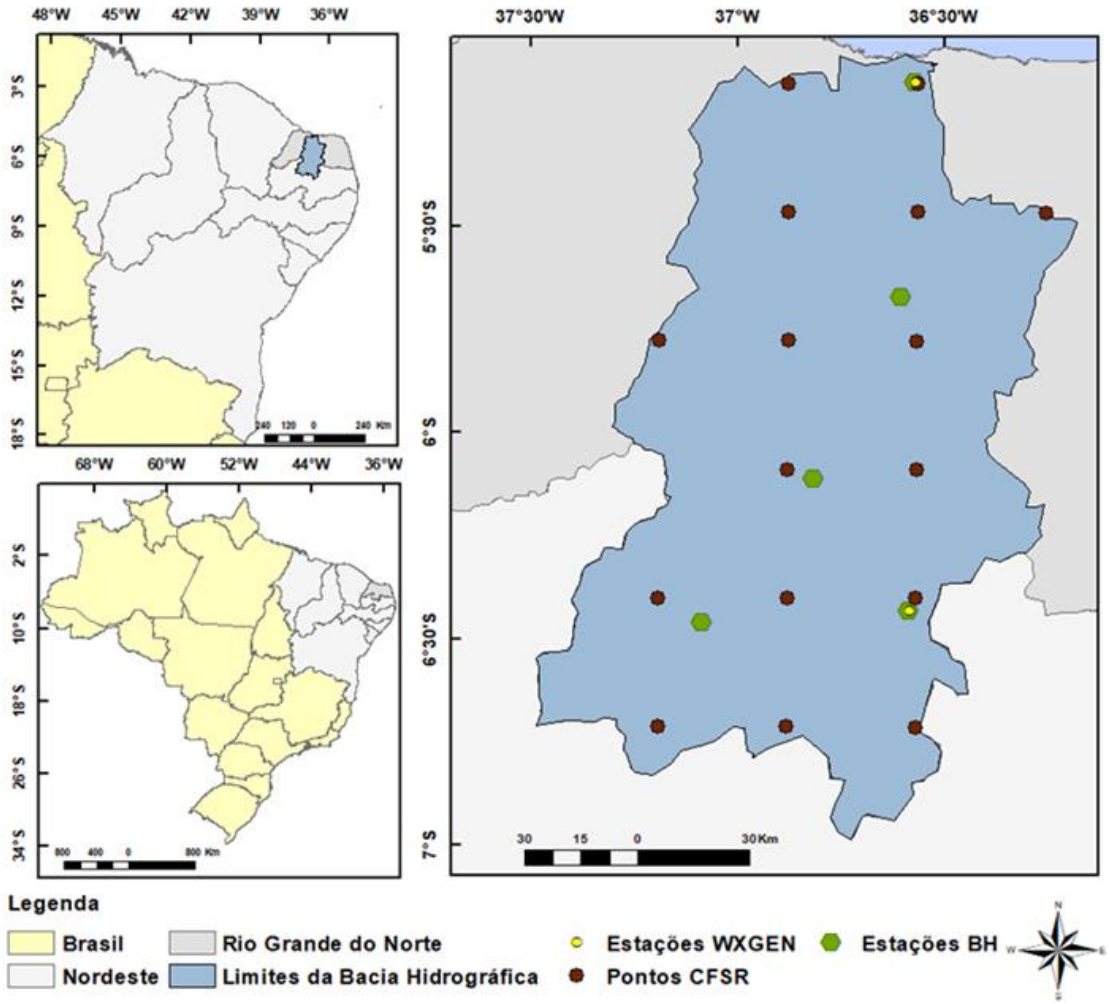

Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu (BHRPA) com destaque as localidades das Estações meteorológicas e pluviométricas e pontos do CFSR.

A bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu é formada por seis sub-bacias: bacia do rio do Peixe, do rio Piancó, do Alto Piranhas, do Médio Piranhas, do Rio Espinharas e do Rio Seridó. Composta por rios intermitentes em condições naturais é perenizada por dois reservatórios de regularização: Coremas - Mãe d'Água, na Paraíba, e a barragem Armando Ribeiro Gonçalves, no Rio Grande do Norte

(Moura, 2007; ANA, 2016, 2018.). O principal rio da bacia é o rio Piranhas-Açu, tem seu alto curso no estado da Paraíba, na Serra de Piancó, adentrando o estado do Rio Grande do Norte, onde localiza-se seu exutório, situado no Litoral Setentrional Potiguar, próximo à cidade de Macau (Carvalho, 2014).

Clima

A BHRPA apresenta os tipos climáticos A (clima tropical) e B (clima árido), segundo a classificação de Köppen, com predominância do clima BSw'h' (Moura, 2007; ANA, 2014). Segundo a classificação climática de Köppen, caracterizado por ser quente e seco (semiárido quente e seco com chuvas de verão-outono) e por apresentar insuficiência e irregularidade das precipitações pluviais e ocorrência de temperaturas elevadas (MMA, 2005). A distribuição espacial e temporal da precipitação é muito irregular, as chuvas são concentradas em poucos meses do ano, com precipitações médias variando entre 400 e 800 mm anuais, concentradas entre os meses de fevereiro e maio e com um padrão de forte variabilidade interanual, caracterizado pela alternância entre anos de pluviosidade acima da média, regular e anos consecutivos de valores abaixo da média, que resultam em períodos de estiagem prolongados e baixa disponibilidade hídrica (ANA, 2014, 2016).

Considerando as normais climatológicas para temperatura e umidade relativa para as estações de Cruzeta, Florânia e Macau, as temperaturas médias variam em torno de 24,5 a 29,8 °C, com máxima mensal em Novembro de 35 °C, e mínima no mês de Agosto de 19,1°C. Quanto a umidade relativa apresenta variação de 63,2 a 70,8%, a umidade relativa do ar oscila anualmente, os meses de setembro e novembro são os mais secos, com médias entre 54 e 55%, sendo abril o mês mais úmido,com média de 76% (Moura, 2007). A bacia apresenta altas taxas de evaporação, que acarretam perdas significativas das reservas de água, contribuindo assim para o déficit hídrico na bacia (ANA, 2014).

Características físicas e morfológicas

A geologia da região em que está situada a BHRPA é constituída pelo embasamento cristalino de idade pré-Cambriana, mais de 550 milhões de anos, onde predominam amplamente rochas ígneas e metamórficas, representadas por gnaisses, xistos, migmatitos e granitos, que fazem parte da Província Borborema (ANA, 2014). Moura (2007) destaca que, predominam rochas cristalinas précambrianas, nas porções centro-sul e sudeste, ocorrem calcários da Formação Jandaíra e arenitos da Formação Açu e Grupo Barreiras na parte norte da bacia e os sedimentos quaternários constituem o Vale do Açu.

Quanto ao aspecto geomorfológico, o embasamento cristalino corresponde principalmente à Depressão Sertaneja e, localmente, ao Planalto Borborema. A primeira localizada na porção centro-sul da bacia, no território potiguar, caracterizada, predominantemente, por formas de relevo tabulares amplas e pouco aprofundadas e por topografia plana a levemente ondulada com altimetrias inferiores a 400 m, e a segunda, restrita à região sudeste da bacia, constituída por um misto de formas aguçadas, convexas e tabulares, encimadas por notáveis ocorrências de topos amplos, com presença de sedimentos terciários, formando superfícies tabulares erosivas (MMA, 2005; ANA, 2014).

Os solos predominantes na região são de embasamento cristalino e arenosos, os principais tipos são o Luvissolo Crômico e o Neossolo Litólico, seguidos do Argissolo Vermelho-Amarelo. Nas áreas das bacias sedimentares, são várias as unidades pedológicas existentes, com predominância de Planossolo Nátrico e Vertissolo Cromado na área da bacia do rio do Peixe, Cambissolo Háplico na área da Formação Jandaíra, Latossolos sobre as formações Açu e Barreiras, Neossolo Quartzarênico na Planície Aluvial do rio Açu e Gleissolo Sálico na Zona Litorânea (ANA, 2014).

A vegetação natural é do tipo Xerófila predominando amplamente na BHRPA pertencente ao bioma Caatinga (vegetação do tipo caatinga - caducifólia espinhosa) vegetação típica da região semiárida do Nordeste brasileiro, mais especificamente caatinga hiperxerófila e hipoxerófila, com exceção feita aos ambientes costeiros (MMA, 2005; ANA, 2014).

Obtenção de ET pelo método do Balanço Hídrico

Thornthwaite e Mather (1955) desenvolveram um modelo de balanço hídrico climatológico para gerar o regime hídrico de um local sem necessidade de medidas diretas das condições do solo. Para sua elaboração, são necessários dados de estimativas da evapotranspiração potencial em cada período e do total de precipitação, além da definição da Capacidade de Água Disponível – CAD. O balanço hídrico climatológico fornece informações sobre o total de água retirada no solo), evapotranspiração real, deficiência e/ou excedente hídrico para cada período, além de permitir que os valores obtidos de excesso e déficit hídrico sejam comparados entre si e com a necessidade de água, com a finalidade de fornecer

índices que possam ser usados para classificação e avaliação climática.

Para comparação dos resultados da simulação hidrológica foram calculados os valores de ET para cinco localidades inseridas na porção da BHRPA, por meio do Balanço Hídrico - BH seriado segundo o modelo proposto por Thornthwaite e Mather (1955), utilizando planilha eletrônica desenvolvida por Rolim et al. (1998).

Os dados necessários para realização do BH foram obtidos para uma série de 10 anos, compreendendo o período de janeiro de 2002 a dezembro de 2011. Para os municípios de Cruzeta, Florânia, Macau e Caicó os dados pluviométricos (acumulados mensais) e de temperatura média do ar (mensal) foram adquiridos através da base dados disponível no site do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, para Angicos o registro de precipitação é proveniente de base de dados da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte – EMPARN e os valores de temperatura média foram estimados através do software Estima_T (Cavalcanti et al., 2006; Silva et al., 2006).

Foram utilizadas informações de CAD obtidas por meio de interpolação realizada por Sales (2019), de dados do mapa elaborado por Brito (2000) da distribuição espacial da máxima Capacidade de Água Disponível pelo solo (CAD) em mm, para a região Nordeste do Brasil, na qual as localidades estão inseridas.

Simulações no modelo SWAT

Existe uma série de dados relacionados ao solo, clima, fisiologia de culturas e tipos de ocupações agrícolas e práticas de manejo do solo que devem ser fornecidos ao modelo SWAT (Lelis e Calijuri, 2010). Os processos físicos associados ao movimento da água, movimento dos sedimentos, crescimento das culturas, ciclagem de nutrientes, entre outros, são diretamente modelados utilizando esses dados (Arnold et al., 1998).

As informações utilizadas neste estudo são referentes a dados climatológicos, uso e ocupação do solo, relevo e os tipos de solo para a área. As características físicas e morfológicas da bacia hidrográfica em estudo foram obtidas do Modelo Digital de Elevação (MDE) gerado pelo projeto Brasil em Relevo (Miranda, 2005), disponível no site da EMBRAPA Monitoramento por satélite (EMBRAPA, 2005). A Figura 2 (A) indica o mapa resultante da classificação da declividade para a área da bacia, neste estudo foram definidas cinco classes.

O mapa de solos do Brasil disponibilizado por meio do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE foi utilizado para avaliação da área de estudo permitindo a identificação e visualização espacial das diferentes classes de solos encontradas para o País (IBGE, 2011). Produzido na escala de 1:5.000.000 foi elaborado a partir de informações do levantamento exploratório da EMBRAPA (1999), que oferece as especificações e nomenclaturas para os tipos de solos brasileiros descritas no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos-SiBCS (EMBRAPA, 1999), e dos estudos realizados pelo IBGE e EMBRAPA (IBGE, 2004). De acordo com as informações foi possível identificar os diferentes tipos de solos presentes na área (Figura 2 (B)). Os valores dos parâmetros obtidos para classes de solos presentes na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco-BHSRSF por Silva (2014), em seu estudo, foram utilizados para alimentar a base de dados para os tipos de solos semelhantes aos encontrados na área da BHRPA.

As características de uso e ocupação do solo foram obtidas a partir do mapa de cobertura e uso da Terra do Brasil adquirido junto ao IBGE (IBGE, 2016). Este mapa representa a distribuição geográfica da tipologia de uso identificada por meio de padrões homogêneos da cobertura terrestre, realizada a partir de levantamento da cobertura e do uso da terra, visando sua classificação e espacialização por meio de cartas (IBGE, 2013). Foram utilizados para a simulação parâmetros de tipos de usos e ocupação do solo de bacias estudadas dos Estados Unidos, que possuem semelhanças com as condições para coberturas presentes na área da bacia estudada, na base de dados da interface ArcSWAT há informações referentes aos tipos de cobertura do solo destas bacias com parâmetros já inseridos.

Para este estudo foram utilizadas seis classes de tipo de cobertura do solo identificadas após o processamento da imagem, sendo uma destas classes a água. A Figura 2 (C) indica o mapa de cobertura do solo para a área de estudo. As classes de coberturas dos solos selecionadas para fazer analogia aos tipos de uso e ocupação do solo presentes na bacia em estudo são as denominadas Residential-Med/Low Density - URML, Range-Brush - RNGB, Pasture - PAST, Agricultural Land-Generic AGRL e Range-Grasses - RNGE, estas foram escolhidas por apresentarem semelhanças com respectivamente condições de Área Artificial, Pastagem Natural, Vegetação Campestre com Áreas Agrícolas, Área Agrícola e Agropecuária com Remanescentes Florestais.

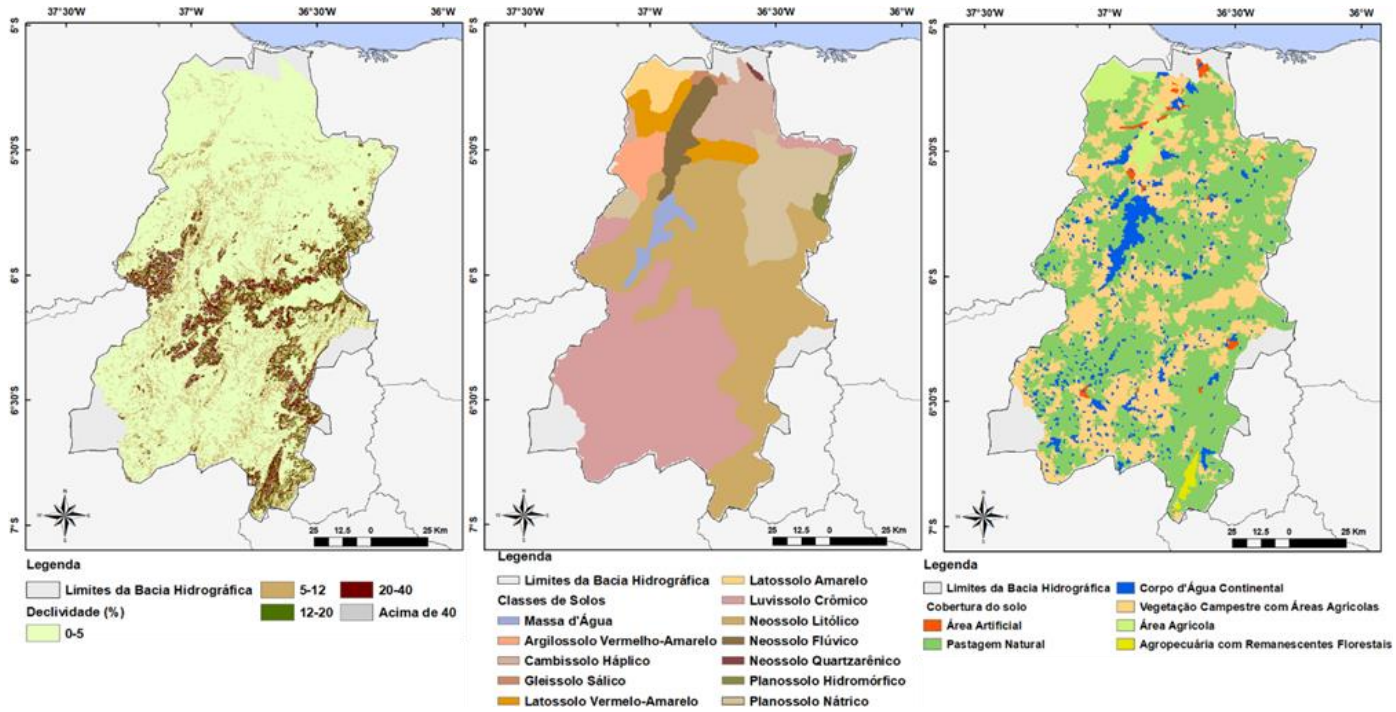

Figura 2 - Distribuição espacial da declividade (A), solos (B) e cobertura e uso da Terra para a BHRPA (C).

O modelo requer dados climatológicos diários de precipitação, temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa (Machado, 2002; Neitsch et al., 2005). Algumas dificuldades podem ser encontradas quanto a utilização de dados diários observados, em muitas situações nem sempre é possível obter dados confiáveis e suficientes para geração de resultados satisfatórios.Foram obtidos para 56 pontos de grade, dos quais 16 encontram-se inseridos na área da bacia, dados de precipitação, temperatura máxima e mínima, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa do ar disponíveis no *Global Weather Data for SWAT*. Nessa plataforma são fornecidos os dados do *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) do *The National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) diários das variáveis para aplicação e em formato que pode ser usado na interface ArcSWAT (Yang et al., 2014).

O conjunto de dados CFSR do NCEP nos Estados Unidos foi desenvolvido como parte do projeto *Climate Forecast System*, projetado e executado para geração de previsões horárias de diversas variáveis meteorológicas para todo o globo terrestre usando informações da rede global de estações meteorológicas e produtos derivados de satélites (Saha et al., 2010; Yang et al., 2014; Radcliffe e Mukundan, 2017). Os dados resultantes são disponibilizados pelo NCEP-CFSR com resolução espacial de 0.5 Graus e temporal de 6 horas para o período de 1979 - 2014 (Yang et al., 2014).

A aplicabilidade dos dados climáticos de reanálise do *The National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) para modelagem em bacias hidrográficas foi avaliada em diversos estudos, dentre os quais Fuka et al. (2013), Dile e Srinivasan (2014) e Yang et al. (2014). Para aquisição dos parâmetros climatológicos mensais com exceção da Média de radiação solar diária para um determinado mês - SOLARAV, foram usados dados da precipitação, temperatura máxima, mínima, média e umidade relativa do ar obtidos de duas estações meteorológicas inseridas na área de estudo para o período de 1994 a 2018.Tais estações fazem parte da rede de monitoramento meteorológico do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Para a variável climática SOLARAV foram utilizadas informações obtidas para Estação Meteorológica de Mossoró, também monitorada pelo INMET e localizada no Estado que abrange totalmente a área de estudo.

Os dados referentes aos parâmetros de precipitação foram calculados utilizando o programa pcpSTAT, desenvolvido por Liersch (2003) para estabelecimento destes valores. O valor máximo de meia hora de chuva em todo o período de registros de um determinado mês RAINHHMX, foi calculado após a obtenção dos maiores valores de precipitação para

cada mês da série de dados, utilizando os fatores para desagregação propostos por Oliveira et al. (2000), os quais permitem a transformação de chuvas de acumuladas em um dia em chuvas de diversas durações, e estando entre os mais indicados para a localização da área de estudo.

Independente do tipo de estudo realizado com o SWAT, o seu funcionamento será sempre em função do balanço hídrico existente na bacia hidrográfica (Salles, 2012). Sendo assim, o ciclo hidrológico simulado pelo SWAT baseia-se na equação do balanço hídrico (Neitsch et al., 2009) (Eq. 1). As descrições completas dos processos simulados e as equações utilizadas pelo modelo são documentadas no manual teórico do SWAT em Neitsch et al. (2009) e em Arnold et al. (1998).

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

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

O SWAT utiliza um período de aquecimento que segundo Cibin et al. (2010) tem a finalidade de estabilizar o modelo durante seus processos interativos iniciais minimizando as incertezas para a obtenção dos resultados. Segundo Brighenti et al. (2016) esse período visa estabilizar as condições iniciais de umidade do solo para os primeiros anos de simulação. Segundo Arnold et al. (1998) o modelo SWAT não requer calibração, caso não existam informações disponíveis e de qualidade, como é o caso de trabalhos realizados utilizando bacias não-instrumentadas como unidades de estudo.

Neste trabalho a equação adotada para a simulação da evapotranspiração potencial foi a de Penman Monteith, o período de aquecimento utilizado foi de três anos 1999, 2000 e 2001, e sendo assim, a série de resultados de Evapotranspiração real estabelecida foi de dez anos compreendendo o período de 2002 a 2011.

Parâmetros estatísticos para avaliação do modelo

Buscando avaliar o desempenho e ajuste do método de modelagem, as séries temporais de evapotranspiração obtidas por meio do BH e da simulação pelo modelo SWAT foram comparadas para as localidades selecionadas e inseridas na área da BHRPA. Machado (2002) destaca que o desempenho de modelos é usualmente avaliado por meio do uso de medidas estatísticas.

Para comparação foram usados parâmetros estatísticos, para análise da quantificação dos erros proporcionados pelas estimativas foram utilizados o Erro Médio (ME), o Erro Médio Absoluto (EMA) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), para análise de confiança foram usados o Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (NS), a porcentagem de viés (Pbias) e o Índice de Concordância de Willmott (d), o Índice de exatidão (c) e os Coeficientes de Determinação (R^2) e Correlação (R) de Pearson, para maiores informações sobre os testes aplicados verificar em Silva et al. (2018).

O Erro Médio (EM) ou tendência mede o valor médio de erro de acordo com a diferença entre os valores obtidos nos métodos que se deseja avaliar e os valores do método que se tomou como parâmetro, indicando assim possíveis tendências de subestimativas ou superestimativas do modelo. O EMA é considerado preciso e robusto como medida da habilidade de modelos numéricos em reproduzir a realidade (Fox, 1981). A porcentagem de viés (Pbias) mede a tendência de os dados simulados serem menores ou maiores do que os dados observados (Gupta et al., 1999).

Segundo Fox (1981) Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) é a raiz quadrada do erro médio quadrático (MSE). Destaca-se que assim como o erro médio quadrático é uma das medidas de diferença ou erro cada vez mais usadas na comparação e avaliação de modelos de simulação, podendo ser usada para substituir os índices baseados em correlação e tendências e principalmente como medidas para fornecimento de informações de precisão (Willmott et al., 1985).

De acordo com Machado (2002), um dos mais importantes critérios estatísticos para avaliar o ajuste de modelos hidrológicos é o Coeficiente Eficiência de Nash e Sutcliffe (1970). Segundo Bressiani et al. (2015) é o indicador estatístico de uso unânime na avaliação da eficiência do modelo SWAT.

O índice de desempenho (c) utilizado para indicar a confiança dos métodos é obtido pelo produto do índice de precisão (R) (coeficiente de correlação de Pearson) pelo índice de exatidão (d) (índice de exatidão de Willmott) (Camargo e Sentelhas, 1997). Conforme

critérios adotados por Camargo e Sentelhas (1997) pode-se, com base nesse índice, classificar o desempenho dos métodos de estimativas.

O índice de exatidão (d) de Willmott expressa a exatidão das estimativas em relação aos valores observados, sendo assim está relacionado ao afastamento dos valores estimados considerando os observados (Willmott et al., 1985). O coeficiente de correlação linear de Pearson R é uma medida estatística usada para avaliar a intensidade da associação linear entre duas variáveis, enquanto o coeficiente de determinação R^2 permite avaliar o quanto o modelo reflete a variância entre os valores observados e simulados (Santhi et al., 2001).

3. Resultados e discussão

Análise da variabilidade da precipitação e das estimativas de ET por modelagem

Na Figura 3 A e B é possível observar a variabilidade média mensal e sazonal da precipitação para estações de Angicos, Cruzeta, Currais Novos, Florânia, Jucurutu, Macau, Parelhas, Pedro Avelino, Santana dos Matos e Caicó inseridas na área da BHRPA. Por meio da análise da variabilidade média mensal da precipitação é possível verificar que as maiores médias dos acumulados mensais estão distribuídas de janeiro a maio, a partir do mês de dezembro são observados valores significativos de precipitação, pode-se verificar menor dispersão para o mês de maio e maior amplitude no mês de março (77,63 mm).

Na análise da variabilidade sazonal da precipitação e da ET simulada (Figuras 3 e 4 (B)) pode-se verificar que os maiores valores entre os acumulados médios trimestrais são observados nos meses de março, abril e maio (MAM), com média de 414,14 mm para precipitação e de 211,44 mm para evapotranspiração, ou seja, os maiores incrementos de precipitação e de ET simulada da série analisada para a área de estudo são observados na estação de outono, para esta também foi verificada maior amplitude para valores de precipitação (135.29 mm), esta indica a diferença entre os valores mínimos e máximos.

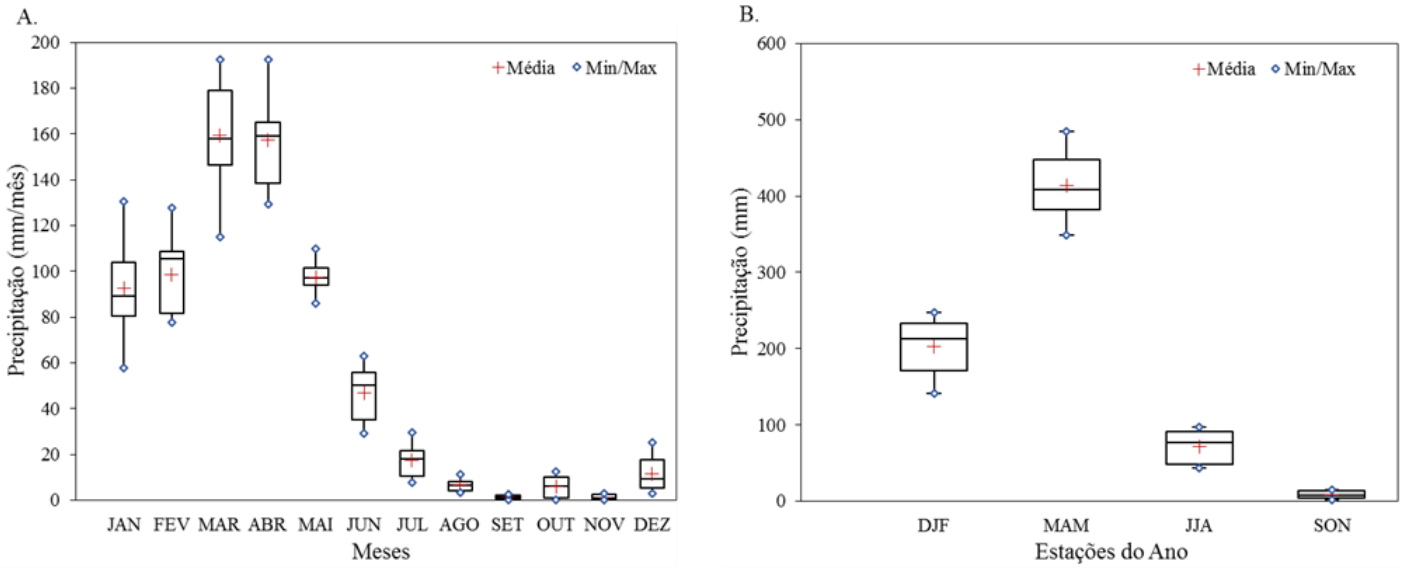

Figura 3 - Variabilidade média do acumulado mensal (A) e do acumulado Sazonal (B) da distribuição da precipitação para BHRPA no período de janeiro de 2002 a dezembro de 2011.

As estações de inverno (JJA) e primavera (SON) são caracterizadas pelo registro dos menores acumulados de precipitação, com valores inferiores a 100 mm. Inverno com valores máximo e mínimo de 96,65 e 43,59 (mm), respectivamente, e primavera 14,73 e 2,1 (mm). Para estas também são verificados os menores registros de ET simulados com o SWAT (Figura 4B). Porém quanto a evapotranspiração a maior amplitude (580,74 mm) foi obtida para a primavera.

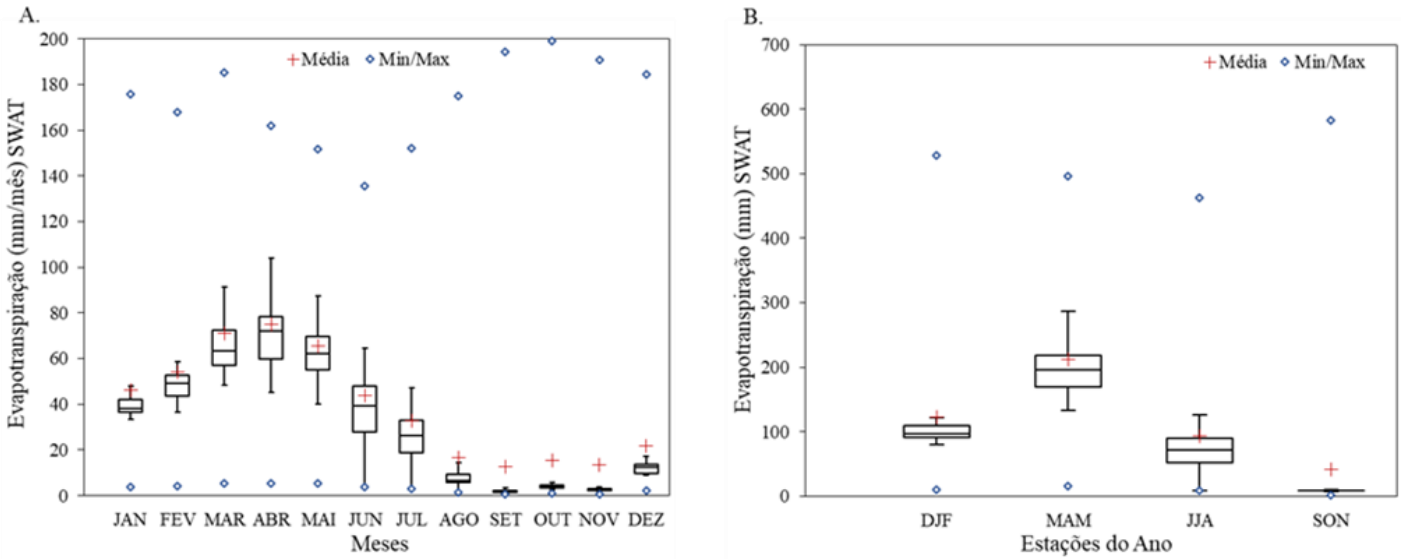

Figura 4 - Variabilidade do acumulado mensal (A) e do acumulado Sazonal (B) da distribuição da ET estimada pelo SWAT para BHRPA no período de janeiro de 2002 a dezembro de 2011.

As estimativas de ET da modelagem são dispersas, refletindo na simulação possíveis perdas de acordo com o tipo de solo e de uso e ocupação. Essas perdas também podem ser influenciadas pelas classes de declividades.

Avaliação das estimativas de evapotranspiração

Para avaliar a concordância entre as estimativas, os valores dos cálculos dos dois métodos foram comparados. Foram obtidos os parâmetros estatísticos Erro Médio (EM), Erro Médio Absoluto (EMA), Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ), Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE), a Porcentagem de Viés (Pbias), Índice de Exatidão de Willmott (d), coeficiente de determinação (R^2) e correlação (R), e o índice de desempenho (c).

Os valores para os índices estatísticos calculados são apresentados na Tabela 1. Os valores do coeficiente de Nash e Sutcliffe (NSE) (Tabela 1) resultantes para o modelo de acordo com a classificação de Moriasi et al. (2007) foram considerados: Satisfatório para Cruzeta (0,61) e Caicó (0,64); Bom para Florânia (0,71); e Muito Bom para Angicos (0,77) e Macau (0,82), sendo assim os valores obtidos fazem com que o desempenho do modelo seja julgado como aceitável, quanto ao Pbias esta medida indicou a subestimativa do modelo, os menores valores foram obtidos para Macau (17,10) e Angicos (23,07).

Tabela 1 - Índices estatísticos obtidos para avaliação do desempenho do modelo SWAT.

Localidades	EM	EMA	REQM	NSE	Pbias	R	R^2	d	c
Angicos	-10,25	22,18	32,71	0,77	23,07	0,84	0,70	0,91	0,77
Cruzeta	-30,3	31,94	47,16	0,61	55,5	0,84	0,71	0,81	0,68
Florânia	-20	25,82	38,56	0,71	38,8	0,78	0,61	0,88	0,69
Macau	-8,44	20,88	31,7	0,82	17,1	0,87	0,75	0,94	0,81
Caicó	-24,66	29,09	46,07	0,64	48,58	0,81	0,66	0,83	0,67

Com relação ao EM observou-se que os resultados para este índice são predominantemente negativos e, assim como os resultados do Pbias também expressam a tendência do método de modelagem ambiental em subestimar as estimativas pelo método do BH, com variações do EM entre -30,30 (Cruzeta) e -8,44 (Macau). Os resultados para o RMSE dos dados da simulação foram altos variando entre 31,70 (Macau) e 47,16 (Cruzeta).

Na classificação com base no índice de desempenho (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1997), o modelo apresentou maiores valores para Angicos e Macau, sendo que para estas localidades o modelo apresentou desempenho Muito Bom, para as demais localidades o desempenho do modelo foi tido

como Bom. Para Macau foram obtidos o maior coeficiente de correlação (0,87) e o maior índice de exatidão (0,94). Os valores para o Índice de Exatidão de Willmott variaram de 0,81 (Cruzeta) a 0.94 (Macau). Considerando coeficiente de correlação (R) foram obtidos valores de variando entre 0,78 (Florânia) e 0,87 (Macau), indicando assim Forte correlação entre os métodos para todas as localidades considerando critérios para avaliação qualitativa do grau de correlação entre duas variáveis adotados por Callegari-Jacques (2003) (Tabela 1 e Figura 5 (C) e (D)).

Os diagramas de dispersão de comparação entre as estimativas mensais da ET por modelagem e BH para o período em estudo são mostrados na Figura 5. Reforçando a avaliação dos resultados obtidos para os parâmetros estatísticos EM e Pbias os diagramas permitem verificar a subestimativa dos resultados obtidos por meio da modelagem.

Ao comparar os resultados de ET da simulação com SWAT para a bacia do Alto Rio Jardim com valores de referência obtidos experimentalmente em outros trabalhos, Castro (2013), verificou que a modelagem apresentou um valor inferior para a evapotranspiração, quase a metade do valor esperado. Em todas as simulações realizadas por Melo Neto (2013) a evapotranspiração anual simulada pelo SWAT foi subestimada quando comparada com os valores estimados por BH simples.

Uzeika, (2009) ao aplicar o modelo SWAT para uma bacia hidrográfica rural localizada no município de Arvorezinha-RS buscando avaliar seu desempenho através da comparação dos resultados hidrológicos e sedimentológicos simulados pelo modelo com observados de monitoramento hidrossedimentológico, ressaltou a importância de estudos mais detalhados de validação do modelo para estimativas relacionadas com o movimento de água no solo (evapotranspiração, infiltração, percolação e percolação profunda).

Observou-se, que em regiões mais secas, a evapotranspiração real simulada pela modelagem apresentou-se muito menor, evidenciando a resposta do modelo quanto a quantidade de água precipitada e disponível para o processo de evapotranspiração. Melo Neto (2013) verificou em seu estudo que as maiores subestimativas para evapotranspiração se associavam ao período de recessão, justificando que esta observação pode refletir uma possível limitação do modelo em expressar a retirada de água do solo para atender a demanda evaporativa, promovendo como compensação a redução da evapotranspiração real no período.

Van Liew et al. (2007) realizaram uma investigação para avaliar o desempenho da aplicação do modelo SWAT para uma variedade de bacias hidrográficas localizadas nos Estados Unidos, cada qual com características climáticas e físicas distintas, os resultados obtidos sugerem que o SWAT geralmente apresentará melhor desempenho em bacias hidrográficas de climas mais úmidos, do que climas mais secos onde a evapotranspiração é geralmente o processo hidrológico com maior importância.

Ao analisar os valores dos coeficientes de determinação (R^2), (Tabela 1 e Figura 5) é possível verificar que, os resultados obtidos indicam as melhores precisões das estimativas para as localidades de Angicos, Cruzeta e Macau. Os menores valores de R^2 foram obtidos para as localidades de Florânia e Caicó, indicando maior grau de dispersão entre os valores da simulação e do BH.

Santhi et al. (2001), consideraram na avaliação da predição do modelo no procedimento de calibração para vazão, produção de sedimentos e nutrientes valores de R^2 maiores ou iguais a 0,6 como aceitáveis. Aplicando esse critério para a ET simulada é possível perceber que os valores dos coeficientes de determinação (R^2) obtidos são superiores, significando assim que se alcançou um bom ajuste para as localidades validadas.

A comparação dos resultados mensais de ET estimados por modelagem hidrológica foi realizada utilizando dados de ET em uma escala de tempo mensal obtidos pelo método do BH contemplando o período de 2002 a 2011 para locais inseridos na área da bacia. Os dados de evapotranspiração da modelagem foram extraídos para cada sub-bacia correspondente à posição das cinco estações meteorológicas selecionadas para realização do BH. A diferença entre os valores de ET obtidos além de expor a resposta aos diferentes métodos utilizados no estudo também pode ser relacionada com efeito da variação das características das informações utilizadas e da quantidade parâmetros envolvidos.

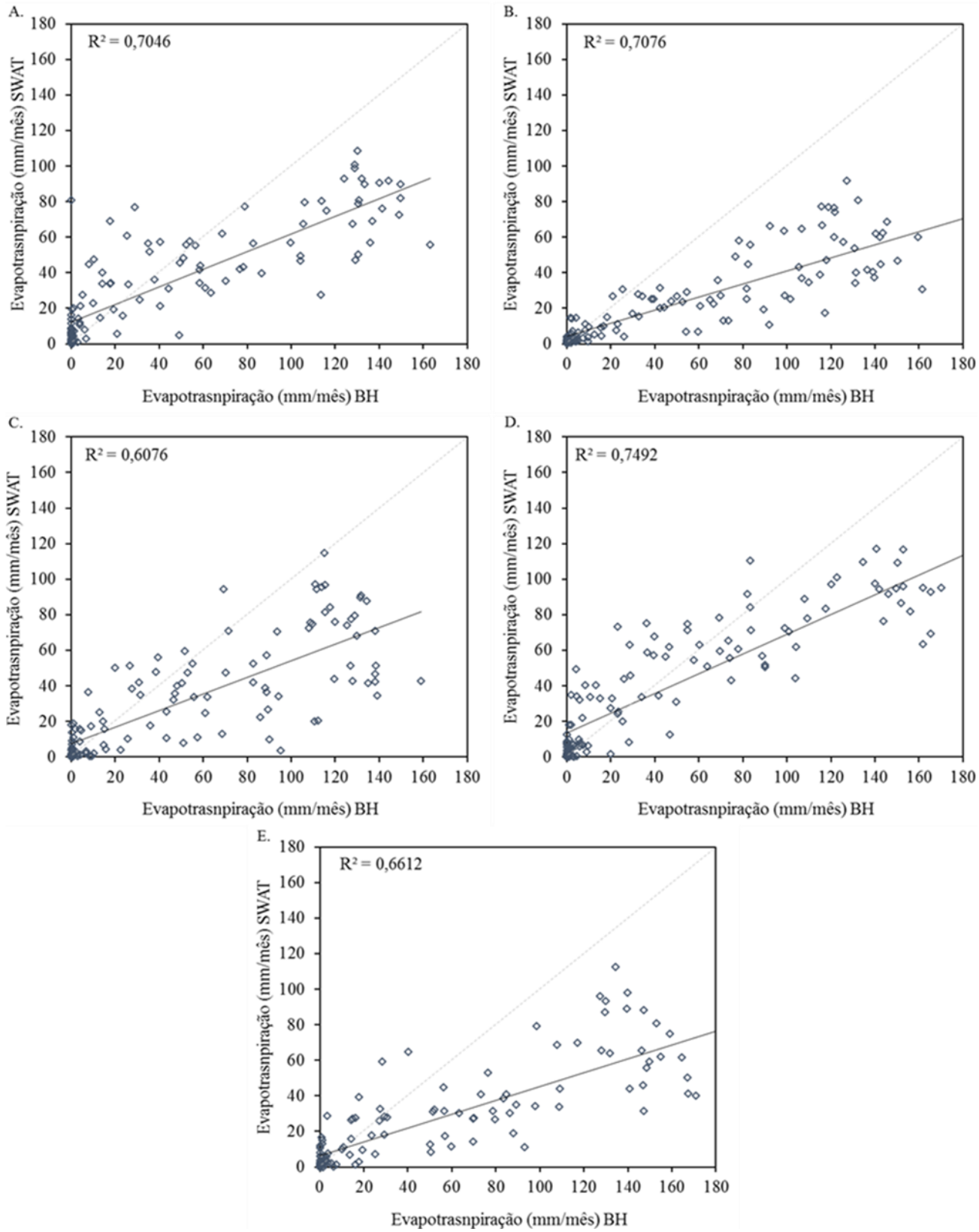

Figura 5 - Comparação das estimativas de evapotranspiração por modelagem e Balanço Hídrico para as sub-bacias das regiões de Angicos (A), Cruzeta (B), Florânia (C), Macau (D) e Caicó (E), no período de janeiro de 2002 a dezembro de 2011.

4. Conclusões

Por meio da análise da variabilidade mensal e sazonal foi possível verificar que os maiores totais de precipitação e de ET simulada da série avaliada para a área de estudo são observados na estação de outono, enquanto as estações de inverno (JJA) e primavera (SON) são caracterizadas pelo registro dos menores acumulados.

Os resultados dos índices estatísticos EM e Pbias evidenciam a subestimativa da evapotranspiração simulada em relação à calculada pelo método do balanço hídrico. Por meio dos diagramas e da representação da série temporal foi possível verificar a subestimativa dos resultados obtidos por meio da modelagem em quase a totalidade da série.

O modelo apresentou boa representação para o NSE e para o índice de desempenho (c), melhores precisões das estimativas para as localidades de Angicos, Cruzeta e Macau, forte correlação entre os métodos para todas as localidades, e os menores valores obtidos para o EMA e Pbias apenas para as localidades de Macau e Angicos.

Diante do exposto constatou-se que o modelo hidrológico SWAT utilizado sem calibração apresentou um bom desempenho para simulação da evapotranspiração quando comparadas as estimativas com valores calculados pelo método do balanço hídrico para a bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu.

Referências

Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., Kløove, B., 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. Journal Hydrology 524, 733–752. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.03.027.

Alcântara, H.M., 2013. Estabelecimento de metodologia para a conservação e Recuperação de pequenas bacias hidrográficas do semiárido. Tese (Doutorado). Campina Grande, UFCG.

Allen, R.G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. FAO, Rome. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

ANA. Agência Nacional de Águas, 2018. Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu: resumo executivo. Brasília.

ANA. Agência Nacional de Águas, 2014. Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu. Brasília.

ANA. Agência Nacional de Águas, 2016. Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu. Brasília.

Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., Williams, J.R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. Journal of the American water Resources Association 34, 73-89.

Bressiani, D.A., Gassman, P.W., Fernandes, J.G., Garbossa, L., Srinivasan, R., Mendiondo, E.M., Bonumá, N.B., 2015. A review of SWAT (Soil and Water Assessment Tool) applications in Brazil: challenges and prospects. International Journal of Agricultural and Biological Engineering (IJABE) 8, 9-35. doi: 10.3965/j.ijabe.20150803.1765.

Brighenti, T.M., Bonumá, N. B., Chaffe, P.L.B., 2016. Calibração hierárquica do modelo SWAT em uma bacia hidrográfica Catarinense. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 21, 53-64.

Brito, J.I.B., 2000. Modelo regional de estimativa do balanço hídrico aplicado à variabilidade climática do Nordeste do Brasil. Dissertação (Metrado). Campina Grande, UFPB.

Callegari-Jacques, S.M., 2003. Bioestatística: princípios e aplicações. Artemed, Porto Alegre.

Camargo, A.P., Sentelhas, P.C., 1997. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. Revista Brasileira de Agrometeorologia 5, 89-97.

Carvalho Neto, J.G., 2011. Simulação hidrossedimentológica da bacia do riacho dos Namorados com o modelo SWAT. Dissertação (Mestrado). Campina Grande, UFCG.

Carvalho Neto, J.G.C., Srinivasan, V.S., Rufino, I.A.A., 2011. Simulação hidrossedimentológica, analisando dois MDES, de duas pequenas sub-bacias no cariri paraibano utilizando o modelo SWAT. Revista Geográfica Acadêmica 5, 48-58.

Carvalho, R.G., 2014. As bacias hidrográficas enquanto Unidades de Planejamento e Zoneamento Ambiental no Brasil. Caderno Prudentino de Geografia, volume especial, 26-43.

Castro, K.B., 2013. Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada. Dissertação (Mestrado). Brasília, UNB.

Cavalcanti, E.P., Silva, V.P.R., Sousa, F.A.S., 2006. Programa computacional para a estimativa da temperatura do ar para a região Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Brasil 10, 140-147.

Cibin, R., Sudheer, K.P., Chaubey, I., 2010. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. Hydrological Process 24, 1133-1148.

Dile, Y.T., Srinivasan, R., 2014. Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: an application in the Blue Nile river basin. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 1-16. doi: 10.1111/jawr.12182.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1999. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2005. Brasil em relevo. Disponível: https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/download/index.htm. Acesso: 20 abr. 2019.

EMPARN. Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte. Disponível: http://189.124.130.5:8181/estacaomet.php. Acesso: 05 mai. 2019.

Fox, D.G., 1981. Judging air quality model performance. Bulletin of the American Meteorological Society 62, 599-609.

Fuka, D.R., Walter, M.T., Macalister, C., Degaetano, A. T., Steenhuis, T. S., Easton, Z. M., 2013. Using the Climate Forecast System Reanalysis as Weather Input Data for Watershed Models. Hydrological Processes 10.

GLOBAL WEATHER, 2019. NCEP climate forecast system reanalysis (CFSR). Disponível: https://globalweather.tamu.edu/. Acesso: 20 abr. 2019.

Gupta, H., Sorooshian, S., Yapo, P., 1999. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. Journal of Hydrologic Engineering 4, 135-143.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2004. Mapa de solos do Brasil. Disponível: ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas/tematicos/sistematizacao/pedologia/. Acesso: 20 abr. 2019.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013. Manual Técnico de Uso da Terra. Manuais técnicos em geociência. 3. ed. Rio de Janeiro.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2016. Mapa de Cobertura e uso da Terra do Brasil. Disponível: https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa220578. Acesso: 20 abr. 2019.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível: http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep. Acesso: 29 abr. 2019.

Lelis, T.A., Calijuri, M.L., 2010. Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT. Ambi-Agua 5, 158-174.

Liang, L., Li, L., Liu, Q., 2010. Temporal variation of reference evapotranspiration during 1961–2005 in the Taoer river basin of Northeast China. Agricultural and Forest Meteorology 150, 298-306. doi:10.1016/j.agrformet.2009.11.014.

Liersch, S., 2003. The Program pcpSTAT: user's manual. Berlin. Disponível: https://swat.tamu.edu/software/. Acesso: 21 abr. 2019.

Lima, J.E.F.W., Silva, C.L., Oliveira, C.A.S., 2001. Comparação da evapotranspiração real simulada e observada em uma bacia hidrográfica em condições naturais de cerrado. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 5, 33-41.

Machado, R.E., 2002. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Tese (Doutorado). Piracicaba, Esalq.

Melo Neto, J.O., 2013. Análise de sensibilidade escalar do modelo hidrológico SWAT. Dissertação (Metrado). Lavras, UFLA.

Miranda, E.E., 2005. Brasil em Relevo. Embrapa Monitoramento por Satélite, Campinas. Disponível: http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br. Acesso: 18 Jun. 2019.

MMA. Ministério do Meio Ambiente, 2005. Proposta de instituição do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu, conforme resolução nº 05, de 10 de abril de 2000, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Agência Nacional de Águas Governo do Estado da Paraíba Governo do Estado do Rio Grande do Norte.

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Binger, R.L., Harmel, R.D., Veith, T., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers 50, 885-900.

Moura, E.M., 2007. Avaliação da disponibilidade hídrica e da demanda hídrica no trecho do Rio Piranhas-Açu entre os Açudes Coremas-Mãe d'Água e Armando Ribeiro Gonçalves. Dissertação (Mestrado). Natal, UFRN.

Nash, J.E., Sutcliffe, I.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models Part I - a discussion of principles. Journal of Hydrology 10, 282-290.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2005. Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation: Version 2005. Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service, Blackland Research Center - Texas Agricultural Research Experiment Station.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2009. Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation: Version 2009. Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service, Blackland Research Center - Texas Agricultural Research Experiment Station.

Oliveira, L.F.C., Cortês, F.C., Barbosa, F.O.A., Romão, P.A., Carvalho, D.F., 2000. Estimativa das equações de chuvas intensas para algumas localidades no estado de Goiás pelo método da desagregação de chuvas. Pesquisa Agropecuária Tropical 20, 23-27.

Pereira, A.R., Villa Nova, N.A., Sediyama, G.C., 1997. Evapo(transpi)-ração. FEALQ, Piracicaba.

Radcliffe, D.E., Mukundan, R., 2017. PRISM vs. CFSR Precipitation Data Effects on Calibration and Validation of SWAT Models. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 53, 89-100. doi: 10.1111/1752-1688.12484.

Rolim, G.S., Sentelhas, P.C., Barbieri, V., 1998. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. Revista Brasileira de Agrometeorologia 6, 133-137.

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., CK Tripp, P., Kistler, R., En, J. W., D Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y. T., Chuang, H. Y., Juang, H. M. H., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., T, P. V. D., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., E Meng, J., Wei, H., Anyang, R., Lord, S., Van Den Dool, H., Kumar, A., U Wang, W., Long, C., Iah, M. C., Xue, Y., N Huang, B., Schemm, J. K., Ey Ebisuzaki, W., LIn, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C. Z., Liu, Q., CHEN, Y., HAN, Y., CUCURULL, L., Reynolds, R. W., Rutledge, G., Goldberg, M., 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis. American Meteorological Society 91, 1015–1057. doi: 10.1175/2010BAMS 3001.1.

Sales, E.S.G., 2019. Classificação de áreas semiáridas e subúmidas secas utilizando diferentes índices climáticos. Dissertação (Mestrado). Campina Grande, UFCG.

Salles, L. A., 2012. Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pipiriau. Dissertação (Mestrado). Brasília, UNB.

Santhi, C, Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R., Hauck, L.M., 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. Journal of the American Water Resources Association 37, 1169-1188.

Santos, J.T.S., Sousa, A.M.L., Nunes, H.G.G.C., Pontes, A.K., Silva, P.V, C., 2018. Estimativa dos componentes do balanço hídrico na sub-bacia do rio Arapepó com o modelo SWAT. Revista de Geografia 35, 103-16.

Silva, M.T., 2014. Mudança no uso de solo e no aporte de sedimentos na baca hidrográfica do submédio Rio São Francisco. Tese (Doutorado). Campina Grande, UFCG.

Silva, M.T., Azevedo, P.V., Silva, V.P.R., Nobrega, B.K.S., Mariano, E.B., Amorim, M.R.B., 2017. Estimativa da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do submédio rio São Francisco. Journal of Environmental Analysis and Progress 2, 203-211. doi: 10.24221/jeap.2.3.2017.1430.203-211.

Silva, M.T., Silva, V.P.R, Sousa, E.P., Araújo, A.L., 2015. SWAT model application to estimate the flow in the basin of lower-middle São Francisco River. Revista Brasileira de Geografia Física 8, 1615-1627.

Silva, R.M., Santos, C.A.G., 2008. Estimativa da produção de sedimentos mediante uso de um modelo hidrossedimentológico acoplado a um SIG. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 12, 520–526.

Silva, V.P.R., Silva, M.T., Singh, P., Souza, E.P., Braga, C.C., Holanda, R.M., Almeida, R.S.R., Sousa, F.A.S., braga, A.C.R., 2018. Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. CATENA 162, 166-176. doi: 10.1016/j.catena.2017.11.024.

Silva, V.P.R., Silva, M.T., Souza, E.P., 2016. Influence of land use change on sediment yield: a case study of the sub-middle of the São Francisco River Basin. Engenharia Agrícola (Online) 36, 1005-1015.

Silva, V.P.R., Sousa, F.A.S., Cavalcanti, E.P., Souza, E.P., Silva, B.B., 2006. Teleconnections between sea-surface temperature anomalies and air temperature in northeast Brazil. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 68, 781-792. doi: 10.1016/j.jastp.2005.12.002.

Srinivasan, V.S., Santos, C.A.G., Galvão, C.O., 2003. Erosão hídrica do solo no semi-árido brasileiro: A experiência na bacia experimental de Sumé. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 8, 57-73. doi: 10.21168/rbrh.v8n2.p57-73.

Taveira, I.M.L.M., 2012. Avaliação de alternativas de uso do solo através de simulação hidrossedimentológica da bacia representativa de Sumé com o modelo SWAT. Dissertação (Mestrado). Campina Grande, UFCG.

Thornthwaite, C.W., Mather, J.R., 1955. The water balance. Publication in Climatology, Laboratory of Climatology, Centerton.

Tripathi, M.P., Panda, R.K., Raghuwanshi, N.S., 2003. Identification and prioritization of critical sub-watersheds for soil conservation management using the SWAT model. Biosystems Engineering 85, 365-379. doi: org/10.1016/S1537-5110(03)00066-7.

Uzeika, T., 2009. Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre, UFRGS.

Van Liew, M.W., Veith, T.L., Bosch, D.D., Arnold, J.G., 2007. Suitability of SWAT for the Conservation Effects Assessment Project: Comparison on USDA Agricultural Research Service Watersheds. Journal of Hydrologic Engineering 12, 173-189. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:2(173).

Willmott, C.J. Ackleson, S.G., Davis, R.E., Feddema, J.J., Klink, K.M., Legates, D.R., O'donnell, J., Rowe, C.M., 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. Journal of Geophysical Research 90, 8995-9005.

Yang, Y., Wang, G., Wang, L., Yu, J., Xu, Z., 2014. Evaluation of Gridded Precipitation Data for Driving SWAT Model in Area Upstream of Three Gorges Reservoir. PLoS ONE 9, 15.

Zhang, S.H., Liu, S.X., Mo, X.G., Shu, C., Sun, Y., Zhang, C., 2011. Assessing the impact of climate change on potential evapotranspiration in Aksu River Basin. Journal of Geographical Science 21, 609-620. doi: 10.1007/s11442-011-0867-0.

Zhang, X., Ren, Y., Yin, Z.-Y., Lin, Z., Zheng, D., 2009. Spatial and temporal variation patterns of reference evapotranspiration across the Qinghai-Tibetan Plateau during 1971–2004. Journal of Geophysical Research 114, 14. doi: 10.1029/2009JD011753.