

# **AVALIAÇÃO DO EFEITO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA VAZÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NHUNDIAQUARA, SERRA DO MAR PARANAENSE**

*Evaluation of climate change effects on streamflow and sediment transport in the Nhundiaquara River Basin, Serra do Mar Paranaense*

**Bruna Daniela de Araujo Taveira\***  
**Irani dos Santos\*\***

**\*Universidade Federal do Paraná - UFPR / Curitiba, Paraná**  
brunattaveira@gmail.com

**\*\*Universidade Federal do Paraná - UFPR / Curitiba, Paraná**  
irani69@gmail.com

## **RESUMO**

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito do cenário climático futuro RCP 8.5 (IPCC, 2013) na vazão e no transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara, utilizando como ferramenta metodológica o modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). O efeito do cenário climático RCP 8.5 foi avaliado em dois períodos: futuro próximo (2060 a 2080) e futuro distante (2080 a 2100), e comparado com a série histórica (1994-2014). A variabilidade entre as séries climatológicas (histórica e futuras) apontaram o aumento de 20,5% na temperatura média mínima, de 6,3% na temperatura média máxima e a redução de 15% nas alturas de precipitação até o ano de 2100. Além disso, houve mudanças no volume e na frequência das chuvas, que se mostraram menores e mais frequentes nos cenários futuros do que na série histórica. O modelo SWAT foi calibrado e validado no período das séries observadas, apresentando índice de eficiência COE de 0,692 para vazão e 0,704 para sedimentos. Os resultados da simulação com os dados climáticos do cenário RCP 8.5 apontaram a redução de 20,6% na evapotranspiração real (ET) no futuro próximo e 8,3% no futuro distante, na evapotranspiração potencial (PET) a redução foi de 3,5% e 1,4% nos futuros próximo e distante, respectivamente. A vazão apresentou redução de 19,5% entre 2060 e 2080 e de 23,5% entre 2080 e 2100. Para vazão sólida, a redução foi de 15,4% no futuro próximo e 19,9% no futuro distante. De maneira geral, os resultados apontam que a redução na vazão e no transporte de sedimentos está mais associada às mudanças no volume e na frequência da precipitação, do que ao aumento da temperatura.

**Palavras-chave:** Cenários climáticos. SWAT. Vazão. Transporte de sedimentos.

## **ABSTRACT**

This research aims to evaluate the effect of the climate scenario RCP 8.5 (IPCC, 2013) on streamflow and sediment transport in the Nhundiaquara river basin (southern Brazil) using the hydrological model SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). The effect of the climate scenario was evaluated in two future periods: near future (2060 to 2080) and distant future (2080 to 2100) and then, compared with the historical series (1994-2014). The variability between the climatological series (historical and future) pointed the increase of 20% in the minimum temperature, and up of 6% in the maximum temperature, as well as a reduction of 15% in the volume of precipitation. Furthermore the distribution of the volume and frequency of the rain became smaller and less frequent in the future scenarios than in the historical series. The SWAT model was calibrated and validated in the period of historical series, showing an efficiency coefficient (COE) of 0,692 to runoff and 0,704 to sediments. The results of the simulation with future scenarios' data pointed the reduction of 20,6% to the actual evapotranspiration in the near future and 8,3% in the distant future. The potential evapotranspiration (PET) showed a reduction of 3,5% in the near future and of 1,4% in the distant future. The streamflow showed a reduction of 15,4% in the near future and of 19,9% on the distant future. Overall, the results indicate that the reductions in the streamflow and sediment transport are more related to changes of volume and frequency of precipitation than to the increase of temperature.

**Keywords:** Climate scenarios; SWAT; Streamflow; Sediment transport.

## 1. INTRODUÇÃO

Processos hidrológicos em bacias hidrográficas podem ser bastante sensíveis a mudanças na temperatura, precipitação, ou aumento no teor de CO<sub>2</sub> na atmosfera. A chuva e a evapotranspiração são as variáveis mais afetadas quando se trata de mudanças no sistema climático global, influenciando a disponibilidade hídrica e o transporte de sedimentos em bacias hidrográficas (PERAZZOLI et al., 2013). Com isso, os efeitos de mudanças no clima têm sido estudados em diferentes condições ambientais em bacias hidrográficas localizadas em distintas partes do planeta, a exemplo de Darren et al. (2009); Iensen et al. (2014); Oyang et al. (2015); Htut e Shrestha (2015).

Tendo em vista a relevância dos estudos do clima e seus impactos em processos ambientais, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) desenvolve periodicamente projeções de emissão de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera no sentido de fomentar a elaboração de diferentes cenários climáticos futuros. As projeções desenvolvidas pelo IPCC são pautadas em fatores como o crescimento populacional, desenvolvimento de tecnologia, mudanças no sistema de geração e uso de energia, e uso e aproveitamento da terra (WAYNE, 2013). É nesse contexto que se encontra o cenário RCP 8.5 avaliado no quinto relatório de mudanças climáticas (AR5) (IPCC, 2013). Esse cenário caracteriza uma realidade futura “pessimista” em relação aos demais cenários do grupo AR5, uma vez que é pautado numa realidade de alta emissão de GEE e apresenta o maior incremento na temperatura. A história de futuro desse cenário, relativa ao crescimento demográfico, desenvolvimento econômico e mudanças tecnológicas, pode ser considerada como uma revisão e atualização da história de futuro do cenário A2, do *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES) publicado pelo IPCC no ano de 2000 (RIAHI et al., 2007).

Diversos modelos têm sido utilizados como ferramenta para avaliar o efeito de mudanças climáticas no ciclo hidrológico e hidrossedimentológico em bacias hidrográficas, entre eles destaca-se o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). O modelo SWAT consiste em um modelo hidrológico semidistribuído, contínuo no tempo e espaço e fisicamente baseado em processos. Pode ser utilizado para a construção da representação de um sistema hidrológico em nível de bacia hidrográfica, possibilitando a avaliação de diferentes configurações ambientais no ciclo hidrossedimentológico (ABBASPOUR et al., 2015).

Na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara, localizada na região da serra do mar paranaense, a dinâmica da vazão e do transporte de sedimentos possui características particulares em decorrência da combinação de fatores ambientais como relevo acidentado, vegetação densa e altos índices pluviométricos. Cadeias de montanhas com pluviosidade elevada resultam, geralmente, em fontes promissoras de material intemperizado, em montanhas localizadas em regiões de clima temperado, por exemplo, a ocorrência de neve é um fator determinante na dinâmica dos sedimentos, enquanto que em montanhas localizadas em países tropicais a precipitação pluviométrica é mais importante (BOGEN, 1995). Na serra do mar paranaense, a elevada pluviosidade e relevo montanhoso condicionam os processos hidrogeomorfológicos, assim, salienta-se a importância em avaliar a resposta da bacia hidrográfica a diferentes cenários climáticos, no sentido de identificar como possíveis alterações no clima podem interferir na vazão e no transporte de sedimentos.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar os efeitos de mudanças climáticas projetadas no cenário RCP 8.5 (IPCC, 2013) na vazão líquida e transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara no período entre 2060-2100, comparando com as condições históricas entre 1994-2014.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

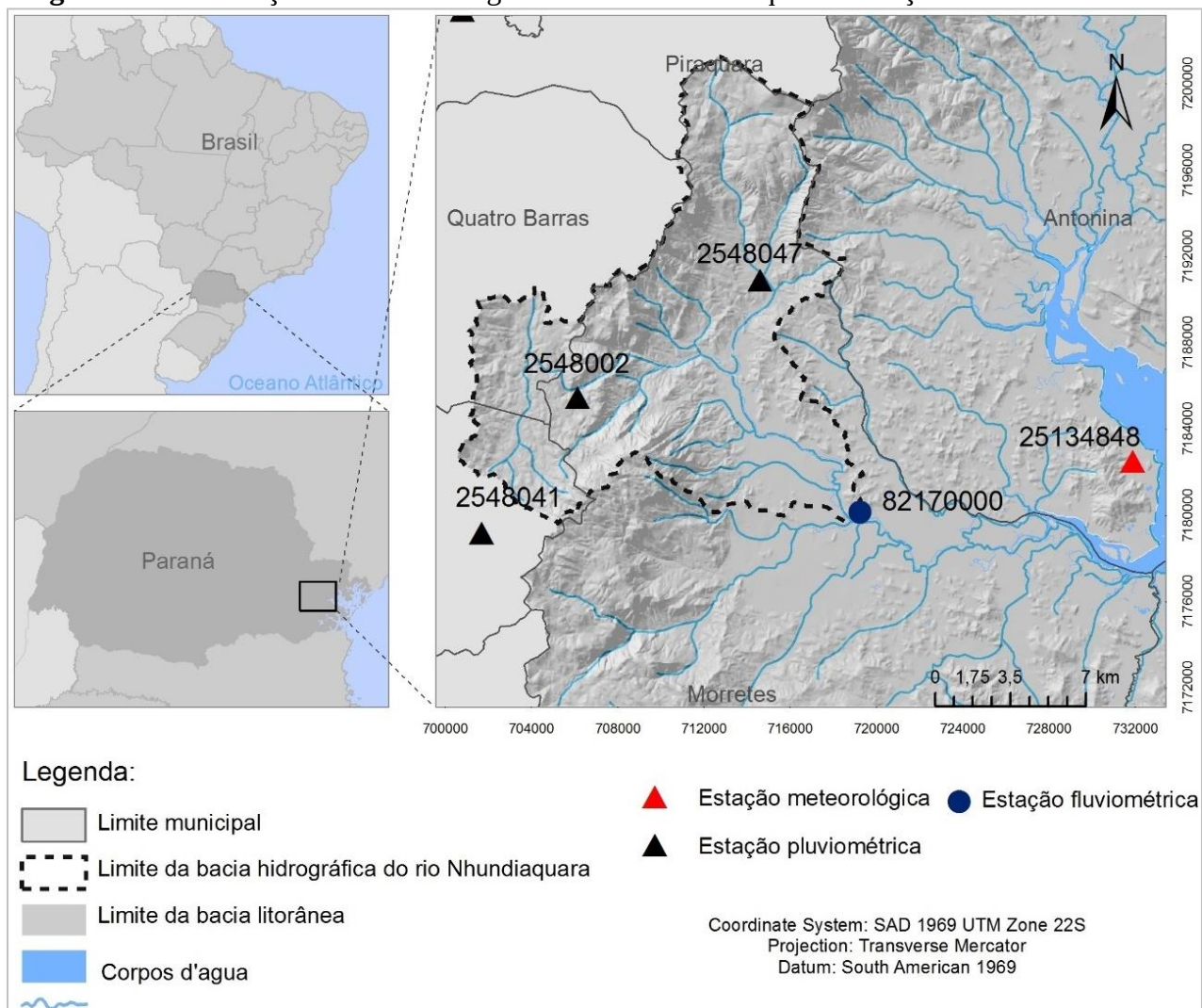
### 2.1. Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara está localizada na região Leste do estado do Paraná, compondo parte da área de drenagem da Baía de Antonina. A bacia possui, em sua totalidade, uma área de 520 km<sup>2</sup> que abrange os municípios de Morretes, Piraquara e Quatro Barras. Neste trabalho a área da bacia foi considerada até a estação de monitoramento Morretes, localizada a 25°28'S e 48°49'O, com área de drenagem de 215 km<sup>2</sup> (Figura 1).

A bacia do rio Nhundiaquara encontra-se numa região de transição entre a serra do mar e o litoral paranaense, com altitudes que variam de 0 a 1.500 metros, configurando um relevo com grandes declividades, solos pouco profundos e ocorrência de afloramentos rochosos nas áreas mais íngremes (IPARDES, 1989).

O clima da região é classificado como Cfa, subtropical com verões quentes, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger. Altos índices pluviométricos são comuns na região, principalmente nas maiores altitudes que possuem registros de aproximadamente 3.000 mm por ano, em decorrência do efeito orográfico que ocorre nos meses de verão.

**Figura 1** – Localização da bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara e estações de monitoramento



Grande parte da bacia está inserida em área de proteção ambiental, sendo predominante a presença de vegetação natural de Floresta Ombrófila Densa (F.O.D) em estágio médio ou avançado de desenvolvimento. Nas áreas mais próximas a planície a situação de uso e ocupação da terra consiste em pequenas propriedades agrícolas com pastagens, e áreas urbanizadas de baixa densidade, conforme apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1** – Classes de uso da terra na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara

| Uso da terra                       | Área da bacia (%) |
|------------------------------------|-------------------|
| F.O.D em estágio médio ou avançado | 77,2              |
| F.O.D em estágio inicial           | 5,5               |
| Pastagem                           | 7,4               |
| Campos de Altitude                 | 4                 |
| F.O.D aluvial                      | 3,2               |
| Corpos hídricos                    | 0,8               |
| Áreas urbanizadas                  | 0,6               |
| Estradas                           | 0,4               |
| Agricultura                        | 0,3               |

Os solos que apresentam predominância na bacia hidrográfica são o Neossolo litólico e o Cambissolo. Conforme Paula (2010), o Neossolo encontra-se na região de serra, com relevo declivoso e vales rochosos com configuração vegetal de floresta em estágio médio e avançado, enquanto que os Cambissolos se encontram distribuídos em toda a bacia, em áreas de relevo ondulado até áreas de relevo plano e suave ondulado, com usos diversificados. A abrangência de cada tipo de solo é apresentada na Tabela 2.

**Tabela 1** – Tipos de solos na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara

| Solos <sup>1</sup>                                        | Área da bacia (%) |
|-----------------------------------------------------------|-------------------|
| Neossolo litólico e afloramentos rochosos                 | 31,6              |
| Cambissolo háplico associado a argissolo vermelho-amarelo | 21                |
| Cambissolo háplico associado a neossolo litólico          | 20,1              |
| Cambissolo flúvico                                        | 11,7              |
| Cambissolo háplico                                        | 11,5              |
| Gleissolo háplico associado a cambissolo flúvico          | 0,8               |
| Gleissolo háplico                                         | 1,34              |
| Organossolo fólico                                        | 0,7               |
| Gleissolo háplico associado a neossolo flúvico            | 0,5               |

## 2.2. Cenários Climáticos

O cenário RCP 8.5 foi idealizado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), e avaliado no quinto relatório de mudanças climáticas (AR5) (IPCC, 2013). O cenário de projeções de gases de efeito estufa (GEE) RCP 8.5 foi desenvolvido com o modelo MESSAGE por meio do método *Integrated Assessment Framework*, pelo Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados (IIASA). O cenário tem como característica o aumento progressivo de emissão de GEE na atmosfera ao longo do século XXI, representando uma situação futura “pessimista” de alta emissão de gases estufa (RIAHI et al., 2011).

As projeções de emissões de GEE são utilizadas em modelos globais de circulação para elaboração dos cenários que dispõem de dados em escala diária ou mensal de variáveis climáticas para o futuro. Neste trabalho, as variáveis climáticas precipitação ( $\text{mm.dia}^{-1}$ ), temperatura mínima e máxima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) e radiação solar ( $\text{MJ.km}^{-2}$ ) provêm da média dos resultados gerados pelos modelos CSIRO-MK3-6-0 (COLLIER et al., 2011); FIO-ESM (BAO et al., 2012); GFDL-CM3/GFDL

ESM2M (DUNNE et al., 2012); GISSER H/ GISSER R (MILLER et al., 2014); IPSL CMSA-LR (DUFRESNE et al., 2013); MIRO-C5/MIROC-ESM-CHEM (WATANABE et al., 2011); MRI CGM3 (YUKIMOTO et al., 2012); NORESM1-M (BENTSEN et al., 2013). Os dados foram compilados e regionalizados para a América do Sul por meio do programa *WEPP/ SWAT Future Climate Input File Generator* (TROTOCHAUD, 2014). A localização base para obtenção dos dados regionalizados foi dada pelo par de coordenadas da estação pluviométrica São João da Graciosa (25°23'19"S; 48°51'30"O).

Para avaliar a resposta hidrológica da bacia aos cenários climáticos futuros foram adotados dois períodos do cenário RCP 8.5: futuro próximo (2060 a 2080) e futuro distante (2080-2100). Os dados simulados de vazão e transporte de sedimentos sob a influência do cenário em ambos períodos foram comparados com dados monitorados na bacia no período de 1994 a 2014.

### 2.3. Modelo SWAT

A parametrização espacial do modelo é feita em sub-bacias, que são delimitadas automaticamente a partir do Modelo Digital do Terreno (MDT) da área de estudo. As sub-bacias são então compartimentadas em unidades de resposta hidrológica (*Hydrologic Response Units -HRU*) que consistem em uma combinação única de características físicas ambientais da área (relevo, solo, uso da terra). Os processos são simulados primeiramente para cada HRU, que agregadas formam as sub-bacias. Posteriormente, os fenômenos são modelados em cada sub-bacia e propagados até o exutório.

No presente trabalho a bacia do rio Nhundiaquara foi subdividida em 1.334 HRU's e 55 sub-bacias com área média de 4 km<sup>2</sup>. O modelo SWAT possibilita a escolha de métodos específicos para o cálculo de processos hidrológicos. Para este trabalho, o escoamento superficial foi calculado por meio do método da Curva Número (CN), a evapotranspiração potencial foi calculada pelo método de *Hargreaves* (1985), e o transporte de sedimentos foi estimado para cada unidade de resposta hidrológica por meio da equação universal de perda de solos (MUSLE).

### 2.4. Dados de Entrada

Para a simulação de processos hidrológicos no modelo SWAT é necessária a constituição de um banco de dados contendo as principais características ambientais da bacia hidrográfica relativas ao solo, vegetação, relevo, clima e uso da terra. Os principais parâmetros e dados de entrada detalhados encontram-se em Neitsch et al. (2011).

Os dados mapeados utilizados no modelo tiveram como fonte a base altimétrica do estado do Paraná, desenvolvida em conjunto por AGUASPARANÁ/COPEL (2011) na escala 1:50.000; a carta pedológica da área de drenagem da Baía de Antonina, elaborada por Paula (2010) em escala 1:50.000; e o mapeamento da vegetação do litoral do Paraná, elaborado por Britez et al. (2015). As grandezas relativas a propriedades hídricas do solo foram estimadas a partir de propriedades físicas dos solos descritas em EMBRAPA (1984) e Paula (2010).

A rede de monitoramento (Figura 1) possui uma estação fluviométrica, uma estação meteorológica e três estações pluviométricas. Os dados de vazão líquida e concentração de sedimentos utilizados na calibração do modelo são provenientes da estação fluviométrica Morretes (82170000) operada pelo Instituto das Águas do Paraná (AGUASPARANÁ). Os dados de concentração de sedimentos foram disponibilizados de acordo com as campanhas de medição realizadas na bacia, desde 1982, totalizando 119 medições até o ano de 2014. A descarga sólida total foi determinada pelo método de Colby (1957), descrito por Carvalho (2008).

Os dados climáticos diários de precipitação, temperatura, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa foram medidos na estação meteorológica Antonina (02513848) operada pelo Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR). Os dados pluviométricos adicionais são provenientes

das estações Mananciais da Serra (02548041); São João da Graciosa (02548047) e da estação extinta Véu de Noiva (02548002), operadas pelo AGUASPARANÁ.

## 2.5. Calibração do Modelo

A calibração do modelo foi realizada em escala mensal para o período de 1994 a 2004. Primeiramente foi realizada análise de sensibilidade dos parâmetros escoamento e transporte de sedimentos utilizando o software SWAT-CUP. Após a avaliação da sensibilidade, os parâmetros de entrada no modelo relativos ao escoamento e transporte de sedimentos foram variados até a obtenção de ajuste aceitável entre a série simulada e a série histórica monitorada. A validação do modelo foi realizada no período de 2005 a 2014, em que os parâmetros definidos na calibração foram utilizados para verificação.

Para avaliação da eficiência do modelo SWAT em representar as condições hidrológicas da bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara foram utilizados métodos estatísticos, bem como análise visual do fluviograma e sedimentograma. De acordo com Moriasi et al. (2007) os principais testes utilizados na avaliação do desempenho do modelo SWAT são: *Nash-Sutcliffe efficiency (COE)* (NASH AND SUTCLIFFE, 1970), *Percent Bias (PBIAS)* e *RMSE-observations standart deviation ratio (RSR)* (MORIASI et al., 2007). Moriasi et al. (2007) apresentam intervalos de valores que indicam diferentes níveis de eficiência do modelo SWAT na escala de tempo mensal (Tabela 3).

**Tabela 2** – intervalos de valores para mensuração da eficiência do modelo SWAT em escala de tempo mensal

| Performance  | RSR                       | COE                       | PBIAS (%)                    |                              |
|--------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|
|              |                           |                           | Sedimento                    | Vazão                        |
| Muito bom    | $0,00 \leq RSR \leq 0,50$ | $0,75 \leq NSE \leq 1,00$ | $PBIAS < \pm 10$             | $PBIAS < \pm 15$             |
| Bom          | $0,50 < RSR \leq 0,60$    | $0,65 < NSE \leq 0,75$    | $\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$ | $\pm 15 \leq PBIAS < \pm 30$ |
| Satisfatório | $0,60 < RSR \leq 0,70$    | $0,50 < NSE \leq 0,65$    | $\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$ | $\pm 30 \leq PBIAS < \pm 55$ |

Fonte: Adaptado de MORIASI et al. (2007).

O *COE* (Equação 1) pode variar de  $-\infty$  a 1, sendo 1 o ajuste perfeito. De acordo com Moriasi et al. (2007) valores acima de zero geralmente representam níveis aceitáveis da performance do modelo. O coeficiente de *Nash-Sutcliffe* é obtido por meio de:

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{med})^2} \quad (1)$$

sendo que  $Y_i^{obs}$  é o valor do evento observado no dia  $i$ ,  $Y_i^{sim}$  é o valor do evento simulado no dia  $i$  e  $Y^{med}$  é a média dos eventos observados.

O coeficiente *PBIAS* mede a tendência média do dado simulado em superestimar ou subestimar os dados observados. Valores do percentual *PBIAS* mais próximos de zero indicam melhor eficiência do modelo, sendo zero indicativo de ajuste perfeito. O coeficiente é determinado por:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \quad (2)$$

O índice *RSR* é determinado baseando-se no desvio padrão dos dados observados. Comumente, valores mais baixos indicam boa performance do modelo, sendo o valor zero indicativo de melhor ajuste. O índice *RSR* é dado por:

$$RSE = \frac{\left[ \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \right]}{\left[ \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{med})^2} \right]} \quad (3)$$

Após a calibração e validação do modelo em representar as condições históricas de vazão e transporte de sedimentos na bacia do rio Nhundiaquara, foram inseridos os dados climáticos do cenário RCP 8.5 para o período de 2060-2080 e 2080-2100, e os resultados dessas simulações foram comparadas com às series históricas de 1994 a 2014.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Calibração do modelo SWAT

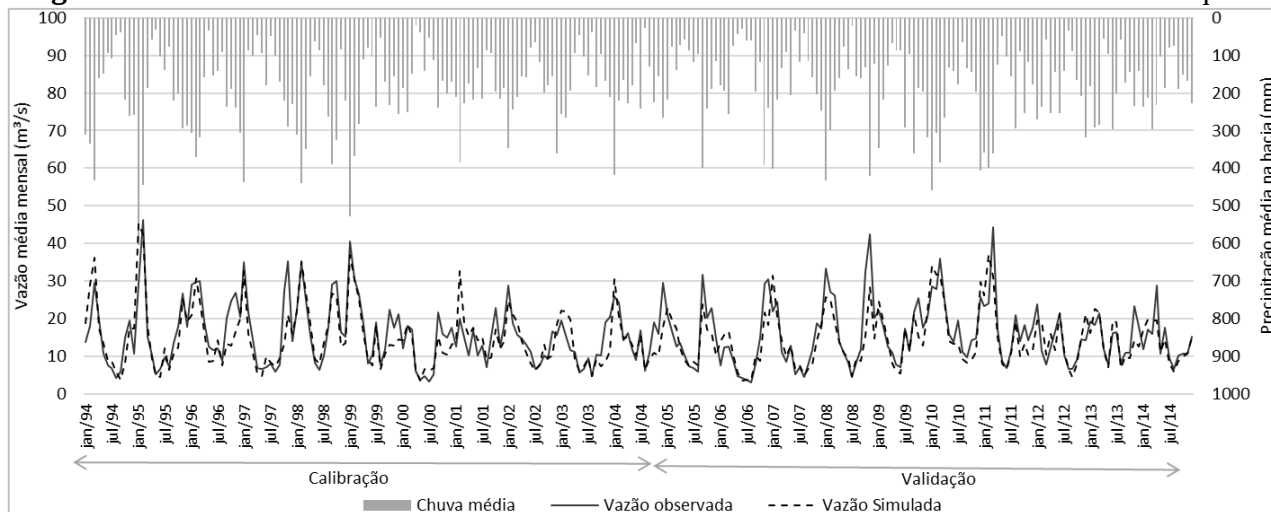
A análise da sensibilidade apontou maior sensibilidade de cinco parâmetros relativos ao escoamento: (Alpha-bf; Gw\_revap; Sol\_awc; Canmx; Revapmn) e dois parâmetros relativos ao transporte de sedimentos: (Usle\_p e Slope\_hru). O resultado da calibração foi satisfatório de acordo com os valores obtidos nos índices de eficiência calculados (Tabela 4).

**Tabela 3** – Índices de eficiência obtidos na simulação da vazão e transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara

| Período                  | Vazão      |            |              | Sedimento  |            |              |
|--------------------------|------------|------------|--------------|------------|------------|--------------|
|                          | <i>NSE</i> | <i>RSR</i> | <i>PBIAS</i> | <i>NSE</i> | <i>RSR</i> | <i>PBIAS</i> |
| Calibração (1994-2004)   | 0,692      | 0,555      | 5,754        | 0,704      | 0,544      | -6,589       |
| Verificação (2005 -2014) | 0,672      | 0,573      | 6,589        | 0,571      | 0,655      | -3,93        |

A vazão mensal simulada possui boa concordância com a série histórica (Figura 2). A vazão simulada apresentou média de  $15,86 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , enquanto que a média da série observada foi de  $15,04 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Na análise de regressão linear entre as vazões mensais observadas e simuladas para todo o período estudado apresentou um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,72$ .

**Figura 2** – Vazão mensal observada e simulada no modelo SWAT na bacia do rio Nhundiaquara

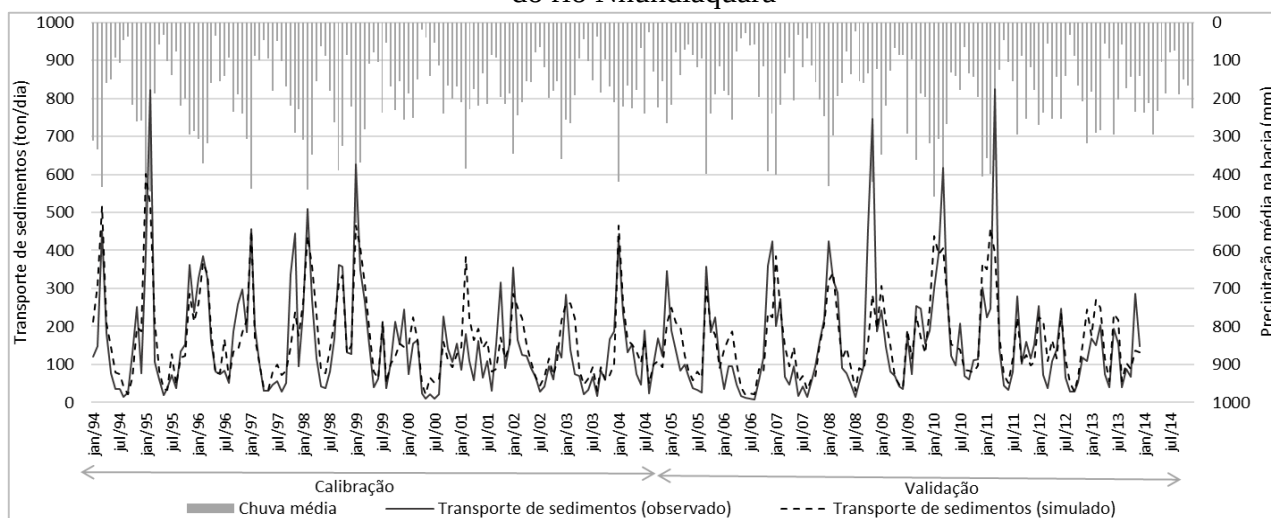




Com relação ao transporte de sedimentos, o modelo representou de forma satisfatória conforme constatado pelos índices de eficiência medidos. No sedimentograma (Figura 3) foi possível observar que os grandes picos de transporte de sedimentos ocorreram principalmente no verão, e foram subestimados pelo modelo SWAT. Por outro lado, o modelo apresentou a tendência em superestimar valores mais baixos, que apresentaram maior ocorrência na bacia.

A vazão sólida mensal simulada para o período da série histórica apresentou valor médio de 155 ton/dia, enquanto que a vazão simulada no mesmo período apresentou valor médio de 174 ton/dia. Na análise de regressão linear entre as vazões sólidas mensais observada e simulada para todo o período estudado apresentou coeficiente de determinação  $R^2=0,7101$ .

**Figura 3** – Transporte de sedimentos mensal observado e simulado com o modelo SWAT na bacia do rio Nhundiaquara



### 3.2. Efeito das mudanças climáticas sobre o ciclo hidrossedimentológico

A análise comparativa das variáveis climáticas entre a série histórica e o cenário futuro demonstrou aumento da temperatura mínima média em 16,1% no futuro próximo (2060-2080) e em 20,8% no futuro distante (2080-2100) em relação à série histórica. Para a temperatura média máxima o aumento foi de 3,34% no futuro próximo e 6,3% no futuro distante. A tendência sazonal da temperatura é compatível com o período de referência, concentrando valores mais altos nos meses de verão e mais baixos nos meses de inverno (Tabela 5).

**Tabela 4** – Média mensal da temperatura mínima e máxima para a série histórica e o cenário climático futuro

| Mês       | Temperatura mínima (°C)      |                      |                      | Temperatura máxima (°C)      |                      |                      |
|-----------|------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|----------------------|
|           | Série histórica<br>1994-2014 | RCP 8.5<br>2060-2080 | RCP 8.5<br>2080-2100 | Série histórica<br>1994-2014 | RCP 8.5<br>2060-2080 | RCP 8.5<br>2080-2100 |
| Janeiro   | 20,0                         | 24,3                 | 25,2                 | 30,39                        | 32,9                 | 33,8                 |
| Fevereiro | 19,5                         | 24,3                 | 25,1                 | 30,03                        | 32,4                 | 33,3                 |
| Março     | 17,9                         | 22,6                 | 23,3                 | 27,77                        | 30,9                 | 31,7                 |
| Abril     | 15,4                         | 19,3                 | 20,1                 | 26,10                        | 28,1                 | 28,7                 |
| Mai       | 13,9                         | 16,2                 | 17,0                 | 24,42                        | 24,9                 | 25,7                 |
| Junho     | 13,2                         | 13,7                 | 14,7                 | 23,84                        | 22,2                 | 23,0                 |
| Julho     | 13,5                         | 13,8                 | 14,6                 | 24,24                        | 23,2                 | 23,9                 |
| Agosto    | 14,7                         | 16,3                 | 17,2                 | 25,06                        | 25,2                 | 26,1                 |
| Setembro  | 16,6                         | 18,3                 | 19,0                 | 26,21                        | 26,9                 | 27,6                 |
| Outubro   | 18,0                         | 21,0                 | 21,6                 | 27,63                        | 28,9                 | 29,8                 |



|          |      |      |      |       |      |      |
|----------|------|------|------|-------|------|------|
| Novembro | 19,1 | 21,8 | 22,5 | 29,74 | 30,3 | 31,3 |
| Dezembro | 20,0 | 22,5 | 23,3 | 30,72 | 31,1 | 31,9 |

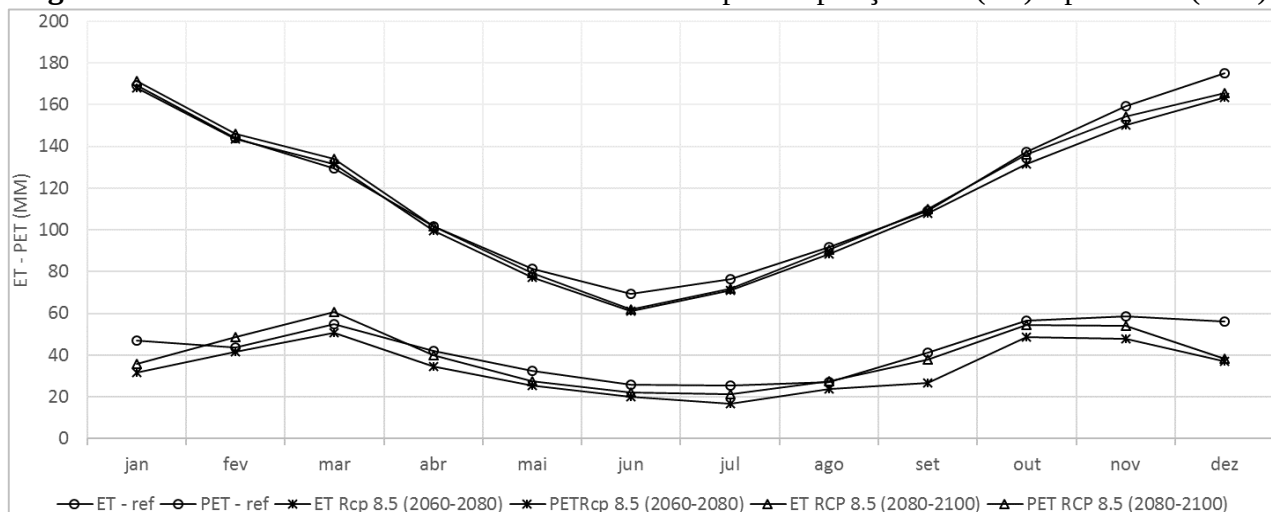
As precipitações projetadas para o futuro apresentam a mesma tendência sazonal da série histórica, com maior volume de chuvas nos meses de verão. Contudo, nos dois períodos futuros a precipitação apresentou valores mais baixos do que os valores registrados na série histórica, principalmente nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, em que há maior ocorrência do efeito orográfico (Tabela 6).

**Tabela 5** – Média mensal da precipitação para a série histórica e cenário climático futuro

| Mês         | Precipitação média mensal (mm) |                      |                      |
|-------------|--------------------------------|----------------------|----------------------|
|             | Série histórica<br>1994-2014   | RCP 8.5<br>2060-2080 | RCP 8.5<br>2080-2100 |
| Janeiro     | 402,5                          | 286,6                | 275,5                |
| Fevereiro   | 330,5                          | 302,5                | 295,3                |
| Março       | 283,7                          | 286,1                | 297,8                |
| Abril       | 156,3                          | 180,7                | 174,7                |
| Maio        | 118,4                          | 115,9                | 102,7                |
| Junho       | 142,9                          | 121,9                | 130,3                |
| Julho       | 164,4                          | 70,0                 | 67,7                 |
| Agosto      | 110,0                          | 93,7                 | 80,9                 |
| Setembro    | 222,1                          | 112,2                | 146,1                |
| Outubro     | 226,2                          | 261,9                | 251,9                |
| Novembro    | 258,1                          | 243,8                | 227,5                |
| Dezembro    | 281,6                          | 234,2                | 237,2                |
| Média Anual | 224,7                          | 192,4                | 190,6                |

As mudanças nos valores de temperatura e precipitação do cenário futuro refletiram no ciclo hidrossedimentológico e balanço hídrico na bacia do rio Nhundiaquara. Os resultados da simulação apontaram a redução da evapotranspiração real (*ET*) em 20,6% no período futuro próximo em relação ao período histórico e de 8,3% no futuro distante. A evapotranspiração potencial (*PET*) teve decréscimo de 3,5% no cenário futuro próximo em relação ao período histórico, e no cenário futuro distante a diminuição foi de 1,4% (Figura 4). A diferença entre nos valores de *ET* e *PET* no cenário futuro está relacionada à redução no volume de chuvas, pois a disponibilidade hídrica do solo afeta diretamente a *ET*, enquanto a *PET* depende exclusivamente das condições atmosféricas.

**Figura 4** – Efeito do cenário climático RCP 8.5 na evapotranspiração real (*ET*) e potencial (*PET*)



A redução da *ET* e *PET* no período futuro distante foi menor do que a redução verificada no futuro próximo, em decorrência do aumento gradativo da temperatura, que passa a exercer maior influência sob a evapotranspiração em detrimento das demais condições atmosféricas.

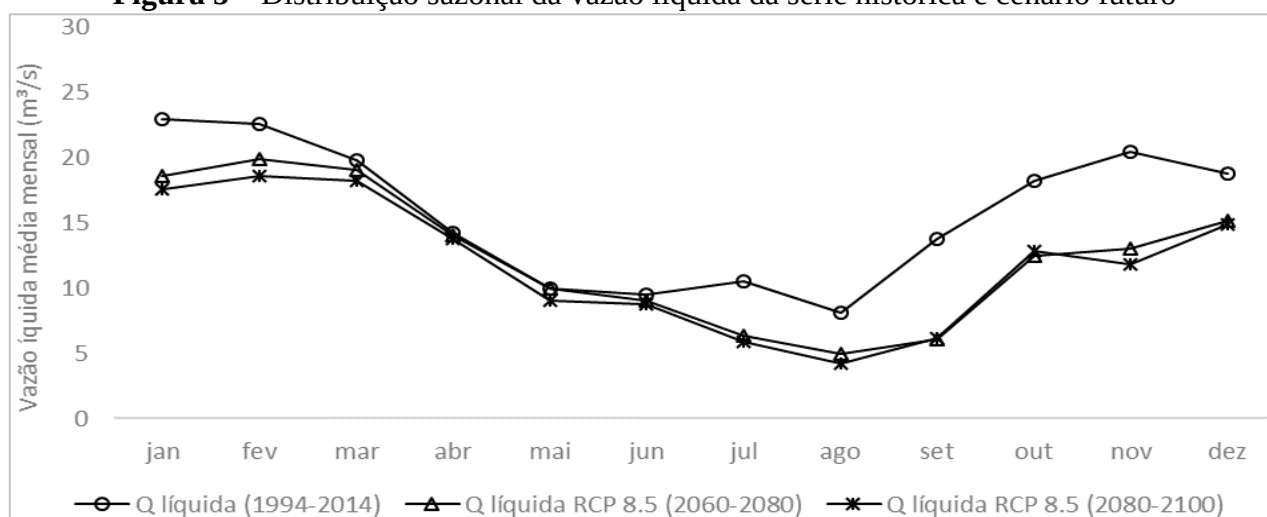
A redução média na evapotranspiração em decorrência da redução no volume de chuvas sob a influência de cenários climáticos de alta emissão de gases estufa foi verificada por Iensen et al. (2014) em bacia hidrográfica localizada no Norte do estado do Paraná. Por outro lado, o aumento na evapotranspiração em decorrência do aumento significativo da temperatura no cenário RCP 8.5 foi confirmado por Goulden et al. (2014) em bacias hidrográficas nos Estados Unidos, e por Hunke (2015) em bacia hidrográfica no Cerrado brasileiro.

Os efeitos do cenário climático RCP 8.5 na vazão líquida consistiram na redução da vazão média em 19,5% e 23,3% no cenário futuro próximo e futuro distante, respectivamente. Associou-se à mudança na vazão principalmente à diminuição na frequência da ocorrência de chuvas maiores, com média mensal entre 100 e 200 mm. Na série histórica a ocorrência de chuvas dessa magnitude se dá em até 30% do tempo, enquanto que nos cenários a ocorrência de meses com chuva média entre 100 e 200 limita-se a 20% do tempo. Nos cenários, de maneira geral, as chuvas são menores e mais distribuídas no tempo. Esse resultado está fortemente ligado à ocorrência de chuvas orográficas típicas da região da serra do mar, que podem não estar bem representadas nos cenários futuros.

Resultados semelhantes em condições brasileiras, com redução da vazão em cenários climáticos de alta emissão de gases estufa, foram encontrados por Perazzoli et al. (2013) e Oliveira et al. (2015).

A distribuição sazonal da vazão líquida (Figura 5) está ligada a sazonalidade das chuvas. Notou-se que nos meses de verão a média mensal da série histórica pode chegar a 400 mm (mês de janeiro), enquanto que nos cenários esse valor é até 30% menor entre 2080-2100. Nos meses de outono os valores de precipitação são mais semelhantes (Tabela 7) influenciando nos valores de vazão líquida (Figura 6). No inverno (período mais seco na região) a diferença entre os valores de precipitação média mensal da série histórica e cenários futuros volta a aumentar, refletindo também nos valores de vazão. Assim, os cenários apontam uma projeção de redução no volume de água na bacia mais significativa no período entre a estação mais seca (inverno) e a estação mais úmida (verão).

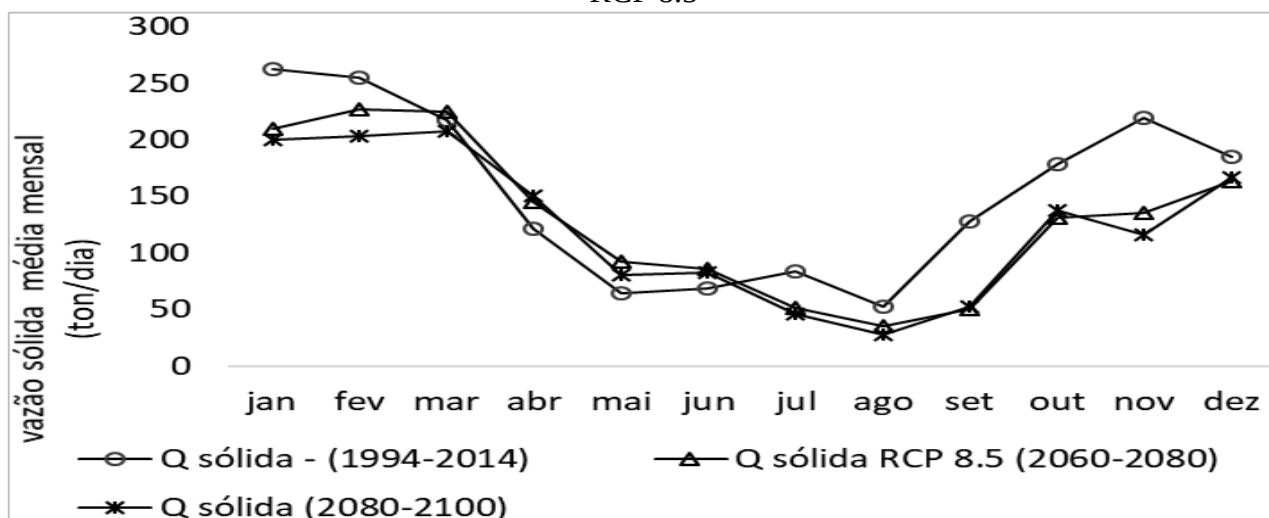
**Figura 5 – Distribuição sazonal da vazão líquida da série histórica e cenário futuro**



**Tabela 6 – Vazão líquida média mensal para a série histórica e cenário futuro**

| Cenário             | Vazão líquida média mensal (m³/s) |
|---------------------|-----------------------------------|
| Série histórica     | 15,4                              |
| RCP 8.5 (2060-2080) | 12,4                              |
| RCP 8.5 (2080-2100) | 11,8                              |

**Figura 6** – Sazonalidade da vazão sólida medida no período de referência e simulada no cenário RCP 8.5



O efeito do cenário climático RCP 8.5 resultou na redução na média de transporte de sedimentos em 15,4% e 19,9% para o futuro próximo e distante, respectivamente. A redução nos sedimentos ocorreu de acordo com a redução da vazão, ocasionada pela variação no volume e distribuição da precipitação previsto no cenário RCP 8.5. O aumento na frequência das menores precipitações pluviométricas ocasionou a redução nos eventos extremos influenciando na redução da média mensal do transporte de sedimentos.

De acordo com Carvalho (2008), 70% a 90% dos sedimentos é transportado na bacia hidrográfica em épocas de chuva, principalmente em eventos de grande intensidade. Sendo assim, a redução na magnitude das chuvas prevista no cenário climático RCP 8.5 é suficiente para causar a redução na média total da vazão sólida.

A sazonalidade no transporte de sedimentos na bacia (Figura 8) aponta maior redução entre o inverno e o verão, época em que o volume de chuvas na série histórica é bastante elevado. Em meses em que não há grande variação no volume de chuvas (março, abril, maio e junho) resultou que o transporte de sedimentos não foi alterado, pois a diferença entre a série histórica e o cenário futuro é desprezível, e faz parte da incerteza inerente aos modelos hidrológicos.

#### 4. CONCLUSÕES

- De maneira geral, o cenário RCP 8.5 caracterizou uma redução nos componentes do balanço hídrico da bacia do rio Nhundiaquara, iniciando pela diminuição nos volumes de precipitação em 15% até o final do século XXI. A redução na precipitação acarretou a diminuição da evapotranspiração real de 20,6% no futuro próximo e 8,3% no futuro distante e da evapotranspiração potencial de 3,5% no futuro próximo e 1,4% no futuro distante.
- Houve redução da vazão líquida média na bacia de até 23,3% no final do século XXI, sendo a redução da vazão máxima média a mais significativa (19,5% menor no futuro próximo e 23,1% menor no futuro distante). Essa redução está relacionada a diminuição da ocorrência e do volume de chuvas maiores, que são menos frequentes em ambos cenários futuros.
- O transporte de sedimentos na bacia reduziu em 15,4% no futuro próximo e 19,9% no futuro distante. Essa mudança está associada a redução na vazão máxima, principalmente nos meses de verão.
- O cenário climático futuro RCP 8.5 é citado na literatura disponível associado à problemas de disponibilidade hídrica, devido a redução da precipitação (HTUT e SHRESTHA, 2015; OLIVEIRA, et al., 2015), ou o aumento na evapotranspiração (GOULDEN e BALLES, 2014),

variáveis que podem diminuir a vazão em canais perenes. Assim sendo, evidencia-se a necessidade da avaliação dos demais cenários propostos pelo IPCC (2013), buscando analisar os possíveis resultados em comparação com outras pesquisas.

## NOTAS

<sup>1</sup> Levantamento realizado por Paula (2010).

## REFERÊNCIAS

INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ - AGUASPARANÁ e COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA - COPEL. Biblioteca virtual. **Mapas e dados espaciais**. Curitiba, 2011. <<http://www.aguasparana.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=78#>>. Acesso em: maio de 2015.

ABBASPOUR, K. C. et al. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal of Hydrology**, v. 524, p. 733-752, 2015.

BENTSEN, M. et al. The Norwegian earth system model, NorESM1-M Part 1: description and basic evaluation of the physical climate. **Geoscientific Model Development**, v. 6, n. 3, p. 687-720, 2013.

BOGEN, J. Sediment transport and deposition in mountain rivers. In: **Sediment and water quality in river catchment**. John Wiley & Sons, Chisester, 437– 451, 1995.

BRITEZ, R. M.; PRESTES, M.; MACHADO, M. A. Mapeamento da vegetação do litoral do Paraná. In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE UNIDADES DE CONSERVAÇÃO. **Anais...** Curitiba: Fundação Grupo Boticário, 2015.

CARVALHO, N de O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM. 372p. 2008.

COLBY, B. R. Relationship of unmeasured sediment discharge to mean velocity. **Transactions, Amer. Geophy. Union**, v. 38, n.5, p. 708-719.

COLLIER, M. A. et al. The CSIRO-Mk3. 6.0 Atmosphere-Ocean GCM: participation in CMIP5 and data publication. In: **International Congress on Modelling and Simulation–MODSIM**. 2011.

DARREN, L. F. et al. Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**. V. 374. p. 16-29. 2009.

DUFRESNE, J. L. et al. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. **Climate Dynamics**, v. 40, n. 9-10, p. 2123-2165, 2013.

DUNNE, J. P. et al. GFDL's ESM2 global coupled climate–carbon earth system models. Part I: Physical formulation and baseline simulation characteristics. **Journal of Climate**, v. 25, n. 19, p. 6646-6665, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná**. Curitiba, Embrapa/SNLCS/IAPAR, 1984. 791p. (Boletim Técnico, 57).

GOULDEN, M. L.; BALES, R. C. Mountain runoff vulnerability to increased evapotranspiration with vegetation expansion. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**. V.111 p. 14071-14075. 2014.

HTUT, A. Y.; SHRESTHA, S. Uncertainties in SWAT extreme flow simulation under climate change of the Bago River Basin in Myanmar. **Excellent Science in ASEAN**, p. 26. 2015.

HUNKE, P. P. **The brazilian Cerrado**: ecohydrological assessment of water and soil degradation in heavily modified meso-scale catchments. Dissertação (Mestrado) Institut für-und Umweltwissenschaften Arbeitsgruppe Okohydrologie. University of Potsdam 136 p. 2015.

IENSEN, I. R. R.; SCHULTZ, G. B.; SANTOS, I. Simulation of hydrosedimentological impacts caused by climate change in the Apucarantina River watershed, southern Brazil. **Sediment Dynamics from the Summit to the Sea** (Proceedings of a symposium held in New Orleans, Louisiana, USA, 11-14 December 2014) pp. 367-373. 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2013. The physical Science Basis**. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar5/>>. Acesso em: jul. de 2015.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL - IPARDES. Fundação Edison Vieira. **Zoneamento do Litoral Paranaense**. Curitiba, Convênio SEPL (Secretaria de Estado do Planejamento e Coordenação Geral), IPARDES. 175p. 1989.

MILLER, R. L. et al. CMIP5 historical simulations (1850–2012) with GISS ModelE2. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 6, n. 2, p. 441-477, 2014.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009**. Texas Water Resources Institute, 2011.

OLIVEIRA, V. et al. Modelling the potential impacts of climate change on streamflow in a headwater of the Grande River Basin, Southeastern of Brazil. SWAT CONFERENCE. **Anais...** Purdue: 2015. p.48.

OUYANG, F. et al. Impacts of climate change under CMIP5 RCP scenarios on streamflow in the Huangnizhuang catchment. **Stochastic environmental research and risk assessment**, v. 29, n. 7, p. 1781-1795, 2015.

PAULA, E. V. **Análise da Produção de Sedimentos na Área de Drenagem da Baía de Antonina/PR**: uma abordagem geopedológica. Tese (Doutorado em Geografia) Programa de Pós-Graduação em Geografia UFPR, 168 p. 2010.

PERAZZOLI, M.; PINHEIRO, A.; KAUFFMAN, V. Assessing the impact of climate change scenarios on water resources in southern Brazil. **Hydrological Sciences Journal**. V. 58. p. 77 – 87. 2013.

RIAH, K.; GRÜBLER, A.; NAKICENOVIC, N. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 74, p. 887-935, 2007.

RIAH, K. et al. RCP 8.5 - A scenario of high greenhouse gas emissions. **Clim. Change**, Springer, 109 (1-2), p. 33-57, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>.

TROTOCHAUD, J. **WEPP/SWAT Future Climate Input File Generator**: Instructions Manual A simplified process for obtaining future climate inputs for the WEPP or SWAT models. 2014. Relatório Técnico. Disponível em: [http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/ad\\_hoc/36021500WEPP/cligen/future/WEPP%20SWAT%20Future%20Climate%20Input%20File%20Generator%20ReadMe%201.1.pdf](http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/ad_hoc/36021500WEPP/cligen/future/WEPP%20SWAT%20Future%20Climate%20Input%20File%20Generator%20ReadMe%201.1.pdf). Acesso em: nov. de 2015.

WATANABE, S. et al. MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 4, p. 845, 2011.

WAYNE, G. P. Representative Concentrations Pathway. The beginners guide. **Skeptical Science**. V. 25. 2013.

YUKIMOTO, S. et al. A new global climate model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3 - model description and basic performance. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, v. 90, p. 23-64, 2012.

**Data de submissão:** 24.02.2017

**Data de aceite:** 27.05.2019

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.