

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA E ESTIMATIVA DE VAZÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAGUAI ATRAVÉS DE MODELAGEM NUMÉRICA E SENSORIAMENTO REMOTO

*Arthur Moreira de Abreu¹; Ana Carolina Zoppas Costi²; Daniel Medeiros Moreira³; Eduardo da
Silva Sacramento⁴; Janaina Gomes Pires da Silva⁵ & Lúcio Silva de Souza⁶*

RESUMO – Este artigo se propõe a apresentar um estudo para caracterização hidrológica e estimativa de vazões através de modelagem numérica e sensoriamento remoto para a caracterização de uma área de drenagem da estação fluviométrica de Cáceres. Essa estação faz parte da Rede Hidrometeorológica Nacional, é operada pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil – e fica localizada na Bacia do Rio Paraguai, região centro-oeste do País.

O uso de satélites nas estimativas de índices de precipitação pluviométricas está cada vez mais consolidado, com alto índice de confiabilidade na comparação com dados medidos, e um dos benefícios que esse tipo de estudo pode trazer é com relação aos sistemas de alerta, que exigem rápido tempo de resposta para os eventos. Um dos exemplos é o Sistema de Alerta na Bacia do Paraguai, no qual a informação por satélite pode contribuir de forma significativa.

A Bacia do Rio Paraguai está presente, além do Brasil, nos territórios do Paraguai, da Argentina e da Bolívia. E nós não temos informações hidrológicas (chuva e vazão) de fácil acesso de grande parte da bacia do rio Paraguai, pois essas regiões se encontram fora do território brasileiro.

Além disso, os dados adquiridos pelo satélite acompanharam de forma satisfatória o regime de variação de níveis registrado pelas estações *in situ*, sugerindo a possibilidade de utilizar esses dados como base para eventuais falhas nas estações convencionais.

ABSTRACT– This article proposes to present a study for hydrological characterization and flow estimation through numerical modeling and remote sensing for the characterization of a drainage area of the fluviometric station of Cáceres. This station is part of the National Hydrometeorological Network, operated by CPRM – Geological Service of Brazil – and is located in the Paraguay River Basin, in the central-western region of the country.

The use of satellites in the estimations of rainfall indexes is increasingly consolidated, with a high reliability index in comparison with measured data, and one of the benefits that this type of study can bring is in relation to alert systems, which require fast response time for events. One example is the Paraguay Basin Alert System, in which satellite information can make a significant contribution.

The Paraguay River Basin is present, besides Brazil, in the territories of Paraguay, Argentina and Bolivia. And we do not have hydrological information (rain and flow) that is easily accessible from most of the Paraguay River basin, since these regions are outside Brazilian territory.

In addition, the data acquired by the satellite satisfactorily followed the regime of variation of levels recorded by the stations *in situ*, suggesting the possibility of using this data as a basis for eventual failures in conventional stations.

Palavras-Chave – Sensoriamento; Hidrologia; Bacia

1) CPRM/SGB – Serviço Geológico do Brasil, e-mail: arthur.abreu@cprm.gov.br

2) CPRM/SGB – Serviço Geológico do Brasil, e-mail: ana.costi@cprm.gov.br

3) CPRM/SGB – Serviço Geológico do Brasil, e-mail: daniel.moreira@cprm.gov.br

4) CPRM/SGB – Serviço Geológico do Brasil, e-mail: edusacramento@aol.com

5) CPRM/SGB – Serviço Geológico do Brasil, e-mail: janaina.silva@cprm.gov.br

6) UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, e-mail: luciodesouza@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o monitoramento hidrológico básico é uma atividade de responsabilidade federal, que visa gerar informações para subsidiar os estudos e projetos que demandam o conhecimento da disponibilidade hídrica e potencial hidráulico das bacias brasileiras. Para atender a essa finalidade, o Brasil possui uma rede hidrometeorológica, sob responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA), a CPRM – Serviço Geológico do Brasil – opera pouco mais de 4.000 estações entre pluviométricas e fluviométricas, que corresponde a cerca de 80% da rede hidrometeorológica nacional. A operação se dá por meio do monitoramento de um conjunto de estações distribuídas por todo o país, que fornece dados quantitativos e qualitativos dos rios nacionais, índices pluviométricos e parâmetros climáticos. Com essas estações é possível mensurar o volume de chuvas, a evaporação da água, o nível e a vazão dos rios, a quantidade de sedimentos e a qualidade das águas em estações respectivamente relacionadas: pluviométricas, evaporimétricas, fluviométricas, sedimentométricas e de qualidade da água.

Apesar da quantidade de estações em operação, o país ainda carece de informação hidrológica básica, fato explicado em função de, atualmente, a rede brasileira ser quatro vezes menos densa do que as redes de países como os Estados Unidos. Sobre as questões de distribuição geográfica, segundo as recomendações da Organização Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization - WMO) (WMO, 1994), o Brasil possui uma má distribuição geográfica de estações hidrometeorológicas principalmente nas regiões Norte e Centro-oeste, a exemplo da bacia Amazônica e bacia do rio Paraguai segundo as normas da WMO seriam enquadradas em precariamente monitoradas.

Essa carência de monitoramento em algumas bacias hidrográficas no Brasil é justificada, em parte por dificuldades inerentes ao monitoramento hidrológico: alto custo envolvido para operar uma rede hidrometeorológica, acesso restrito a alguns pontos de interesse de monitoramento, com longas distâncias entre as estações e os grandes centros e ausência de uma rede viária adequada, sendo parte das estações acessada por transporte fluvial e até mesmo por transporte aéreo.

A ausência de informação hidrológica prejudica uma série de trabalhos de engenharia, como alertas de cheias e estudos de potenciais hidráulicos. Sendo o aprimoramento do monitoramento hidrológico nas Bacias Hidrográficas Brasileiras de fundamental importância para melhor a Gestão dos Recursos Hídricos.

Para solucionar esses problemas, em parte, algumas ferramentas podem ajudar a aprimorar e complementar o conhecimento hidrológico de bacias hidrográficas, entre elas o sensoriamento remoto e a modelagem hidrológica.

Assim o presente estudo visa apresentar dois produtos de informação hidrológica baseados em sensoriamento remoto, sendo primeiro relacionado à evapotranspiração e o segundo a dados de chuva.

Esses conjuntos de dados serão utilizados na caracterização hidrológica da bacia do rio Paraguai uma bacia transfronteiriça, parcialmente monitorada pela rede hidrometeorológica nacional, de difícil acesso, onde grande parte é feita por transporte fluvial, apresentando assim as potencialidades da tecnologia na obtenção de dados hidrometeorológicos. Os dados de chuva e evapotranspiração por fim serão aplicados em uma sub-região da bacia do rio Paraguai em um modelo hidrológico de forma a verificar a capacidade de essas entradas poderem simular dados de vazão.

2. ÁREA DE ESTUDO

No Brasil, a Bacia do Paraguai está localizada na região centro-oeste do país, mais precisamente nos estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Possui cerca de 850.000 Km² de extensão (onde 380.000 km² estão localizados no Brasil, um pouco menos da metade da extensão total) e abrange os biomas do Pantanal (região de planícies) e do Cerrado (região de planaltos). Além do Brasil, ela está presente nos territórios do Paraguai, da Argentina e da Bolívia.

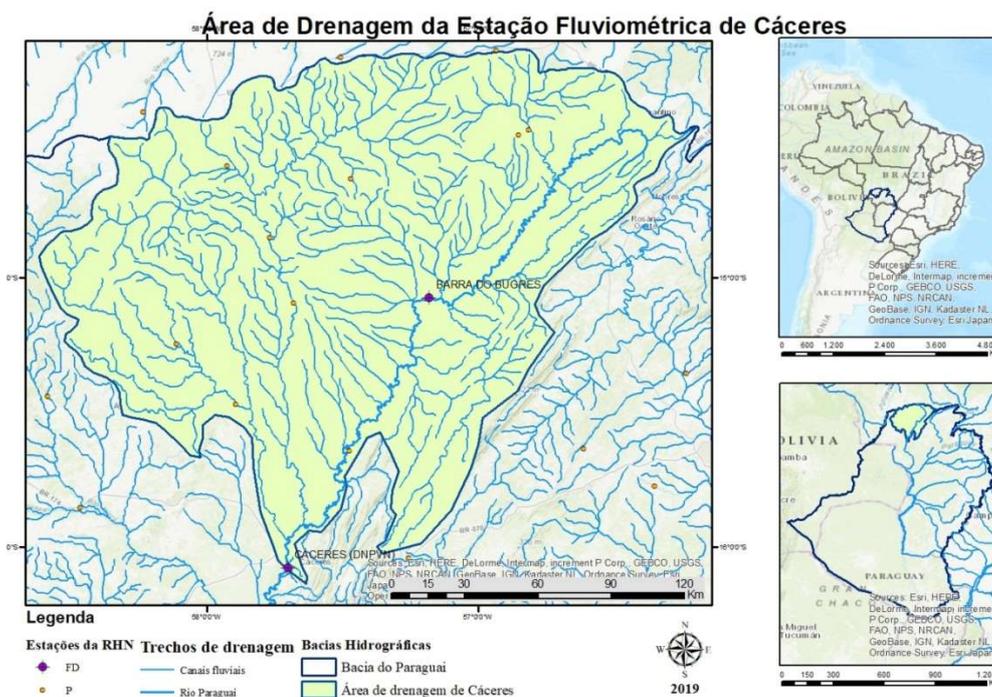


Figura 1 – Localização da Bacia do Rio Paraguai e área de drenagem da estação fluviométrica de Cáceres.

A área de drenagem a ser utilizada no estudo de vazões possui 32.000 Km², e foi utilizada como referência uma estação fluviométrica da CPRM – Serviço Geológico do Brasil – chamada Cáceres (código 66070004), conforme figura acima.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para análise dos dados de Evapotranspiração (ET) foram utilizados o conjunto de modelo operacional do Balanço de Energia de Superfície Simplificada (SSEBop) (Senay et al., 2012) de 2003

até 2018. A configuração do SSEBop é baseada na abordagem do Balanço Energético de Superfície Simplificado (SSEB) (Senay et al., 2011, 2013) com parametrização única para aplicações operacionais. Ele combina as frações de ET geradas a partir de imagens térmicas MODIS, adquiridas a cada 10 dias. A característica principal da parametrização SSEBop é usar condições de fronteira pré-definidas, sazonalmente dinâmicas, que são exclusivas para cada pixel para os pontos de referência "quente / seco" e "frio / úmido". A formulação original do SSEB é baseada nos princípios de pixels quentes e frios dos modelos SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998) e METRIC (Allen et al., 2007).

Os dados do SSEBop foram baixados via código computacional do site do Serviço Geológico Americano – USGS, o produto tem abrangência global, e disponibiliza a informação de evapotranspiração mensal com resolução espacial de 0.01 graus (USGS, 2019).

Para a informação de chuva foi utilizado o produto CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data), que é um conjunto de dados pluviométricos globais de mais de 30 anos. Abrangendo 50°S - 50°N (e todas as longitudes), começando em 1981 até os dias atuais, o CHIRPS incorpora imagens de satélite de resolução com dados de estação in-situ para criar séries temporais de chuva. Os dados do CHIRPS estão disponíveis em nível diário com resolução de 0.05 graus (UCSB GEOGRAPHY, 2019).

Os conjuntos de dados do CHIRPS e SSEBop foram processados e analisados de forma a caracterizar a sazonalidade hidrológica. Foram utilizadas ferramentas computacionais como GDAL e GMT para as análises e o software de geoprocessamento QGIS para elaboração dos mapas.

Para a informação de vazão foram utilizados dados da CPRM da estação de Cáceres que possui uma série de vazões calculadas desde 1965. A vazão máxima foi em Mar/1982 quando se calculou 2.659 m³/s, e a vazão mínima de 133 m³/s em Set/1967. O período de cheias ocorre normalmente entre fevereiro e março.

Para utilização dos dados baseados em sensoriamento remoto em simulações de vazão em Cáceres foi utilizado o *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP) (Lopes et al., 1981) que é um modelo determinístico, conceitual e concentrado de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão. A versão diária do modelo é constituída de três reservatórios matemáticos, cujas variáveis de estado são atualizadas a cada dia da seguinte forma:

$$\begin{aligned} R_{sub}(i+1) &= R_{sub}(i) + Rec - Eb \\ R_{solo}(i+1) &= R_{solo}(i) + P - Es - Er - Rec \\ R_{sup}(i+1) &= R_{sup}(i) + Es - Ed \end{aligned}$$

Onde:

R_{solo} = reservatório do solo (zona aerada)
[mm]

R_{sup} = reservatório da superfície da bacia
[mm]

Rsub = reservatório subterrâneo (zona saturada) [mm]

P = chuva [mm]

i = intervalo de tempo [dia]

Es = escoamento superficial [mm]

Ed = escoamento direto [mm]

Er = evapotranspiração real [mm]

Rec = recarga subterrânea [mm]

Eb = escoamento básico [mm]

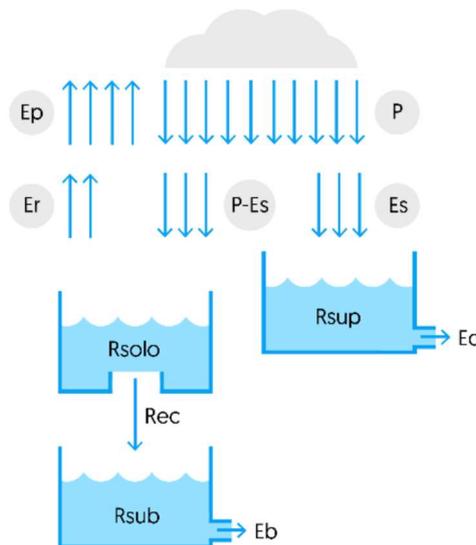


Figura 2 – Estrutura do Modelo SMAP diário. **Fonte:** Adaptada de Lopes (1999).

Finalmente o cálculo da vazão é dado pela seguinte equação:

$$Q = (Es + Eb) * Ad / 86.4$$

Onde:

Q= Vazão [m³/s]

Ad= Área de Drenagem km²

Es = escoamento superficial [mm]

Eb = escoamento básico [mm]

4. RESULTADOS

A partir do processamento dos dados do CHIRPS foi possível caracterizar o regime pluviométrico da bacia do Rio Paraguai, que está entre 360 e 1960 mm anuais, sendo as maiores frequências de chuva ocorrem justamente onde se encontra a área de contribuição da estação fluviométrica de Cáceres.

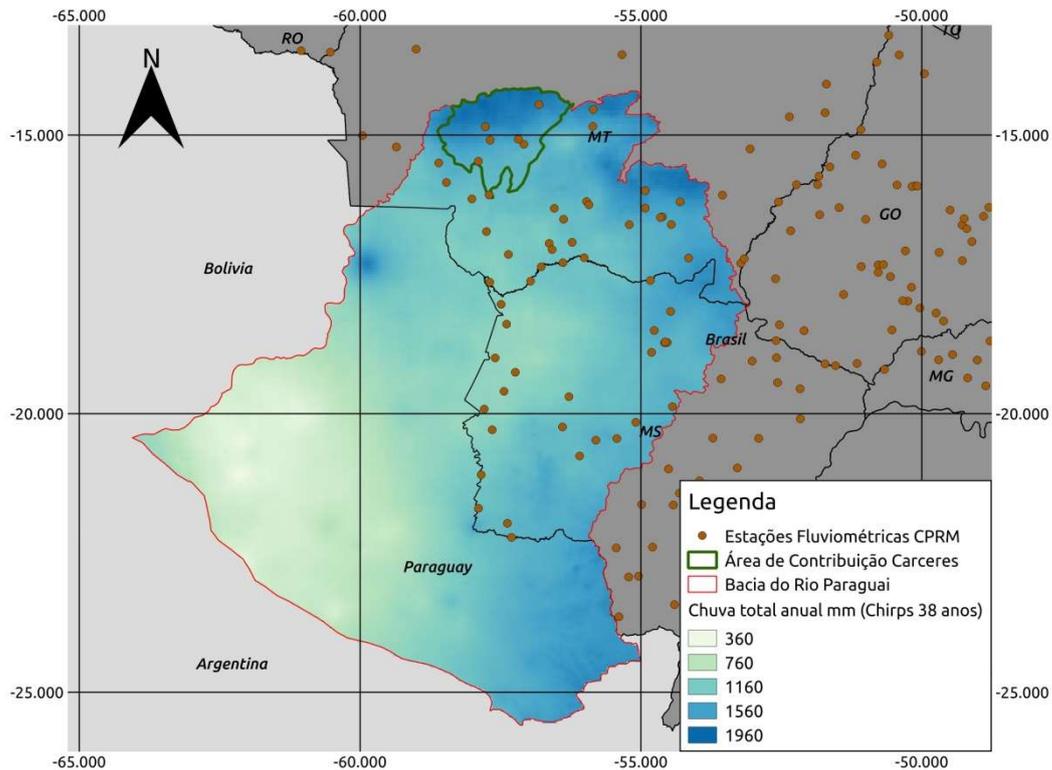


Figura 3 – Chuva total anual na bacia do Rio Paraguai

A partir do processamento dos dados do SSEBop foi possível caracterizar a evapotranspiração da bacia do Rio Paraguai, que está entre 290 e 1850 mm anuais, sendo as maiores frequências de chuva ocorrem na área central da bacia a jusante da área de contribuição da estação fluviométrica de Cáceres.

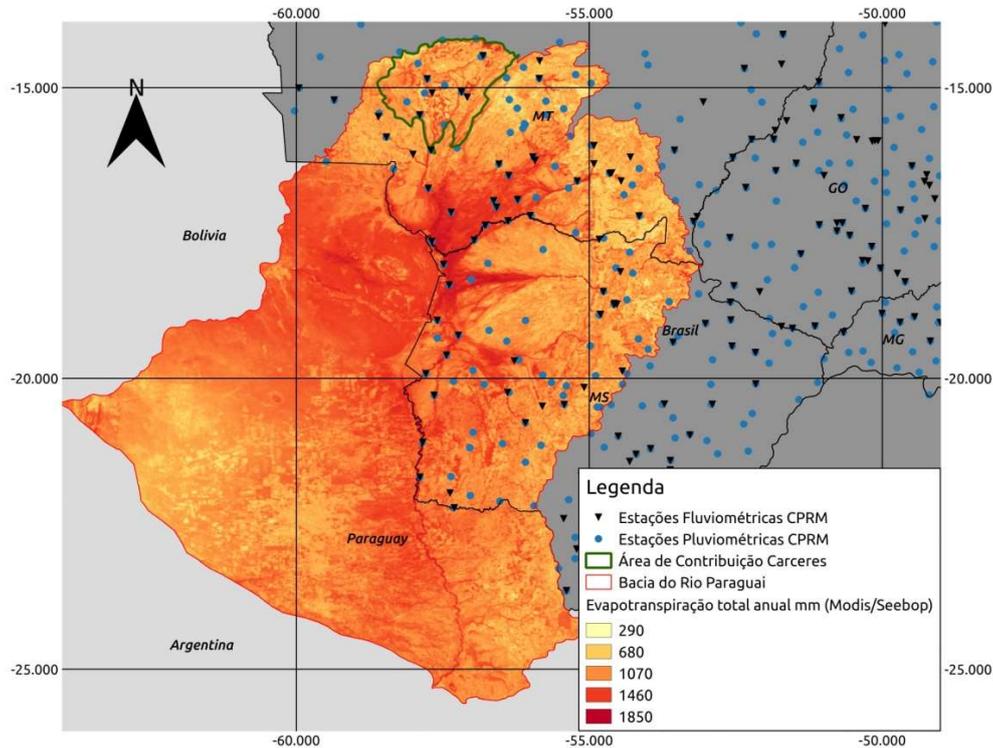


Figura 4 – Evapotranspiração total anual na bacia do Rio Paraguai

Os conjuntos de dados do SSEBop e CHIRPS foram acumulados em suas médias mensais para o período disponível e período comum da informação 2003-2018. Pelo CHIRPS foi possível notar baixa diferença entre as medias mensais nos períodos diferentes de acumulação e em comparação com dados do SSEBop para o período comum foi possível notar uma boa correlação entre a informação de 0.88 entre os conjuntos independentes de dados caracterizando o período úmido de outubro à março e período seco de abril a setembro.

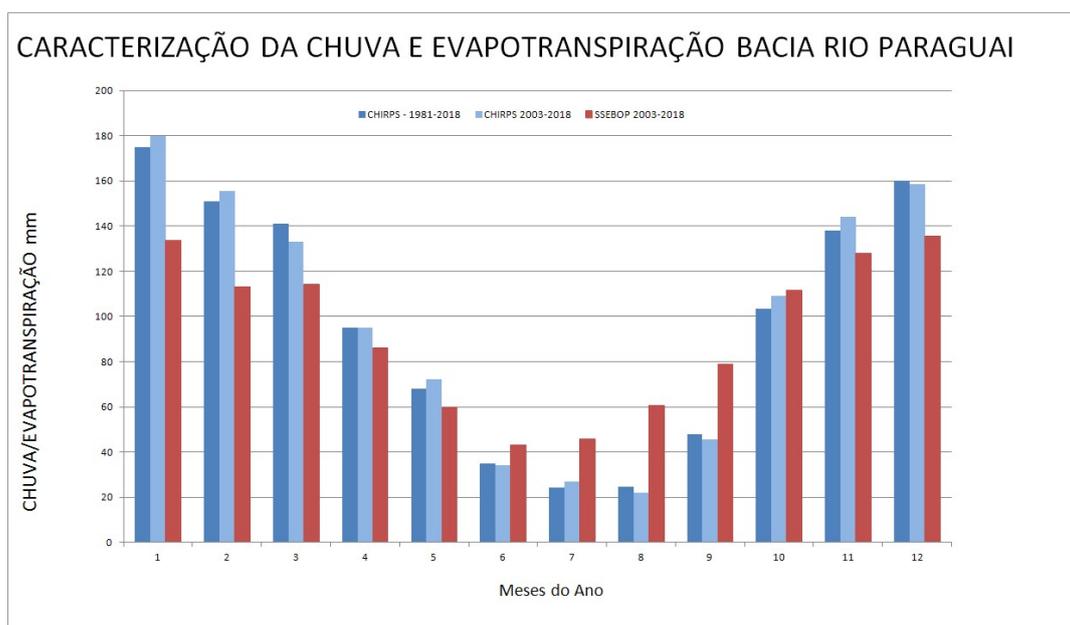


Figura 5 – Médias mensais de Chuva e Evapotranspiração na bacia do Rio Paraguai

Para a simulação de vazão primeiramente foram analisados em conjunto os dados de vazão da estação de Cárceres e os dados de chuva e evapotranspiração acumulados para a área de contribuição da estação. Foram analisadas as médias mensais para o período comum de dados de 2003 até 2018.

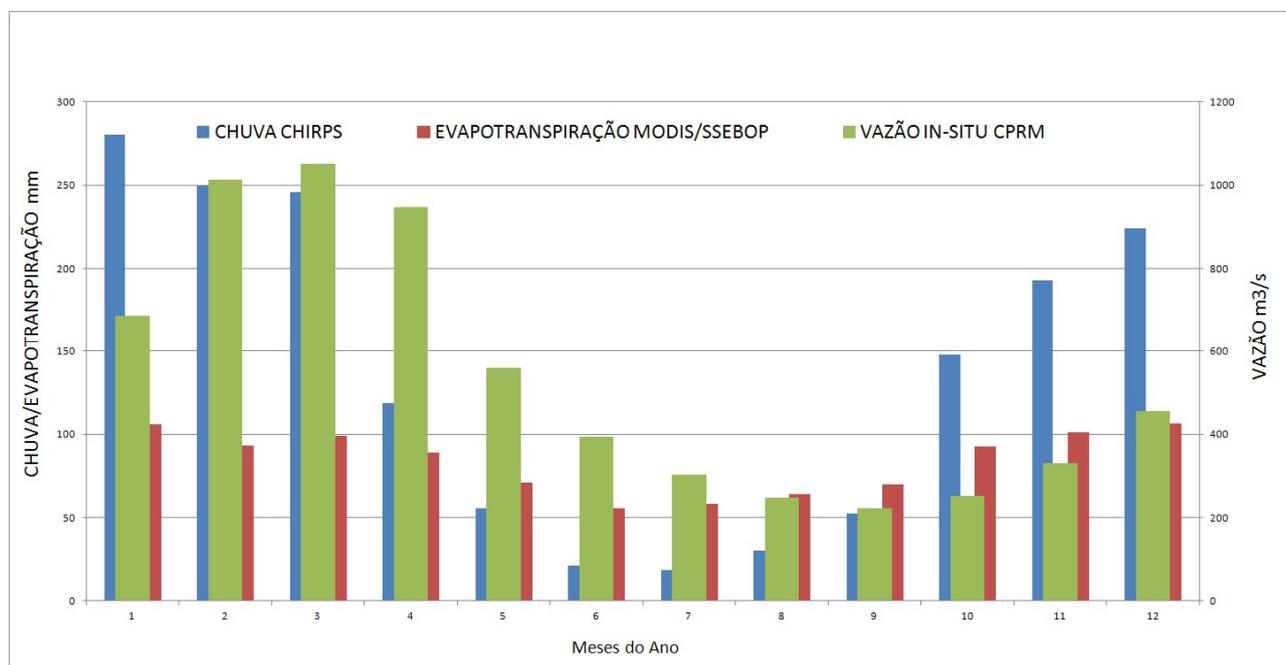


Figura 6 – Médias mensais de Chuva, Evapotranspiração e Vazão na área de contribuição de Cárceres.

Para o período total de 2003 a 2018 foram obtidos os totais anuais médios de evapotranspiração e chuva e a média anual de vazão. Os dados de vazão foram convertidos de m^3/s para mm, obtendo-se 521 mm/ano de vazão, 1005 mm/ano de evapotranspiração e 1635 mm/ano de chuva, caracterizando uma boa coerência entre os conjuntos de dados indicando uma estimativa de armazenamento de 109 mm/ano.

Os resultados do SMAP diários para o período de 2 anos de calibração e 2 anos de validação A função objetivo avaliada (FO1) para calibração buscou maximizar a eficiência (NSE) definida por Nash e Sutcliffe e obteve 0.75 de resultado.

Para medir a eficiência do modelo SMAP foi utilizado também a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) que dá o desvio padrão do erro de previsão do modelo (entre a série simulada e a observada) esse resultado para os anos de validação ficou compreendido em 182 m^3/s .

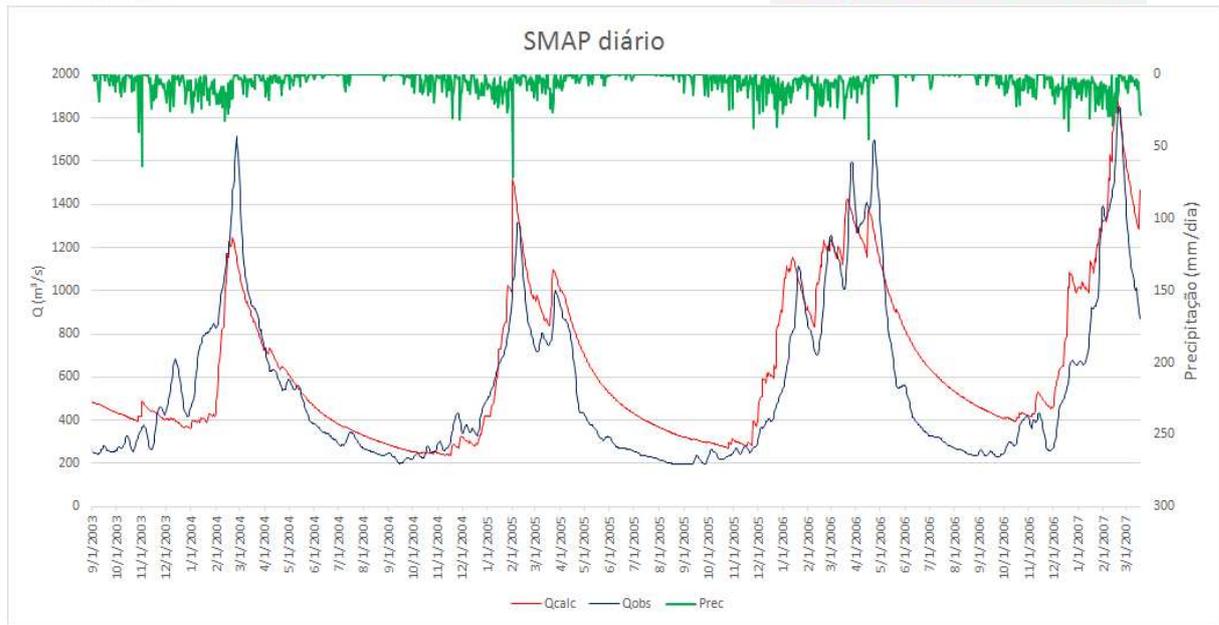


Figura 7 – Resultados da calibração e validação do SMAP.

5. CONCLUSÕES

Os conjuntos de dados baseados em sensoriamento hidrológico mostraram-se extremamente eficientes na caracterização das chuvas e da evapotranspiração da bacia do rio Paraguai e para a área de contribuição da estação de Cárceres. Para uma bacia transfronteiriça como a bacia do rio Paraguai, devido à dificuldade de existir uma rede integrada entre países para aplicação complementar de conjunto baseados em sensoriamento remoto, esses conjuntos ajudam a melhor espacializar e homogeneizar a informação hidrológica, servindo também para preenchimento de falhas que são inerentes ao monitoramento convencional.

Para simulação hidrológica realizada pelo SMAP, os resultados foram satisfatórios, mas a dificuldade de representar a propagação em uma grande bacia com um modelo concentrado, com muitas áreas de inundação indicou que talvez uma solução mensal do SMAP e a adição de um reservatório a mais na concepção do modelo, que represente esse armazenamento nas planícies de inundação poderiam trazer resultados mais satisfatórios para a simulação.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. ASCE J. Irrigation and Drainage Engineering 133, 380-394.

BASTIAANSEN, W.G.M., M. Menenti, R.A. Feddes, and A. A. M. Holtslag, 1998. The surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 1 formulation. *Journal of Hydrology* 212–213: 198–212.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. *SMAP - A Simplified Hydrological Model, Applied Modelling in Catchment Hydrology*, Ed. V.P.Singh, Water Resources Publications, 1982.

LOPES, J. E. G. “*Manual do modelo SMAP*”. 1999. Disponível em < http://pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=3596 >. Acesso em 03/05/2019.

SENAY, G.B., M. Budde, J.P. Verdin, and A.M. Melesse, 2007. A coupled remote sensing and simplified surface energy balance approach to estimate actual evapotranspiration from irrigated fields. Special issue: Remote sensing of natural resources and the environment. *SENSORS*, 1, 979-1000.

SENAY, G.B., S. Bohms, R. Singh, P.A. Gowda, N.M. Velpuri, H. Alemu and J.P. Verdin, 2013.

TODA MATERIA. Bacia do Paraguai. Disponível em: < <https://www.todamateria.com.br/bacia-do-paraguai/> > Acesso em: 30 abr. 2019.

UCSB GEOGRAPHY. Disponível em: < <http://chg.geog.ucsb.edu/data/chirps/> > Acesso em: 05 mai. 2019.

USGS. Monthly Actual Evapotranspiration (ET). Disponível em: < <https://earlywarning.usgs.gov/fews/product/460> > Acesso em: 05 mai. 2019.

WMO (World Meteorological Organization) (1994). *Guide to hydrological practices. Data Acquisition and Processing, Analysis, Forecasting and Others Applications*. World Meteorological Organization, WMO-nº.168. 5a ed. 735p, Geneva.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas (ANA) através do Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015. Agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) pelo apoio técnico científico oferecido, e a ANA e a CAPES pelo apoio ao ProfÁgua aportado até o momento.

Além desses, agradeço à empresa CPRM/SGB – Serviço Geológico do Brasil – pelo apoio técnico, financeiro e sua infraestrutura.