

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
HÍDRICA

**Previsão de vazões naturais afluentes médias
semanais para usinas hidrelétricas**

Thales Galizoni

Itajubá, maio de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
HÍDRICA

Previsão de vazões naturais afluentes médias semanais para usinas hidrelétricas

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Hídrica como parte dos requisitos para
obtenção do título de **Mestre em Engenharia Hídrica**

Área de Concentração: Geração Hidrelétrica

Orientador: Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva

Itajubá, maio de 2021

DEDICATÓRIA

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Luis Gustavo Galizoni e Silvana Ap. M. Galizoni, que sempre me apoiaram e me deram todo o suporte necessário durante a minha jornada acadêmica. Nenhuma das minhas conquistas seriam possíveis sem eles.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Benedito Cláudio da Silva, pela dedicação e conhecimentos transmitidos.

Agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração e conclusão deste trabalho.

RESUMO

A engenharia de recursos hídricos vem empregando amplamente os modelos de previsão de vazão para subsidiar a tomada de decisão em diversas áreas. Os modelos Previvaz e Smap Diário já vêm sendo empregados pelo ONS para a previsão de vazões médias semanais para até seis semanas operativas com o objetivo de fornecer os *inputs* necessários para a otimização do recurso hidroenergético no planejamento da operação do sistema elétrico brasileiro. Visando somar esforços para melhorar essa previsão, este trabalho propôs e analisou os resultados de uma versão semanal para o modelo Smap, a qual foi gerada tendo por base o mecanismo de cálculo da versão mensal do Smap. No estudo de caso calibrou-se o Smap semanal para duas sub-bacias do SIN: a bacia da UHE Camargos (bacia do Grande); e a bacia da UHE Santa Clara (bacia do Iguaçu). Fez-se um *back test* para ambas as bacias para o período entre setembro de 2019 e setembro de 2020 comparando a previsão de vazão dos modelos Previvaz, Smap diário e Smap semanal com as vazões observadas no mesmo período. Como resultados, o modelo Previvaz, na primeira semanas prevista, propagou a tendência das vazões observadas na semana anterior e nas demais semanas apresentou tendência em superestimar as vazões mais baixas e dificuldades em captar os picos de vazões. Ambas as versões do modelo Smap apresentaram um ajuste quando a chuva utilizada para o cálculo das vazões foi a chuva observada, entretanto ambos apresentaram a tendência de superestimar os picos de vazões quando utilizada a chuva prevista pelo CFS V2. Conclui-se que a versão semanal do Smap teve performance melhor do que o Previvaz na maior parte dos cenários, indicando que pode ser um modelo empregado para o planejamento da operação. Além disso, a versão semanal do Smap também apresentou melhores resultados na quinta e sexta semana do horizonte de previsão, indicando que o modelo semanal pode ser utilizado para melhorar o resultado de horizontes mais longos de previsão.

Palavras Chaves: modelo hidrológico, Smap, previsão de vazão.

ABSTRACT

Water resource engineering has been largely employing flow forecasting models to support decision making in several areas. The Previzaz and Smap Diário models have already been used by ONS to forecast average weekly flows for up to six operating weeks in order to provide the necessary inputs for the optimization of the hydroenergetic resource in the planning of the operation of the Brazilian electrical system. Aiming at adding efforts to improve this forecast, this work proposed and analyzed the results of a weekly version for the Smap model, which was generated based on the calculation mechanism of the monthly version of Smap. In the case study, the weekly Smap was calibrated for two sub-basins of the SIN: the Camargos HPP basin (Grande basin); and the Santa Clara HPP basin (Iguaçu basin). A back test was carried out for both basins for the period between September 2019 and September 2020, comparing the flow forecast of the Previzaz, daily Smap and weekly Smap models with the flows observed in the same period. As a result, the Previzaz model, in the first week foreseen, propagated the trend of flows observed in the previous week and in the other weeks it tended to overestimate the lowest flows and difficulties in capturing peak flows. Both versions of the Smap model showed an adjustment when the rainfall used to calculate the flows was the observed rain, however both showed a tendency to overestimate the peak flows when using the rain predicted by the CFS V2. It is concluded that the weekly version of Smap performed better than Previzaz in most scenarios, indicating that it can be a model used for planning the operation. In addition, the weekly version of Smap also showed better results in the fifth and sixth week of the forecast horizon, indicating that the weekly model can be used to improve the result of longer forecast horizons.

Keywords: hydrological model, Smap, flow forecast.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação da divisão espacial da bacia hidrográfica em modelos concentrados, semidistribuídos e distribuídos	4
Figura 2 - Esquema ilustrativo do processo de previsões de vazão semanal para programação da operação de uma bacia calibrada para o Smap	7
Figura 3 - Esquema do Modelo SMAP diário com três reservatórios matemáticos	11
Figura 4 - Esquema do Modelo SMAP diário com quatro reservatórios matemáticos	12
Figura 5 - Esquema do Modelo SMAP diário com quatro reservatórios matemáticos	17
Figura 6 - Fluxograma da metodologia empregada.....	23
Figura 7 - Configuração operacional das rodadas diárias do modelo CFSv2	24
Figura 8 - Representação da Bacia do Rio Grande e da sub-bacia da UHE Camargos em seu interior	26
Figura 9 - Representação esquemática da exploração hidrelétrica na bacia do Rio Grande	26
Figura 10 - Representação da bacia do Rio Iguaçu e da sub-bacia da UHE Santa Clara em seu interior	27
Figura 11 - Representação esquemática da exploração hidrelétrica na bacia do Rio Iguaçu	28
Figura 12 - Hidrograma com o resultado da calibração da versão semanal do Smap para a sub-bacia da UHE Camargos	33
Figura 13 - Hidrograma com o resultado da calibração da versão semanal do Smap para a sub-bacia da UHE Santa Clara.....	33
Figura 14 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previzaz para primeira semana operativa da bacia de Camargos.....	35
Figura 15 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para primeira semana operativa da bacia de Camargos.	35
Figura 16 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para primeira semana operativa da bacia de Camargos.	36
Figura 17 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previzaz para segunda semana operativa da bacia de Camargos.	36
Figura 18 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para segunda semana operativa da bacia de Camargos.	37
Figura 19 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para segunda semana operativa da bacia de Camargos.	37

Figura 20 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previvaz para terceira semana operativa da bacia de Camargos.	38
Figura 21 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para terceira semana operativa da bacia de Camargos.	38
Figura 22 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para terceira semana operativa da bacia de Camargos.	39
Figura 23 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previvaz para quarta semana operativa da bacia de Camargos.	39
Figura 24 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para quarta semana operativa da bacia de Camargos.	40
Figura 25 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para quarta semana operativa da bacia de Camargos.	40
Figura 26 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previvaz para quinta semana operativa da bacia de Camargos.	41
Figura 27 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para quinta semana operativa da bacia de Camargos.	41
Figura 28 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para quinta semana operativa da bacia de Camargos.	42
Figura 29 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previvaz para sexta semana operativa da bacia de Camargos.	42
Figura 30 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para sexta semana operativa da bacia de Camargos.	43
Figura 31 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para sexta semana operativa da bacia de Camargos.	43
Figura 32 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previvaz para primeira semana operativa da bacia de Santa Clara.	45
Figura 33 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para primeira semana operativa da bacia de Santa Clara.	45
Figura 34 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para primeira semana operativa da bacia de Santa Clara.	46
Figura 35 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previvaz para segunda semana operativa da bacia de Santa Clara.	46

Figura 36 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para segunda semana operativa da bacia de Santa Clara.....	47
Figura 37 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para segunda semana operativa da bacia de Santa Clara.....	47
Figura 38 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previvaz para terceira semana operativa da bacia de Santa Clara.	48
Figura 39 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para terceira semana operativa da bacia de Santa Clara.....	48
Figura 40 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para terceira semana operativa da bacia de Santa Clara.....	49
Figura 41 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previvaz para quarta semana operativa da bacia de Santa Clara.	49
Figura 42 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para quarta semana operativa da bacia de Santa Clara.....	50
Figura 43 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para quarta semana operativa da bacia de Santa Clara.....	50
Figura 44 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previvaz para quinta semana operativa da bacia de Santa Clara.	51
Figura 45 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para quinta semana operativa da bacia de Santa Clara.....	51
Figura 46 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para quinta semana operativa da bacia de Santa Clara.....	52
Figura 47 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previvaz para sexta semana operativa da bacia de Santa Clara.....	52
Figura 48 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para sexta semana operativa da bacia de Santa Clara.....	53
Figura 49 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para sexta semana operativa da bacia de Santa Clara.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores dos parâmetros para a versão diária do Smap divulgados pelo ONS	31
Tabela 2 - Valores dos parâmetros obtidos na calibração da versão semanal do Smap	32
Tabela 3 - Coeficientes da calibração por bacia	34
Tabela 4 - Tabelas com os resultados da análise de erros pelo método NASH.....	55
Tabela 5 - Tabelas com os resultados da análise de erros pelo método MAPE.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEPEL = Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CFS = *Climate Forecast System*

CGH = Central Geradora Hidrelétrica

DAEE = Departamento de Águas e Energia Elétrica

NOAA = *National Oceanic and Atmospheric Administration*

ONS = Operador Nacional do Sistema

SIN = Sistema Interligado Nacional

UHE = Usina Hidrelétrica

UTE = Usina Térmica

ZCAS = Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1. Previsão de vazões	5
3.2. Previsão de vazões aplicadas ao SIN	6
3.3. O Modelo Previvaz	7
3.4. O Modelo SMAP	9
3.4.1. A versão diária do SMAP.....	10
3.4.2. A versão mensal do SMAP	16
3.4.3. Calibração do Modelo Smap	19
3.4.4. Métodos de reinicialização do modelo Smap.....	21
4.METODOLOGIA.....	23
4.1. A versão semanal do Smap	23
4.2. O modelo meteorológico CFSv2	24
4.3. Áreas de estudo	25
4.3.1. A bacia hidrográfica da UHE Carmargos	25
4.3.2. A bacia hidrográfica da UHE Santa Clara	27
4.4. Rodadas de <i>Back Test</i>	28
4.4.1. Dados utilizados no Previvaz	29
4.4.2 Dados utilizados no Smap	29
5. RESULTADOS	31
5.1. Calibração do Modelo Smap.....	31
5.2. Resultados da bacia de Camargos.....	34
5.3. Resultados da bacia de Santa Clara	44
5.4. Análise de erros.	54
6.CONCLUSÕES.....	57
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma matriz de geração de energia elétrica predominantemente hidráulica. No ano de 2019, por exemplo, 70,5% da energia gerada no país foi proveniente da fonte hidrelétrica (Histórico da Operação: Geração de Energia, 2020). Este parque gerador hidrelétrico, entretanto, está disposto em cascata, resultando na interdependência do sistema. Isso quer dizer que a operação das usinas hidrelétricas a montante impacta diretamente na operação das usinas a jusante resultando, portanto, na necessidade de se coordenar a operação da geração elétrica tendo em vista o uso eficiente do recurso hidroenergético.

Para reduzir o risco de déficit e atender a demanda energética em períodos de baixa disponibilidade hídrica, o Brasil também conta com um grande parque gerador termoelétrico. Sendo assim, o sistema elétrico brasileiro pode ser caracterizado como um sistema hidrotérmico, no qual se utiliza o despacho centralizado para coordenar a operação do sistema. Isso equivale a dizer que as usinas hidrelétricas (UHEs) e usinas termelétricas (UTES) tem sua geração energética programada e despachada por um ente central, papel este atribuído ao Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.

Em sistemas hidrotérmicos nos quais a geração hidroelétrica corresponda a uma porcentagem substancial do parque gerador, pode-se atender a demanda utilizando a energia “gratuita” armazenada nos reservatórios em substituição à dispendiosa geração termoelétrica. Contudo, o volume de água afluente aos reservatórios é desconhecido já que está relacionado principalmente aos eventos de chuva futuros. Assim, é necessário avaliar as consequências futuras de uma decisão no presente, sendo a solução ótima uma ponderação entre o benefício presente do uso da água e o benefício futuro de seu armazenamento (CEPEL, 2018).

Para exemplificar o dilema sobre a operação hidrotérmica, suponha-se que o operador do sistema decida utilizar as provisões de energia hidroelétricas para atender a demanda atual, mas no futuro ocorra um cenário hidrológico seco. Isto implicaria no despacho de usinas termoelétricas com custos elevados de geração para atender a demanda, ou mesmo interromper o fornecimento de energia em casos críticos. Por outro lado, se o operador opta por fazer um uso mais intensivo de geração termoelétrica para atender a demanda atual, conservando os níveis dos reservatórios em cotas elevadas, e no cenário hidrológico futuro ocorram vazões elevadas, poderá ser necessário verter água

desses reservatórios, situação tampouco desejada por representar desperdício de energia (CEPEL, 2018).

Pode-se notar, portanto, que a previsão de vazões afluentes às UHEs brasileiras é um insumo fundamental para o planejamento ótimo da operação do Sistema Interligado Nacional – SIN. Para obter os cenários de vazões previstas determinísticas necessárias para o primeiro mês da programação da operação do SIN, o ONS adota um misto de modelos hidrológicos composto pelo modelo estocástico Previvaz (CEPEL, 2015) e o modelo chuva-vazão Smap (ONS, NT 0097/2018) em sua versão diária. Já, para o planejamento do médio prazo – de 2 meses a 5 anos – são utilizadas vazões provenientes de cenários probabilísticos de afluências, gerados a partir de séries sintéticas de vazões (GUILHON, ROCHA e MOREIRA, 2007).

Nesse contexto, o objeto de estudo deste trabalho consiste na previsão das vazões naturais afluentes médias semanais do primeiro mês do planejamento da operação. Propõe-se aqui uma versão semanal do modelo Smap para realizar a previsão de vazões médias semanais para a operação do sistema elétrico brasileiro, cujo desempenho é avaliado no estudo de caso de duas importantes bacias hidrográficas: a bacia da UHE Camargos, localizada na bacia do Rio Grande, na região Sudeste; e a bacia da UHE Santa Clara, localizada na bacia do Rio Iguaçu, na região Sul.

Em suma, os esforços por aperfeiçoamentos metodológicos nas previsões das vazões naturais afluentes visam contribuir para a melhoria do planejamento e programação da operação do SIN melhorando a sinalização econômica dos modelos de otimização da operação, aumentando a confiabilidade do sistema e reduzindo custos.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar e avaliar a performance de uma versão semanal do modelo chuva-vazão Smap. Pretende-se através deste modelo fornecer previsões de vazões médias semanais que possam ser utilizadas para o planejamento da operação do sistema elétrico brasileiro.

São objetivos específicos:

- Avaliar a acurácia do modelo proposto por meio de um estudo de caso nas bacias da UHE Camargos e UHE Santa Clara, no período compreendido entre setembro de 2019 e setembro de 2020, comparando-se as previsões fornecidas pelo modelo em cada bacia com as respectivas vazões observadas no mesmo período;
- Comparar esta metodologia de previsão de vazões semanal proposta com as metodologias empregadas atualmente pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), sendo elas: o modelo estatístico Previvaz; e a versão diária do modelo conceitual Smap.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A hidrologia, como área do conhecimento, tinha até as primeiras décadas do século XX, um carácter muito mais descritivo do que quantitativo. Os modelos matemáticos hidrológicos representam uma classe de ferramentas criadas na hidrologia que se desenvolveram de forma significativa nos últimos 50 anos. O investimento econômico em infraestrutura no pós-guerra, impulsionou a construção de aproveitamentos hidroenergéticos, drenagem de cidades e rodovias, controle de enchentes, dentre outros. Neste período predominou a visão pragmática do engenheiro, desenvolvendo métodos quantitativos para explicar os processos hidrológicos necessários em tais projetos. Tais modelos eram empíricos ou conceituais e visavam apenas transformar a precipitação em vazão (TUCCI e SILVEIRA, 2015).

As primeiras modelagens hidrológicas visavam descrever os processos de cada componente do ciclo hidrológico. Na década de 30, Horton (1939) a partir de experimentos de campo estabeleceu uma relação empírica para representar o decaimento da infiltração com o tempo. Nesse mesmo período McCarthy (1938) propôs o modelo de Muskingum para o escoamento em rios e Puls (1928) propôs seu modelo para escoamento em reservatórios.

Nesse período os problemas e os sistemas eram delimitados para se obter a solução de um problema específico. Somente na década de 50, em função da disponibilidade do computador, surgiram os primeiros modelos hidrológicos que reuniam vários processos para descrever a transformação da chuva em vazão, como o modelo SSARR. As décadas de 60 e 70 foram marcadas pela introdução de vários outros modelos que contribuíram com características singulares como o Stanford IV (TUCCI, 2005). Na década de 70, Ibbitt (1970) introduziu a determinação dos parâmetros de um modelo hidrológico por meio da calibração automática, ajustando diferentes combinações de séries e estudando os efeitos dos erros sobre o ajuste.

Conforme Tucci (2005) aponta, a partir do final da década de 70 pôde-se verificar duas tendências: os modelos tinham muitos parâmetros, o que dificultava seu ajuste; os processos mais importantes utilizavam de 3 a 4 parâmetros, que são os mais sensíveis. Priorizando estes parâmetros (e processos) é possível obter resultados equivalentes aos dos modelos que representam quase todos os processos, devido à baixa sensibilidade dos demais parâmetros. Desta forma resultaram modelos com menor número de funções e

parâmetros e mais eficientes para a engenharia, como o IPH II (TUCCI, ORDONEZ e SIMÕES, 1981) e o Smap (LOPES, 1999).

Segundo Santos (2009) os modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão são construídos a partir de abordagens físicas dos processos hidrológicos, utilizando-se das equações de conservação da massa e de quantidade de movimento, em sua forma completa ou simplificada.

Os modelos hidrológicos de transformação chuva-vazão podem ser utilizados para obter diferentes tipos de informações necessárias para subsidiar a tomada de decisão no planejamento dos recursos hídricos, dentre as quais pode-se citar a previsão de vazões, cálculo de eventos de projetos, extensão de séries de vazão e previsão de resposta da bacia ante modificações climáticas (MATOS, JUNIOR, *et al.*, 2017).

De acordo com Tucci (2015), pode-se separar os modelos hidrológicos em três categorias conceituais:

- Empíricos: utilizam equações sem relação com os processos físicos na bacia. Utilizam regressões lineares ou não-lineares, séries de Fourier, entre outros. São utilizados para relacionar a precipitação com a vazão;
- Conceituais: estes modelos usam a equação da continuidade, associada a uma ou mais equações empíricas que relacionam variáveis e parâmetros dos processos. Estes modelos geralmente representam os efeitos de armazenamento e introduzem equações empíricas para representar os processos dinâmicos;
- Físico-distribuídos: são os modelos que utilizam as equações de continuidade e dinâmica dos processos envolvidos, buscando integrar a descrição de todos os processos físicos que ocorrem na bacia. Este tipo de modelo ainda apresenta maiores dificuldades, devido à grande variabilidade das características físicas e dos processos.

Santos (2009), apresenta as seguintes possibilidades de classificação dos modelos hidrológicos:

- Concentrado ou distribuído: o modelo é dito concentrado quando não leva em consideração a variabilidade espacial da bacia. Já o modelo é considerado distribuído quando suas variáveis e parâmetros dependem do espaço e/ou tempo. Na Figura 1 pode-se observar um exemplo dessa classificação;



Figura 1 - Comparação da divisão espacial da bacia hidrográfica em modelos concentrados, semidistribuídos e distribuídos (CATALDI e NIELSEN, 2016)

- Estocástico ou determinístico: quando a chance de ocorrência das variáveis for levada em consideração e o conceito de probabilidade é introduzido na formulação do modelo, o modelo é dito estocástico. Já modelos que, para uma mesma entrada, produzem uma mesma e única saída, podem ser classificados como determinísticos;
- Conceitual ou empírico: os modelos são ditos conceituais quando levam em consideração os conceitos físicos relacionados aos processos hidrológicos. Já os modelos empíricos são aqueles que utilizam funções que não tenham relação com os processos físicos envolvidos e são baseados em análises estatísticas, como métodos de correlação e análise de regressão.

De maneira geral, pode-se classificar os principais usos dos modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão conforme apresentado por Tucci (2015):

- Fenômenos hidrológicos: o detalhamento do modelo permite ao hidrólogo separar os fenômenos e, em consequência, estudar a sensibilidade das variações para bacias com diferentes características, de modo a compreender melhor o comportamento dos fenômenos hidrológicos. Além disso, é possível testar e avaliar diferentes formulações para os processos;
- Análise de consistência e preenchimento de falhas: devido a facilidade de operação e custo, é normal existirem séries mais longas de precipitação do que de vazão. Portanto, através do modelo é possível, após o ajuste, a extensão da série

de vazão com base na precipitação. O modelo também pode ser utilizado para analisar a consistência da curva-chave, dos níveis observados e verificar as alterações no rio e na bacia;

- Previsão de vazão: o controle de cheia, a operação de obras hidráulicas, a navegação, entre outros, dependem do conhecimento antecipado da ocorrência da vazão. Este tipo de estimativa pode ser obtido com base na precipitação conhecida, na vazão de um posto de montante ou na combinação dos mesmos;
- Dimensionamento e previsão de cenários de planejamento: conhecida a precipitação e o risco de ocorrência da mesma é possível estimar a vazão resultante, para cenários de uso e modificações da bacia, visando ao dimensionamento ou planejamento de alternativas de desenvolvimento do sistema;
- Efeitos resultantes da modificação do uso do solo: a análise do escoamento resultante da modificação do uso do solo é um problema complexo, que requer uma metodologia mais sofisticada que as utilizadas para resolver os problemas anteriores. Os modelos existentes, apesar de conceituais possuem muitas formulações empíricas para representar os processos, cujos parâmetros englobam várias das características da bacia, o que dificulta qualquer análise específica de uma destas características isoladas.

3.1. Previsão de vazões

A previsão de vazão num sistema hídrico envolve a estimativa do escoamento com antecedência no tempo. Esta previsão pode ser realizada em *curto prazo* com antecedência de poucas horas até cerca de 14 dias e em *longo prazo* com antecedência de até nove meses (SILVA, TUCCI e COLLISCHONN, 2006).

A previsão de curto prazo pode ser classificada como contínua ou eventual. Quando a previsão é realizada ao longo do tempo, independentemente das condições hidrológicas, a mesma é dita contínua. Já a previsão eventual é realizada em épocas definidas do regime hidrológico, nas quais as condições são críticas para o usuário da água (SILVA, TUCCI e COLLISCHONN, 2006).

A previsão de longo prazo é frequentemente utilizada para propósito de planejamento e operação dos recursos hídricos. Nos últimos anos ampliou-se largamente o entendimento das conexões entre as anomalias climáticas de grande escala e os eventos

hidrológicos e, conseqüentemente, novas metodologias veem sendo propostas baseadas em indicadores da Temperatura na Superfície do Mar (TSM), como El Niño, La Niña e *Pacific Decadal Oscillation* (PDO) (SILVA, TUCCI e COLLISCHONN, 2006).

Conforme já mencionado anteriormente, a previsão de vazões pode ser realizada por modelos empíricos e conceituais. As vantagens dos modelos empíricos são a rapidez na elaboração e a facilidade na atualização dos parâmetros em tempo real, enquanto que os modelos conceituais têm maior capacidade de extrapolação e tratamento das variantes hidrológicas (SILVA, TUCCI e COLLISCHONN, 2006).

As características geológicas e pedológicas das bacias também são importantes na definição do tipo de previsão que pode ser realizada. Bacias com solos e rochas permeáveis favorecem a infiltração da água e geram um menor escoamento superficial. Os rios oriundos de bacias com estas características têm variações lentas da vazão, ou seja, apresentam grande memória. Já bacias com solos rasos e com rochas pouco permeáveis tendem a gerar mais vazão superficial, que escoam mais rapidamente, apresentando memória curta (SILVA, TUCCI e COLLISCHONN, 2006).

3.2. Previsão de vazões aplicadas ao SIN

As previsões de vazões naturais para os aproveitamentos hidrelétricos do SIN, necessárias para o primeiro mês da programação da operação, são obtidas para dois horizontes temporais: de curtíssimo prazo, até 14 dias, com discretização em valores médios diários, para fins de programação diária; e de curto prazo, até 6 semanas, através de valores médios semanais, para o planejamento de curto prazo da operação (GUILHON, ROCHA e MOREIRA, 2007).

Ao longo dos últimos anos, o ONS vem aprimorando sua previsão de vazão com a expansão espacial da modelagem chuva-vazão especialmente com o uso do modelo Smap para diversas bacias do SIN. Contudo a expansão temporal para além da primeira semana prevista esteve até agora limitada pela qualidade das previsões de precipitação que apenas recentemente passaram a ser mais confiáveis para horizontes mais distantes. Para determinar a chuva prevista, input necessário para a previsão de vazão do modelo Smap, o ONS adota uma metodologia de previsão conjunta na qual são utilizados três modelos de previsão de precipitação: o ETA40; o GEFS; e o ECMWF. Nesta metodologia conjunta primeiramente é feita a remoção de viés de cada modelo e, em seguida, busca-

se encontrar o peso que cada modelo terá no agrupamento, de forma a minimizar o erro médio (ONS, NT 0075/2020).

A programação da operação do sistema elétrico brasileiro é realizada com periodicidade semanal, sendo que a semana operativa tem início no sábado e fim na sexta-feira. O processo de previsão de vazões naturais semanais para programação da operação é realizado, em geral, às quintas-feiras. Nestes dias, o ONS utiliza as vazões observadas da semana em curso mais a previsão de vazão da quinta e sexta-feiras para calcular a média semanal da semana corrente. Nas bacias calibradas para o modelo Smap, utiliza-se as previsões deste modelo para estes dois dias. Nas demais bacias são feitas regressões para determinar as vazões correspondentes à quinta e sexta-feiras. Entretanto, essa previsão determinística realizada pelo Smap é considerada apenas na primeira semana operativa do planejamento da operação, sendo utilizado o modelo Previzaz para prever as vazões médias das demais semanas necessárias para fechar o mês. Bacias ainda não calibradas para o modelo Smap tem todo o horizonte de previsão calculado pelo Previzaz. Na Figura 2, tem-se uma representação esquemática desse processo de previsão de vazões para a programação da operação.



Figura 2 - Esquema ilustrativo do processo de previsões de vazão semanal para programação da operação de uma bacia calibrada para o Smap

Atualmente, uma grande parcela das bacias hidrográficas do SIN está calibrada para o modelo Smap. São elas: Grande, Paranaíba, Tietê, Paranapanema, Paraná, Iguaçu, Uruguai, Jacuí, Capivari, Itajaí, Tocantins, Madeira e o Alto São Francisco.

3.3. O Modelo Previzaz

O modelo Previzaz foi desenvolvido pelo Cepel com o objetivo de fornecer previsões de vazão médias semanais com um horizonte de até seis semanas de previsão. Em suma, o Previzaz utiliza a série histórica de vazões do posto em questão para estimar um conjunto de modelos auto-regressivos. Após avaliação desses modelos, aquele que

apresentar o melhor desempenho é utilizado para a previsão de vazões nas próximas seis semanas (CEPEL, 2015).

Os modelos auto-regressivos, $AR(p)$, formam a base do conjunto de alternativas estimadas e avaliadas pelo Previzaz. Essas alternativas podem considerar, ainda:

- O caráter sazonal da estrutura de correlação temporal da série de vazões, nos modelos periódicos auto-regressivos, $PAR(p)$;
- Nos modelos periódicos, a estrutura de correlação pode ser determinada a partir de períodos semanais, mensais, trimestrais e semestrais;
- Termos de média móvel, $MA(q)$;
- Diferentes maneiras de se estimar os parâmetros dos modelos;
- A transformação (logarítmica ou Box-Cox) das séries de vazões históricas de modo a garantir a condição de normalidade da série (CEPEL, 2015).

Além dessas características, o Previzaz considera ainda as alternativas de média semanal e média anual. Considerando a ordem máxima dos modelos auto-regressivos igual a 4, e a dos modelos média móvel igual a 1, o Previzaz pode avaliar um total de 140 diferentes alternativas de modelagem ao se considerar todas as diferentes alternativas permitidas pela combinação destas características (CEPEL, 2015).

O procedimento utilizado para escolher a alternativa que será de fato empregada para a previsão de vazões consiste nas seguintes etapas:

1. A partir da primeira metade da série histórica, são estimados os parâmetros de todas as alternativas de modelagem consideradas; em seguida, calcula-se o erro médio quadrático cometido por cada uma ao simular a previsão de vazões na segunda metade do histórico;
2. A partir da segunda metade da série histórica, são estimados os parâmetros de todas as alternativas consideradas; em seguida, calcula-se o erro médio quadrático cometido por cada uma ao simular a previsão de vazões na primeira metade do histórico;
3. Calcula-se, por fim, o erro quadrático médio de cada uma das alternativas; aquela que apresentar o menor valor deste erro será adotada como o modelo a ser utilizado para previsão;
4. Os parâmetros da alternativa escolhida na etapa são estimados com base na série histórica completa (CEPEL, 2015).

3.4. O Modelo SMAP

O modelo SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) é um modelo conceitual de simulação hidrológica do tipo chuva-vazão. Foi desenvolvido em 1981 por Lopes, J.E.G., Braga, B.P.F. e Conejo, J.G.L., apresentado no International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling realizado em Mississipi, U.S.A e publicado pela Water Resources Publications (ONS, 2009, apud LOPES ET AL., 1982).

O desenvolvimento do modelo baseou-se na experiência com a aplicação do modelo Standford Watershed IV e modelo Mero em trabalhos realizados no DAEE. Foi originalmente desenvolvido para intervalo de tempo diário e posteriormente apresentada a versão mensal, adaptando-se algumas modificações em sua estrutura (LOPES, 1999).

O modelo SMAP vem sendo adotado pelo ONS como o modelos hidrológico padrão para a previsão de vazões nas bacia hidrográficas pertencentes ao Sistema Interligado Nacional. A NT 139-2008 da ONS pontua as seguintes vantagens para a adoção do modelo SMAP:

- Facilidade de entendimento da metodologia, do funcionamento do modelo e de seus parâmetros, o que permite a realização de alguns ajustes/aprimoramentos quando necessários;
- Facilidade na obtenção dos dados de entrada necessários e na aplicação para a grande maioria das bacia do SIN.

Além do uso no setor elétrico pelo ONS, o modelo Smap vem sendo amplamente empregado para os mais diversos estudos e aplicações pelo Brasil. Buchianeri (2004) conduziu um estudo para gerar a série histórica de vazão do Rio Grande de Ubatuba usando o modelo SMAP. Com apenas quatro anos incompletos de dados fluviométricos e com a série histórica de 67 anos de dados de precipitação, foi possível calibrar os parâmetros e gerar uma série histórica de vazão que permitiu identificar a insuficiência hídrica desta bacia no abastecimento público. Cavalcante (2017) utilizou o modelo hidrológico Smap para gerar a série histórica de vazões da bacia do Rio Santana, afluente do rio Guandu, no estado do Rio de Janeiro, objetivando fazer o inventário deste rio para o projeto de uma CGH. Seu estudo aponta o uso do modelo Smap como adequado a geração da série histórica, tendo em vista que 2 anos de vazões observadas foram suficientes para calibrar e validar o modelo. Cella *et al.* (2009) aplicou a versão mensal

do Smap na análise do uso dos recursos hídricos para a irrigação do arroz, obtendo uma série de vazões mensais naturais considerada satisfatória

Martini (2015) utilizou o modelo Smap para avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre as vazões diárias de um curso d'água, e projetar vazões futuras visando analisar e apontar possíveis alterações nas vazões máximas, vazões médias mensais e vazões características como a Q_{90} , a Q_{95} e a $Q_{7/10}$. Já Macedo e Martins (2014) aplicaram o modelo Smap para a previsão de vazões com foco na segurança de barragens, cujos resultados não satisfatórios foram atribuídos a baixa acurácia da previsão de precipitação utilizada como input do Smap .

3.4.1. A versão diária do SMAP

Atualmente a versão diária do Smap é utilizada pelo ONS para obter as vazões naturais médias semanais de diversos aproveitamentos hidrelétricos do SIN. Para tanto, o ONS realiza a previsão diária de vazões naturais por meio do Smap diário e, ao final, calcula a média dessas vazões para a semana operativa em questão.

Conforme apresentado pela NT 0097/2018, a versão diária original do modelo SMAP é constituída por três reservatórios lineares hipotéticos, conforme apresentado na Figura 3, que visam representar:

- O reservatório do solo (R_{solo});
- O reservatório da superfície (R_{sup}), correspondente ao escoamento superficial da bacia;
- O reservatório subterrâneo (R_{sub}), correspondente ao escoamento subterrâneo da bacia (escoamento base).

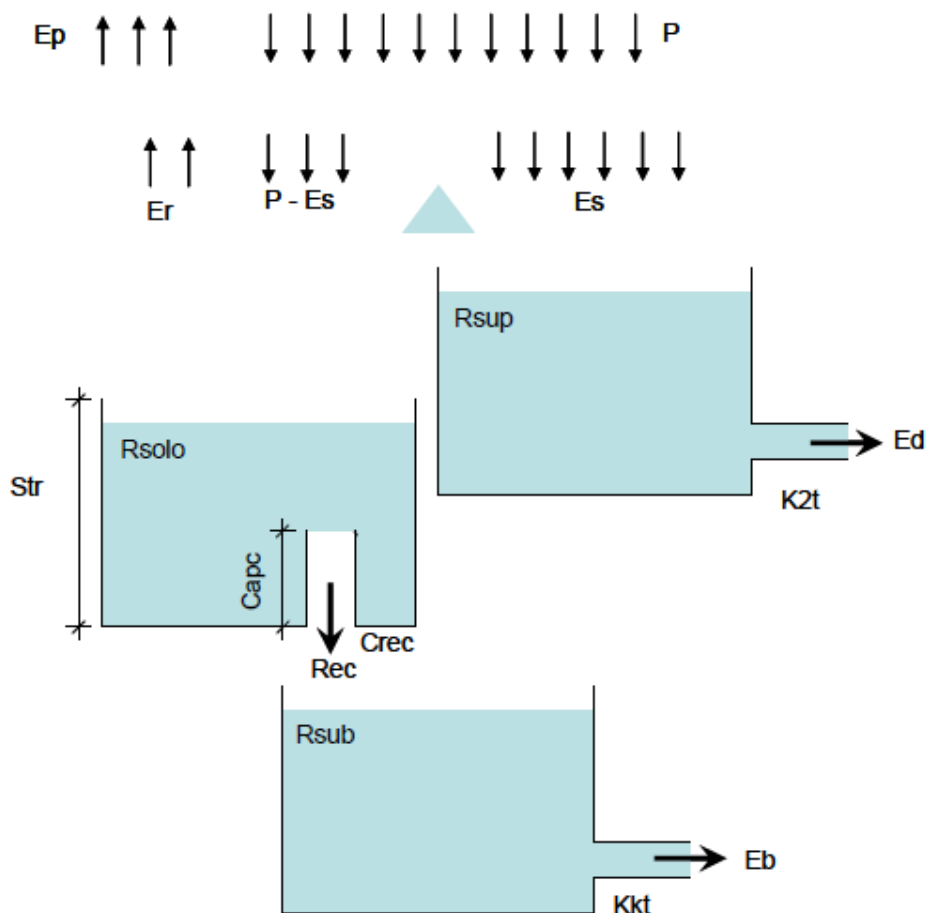


Figura 3 - Esquema do Modelo SMAP diário com três reservatórios matemáticos (ONS, NT 0097/2018)

O quarto reservatório corresponde a um segundo reservatório de superfície. É conveniente incluí-lo em bacias que possuem planícies de inundação significativas, nas quais pode-se verificar extravasamentos expressivos pelas margens e amortecimentos nos picos de cheias em eventos de precipitação intensa (ONS, NT 0097/2018). Na Figura 4 tem-se a representação esquemática do modelo Smap com a adição do quarto reservatório.

Esse ajuste pode ser justificado pelo fato de que, para vazões relativamente baixa, não haverá extravasamentos pelas margens nem escoamento pelas planícies. Além do mais, caso queira-se inibir a utilização do quarto reservatório pelo modelo, basta fixar um valor relativamente alto para o parâmetro H , tornando-se possível utilizar esse método em qualquer sub-bacia (ONS, NT 139/2008).

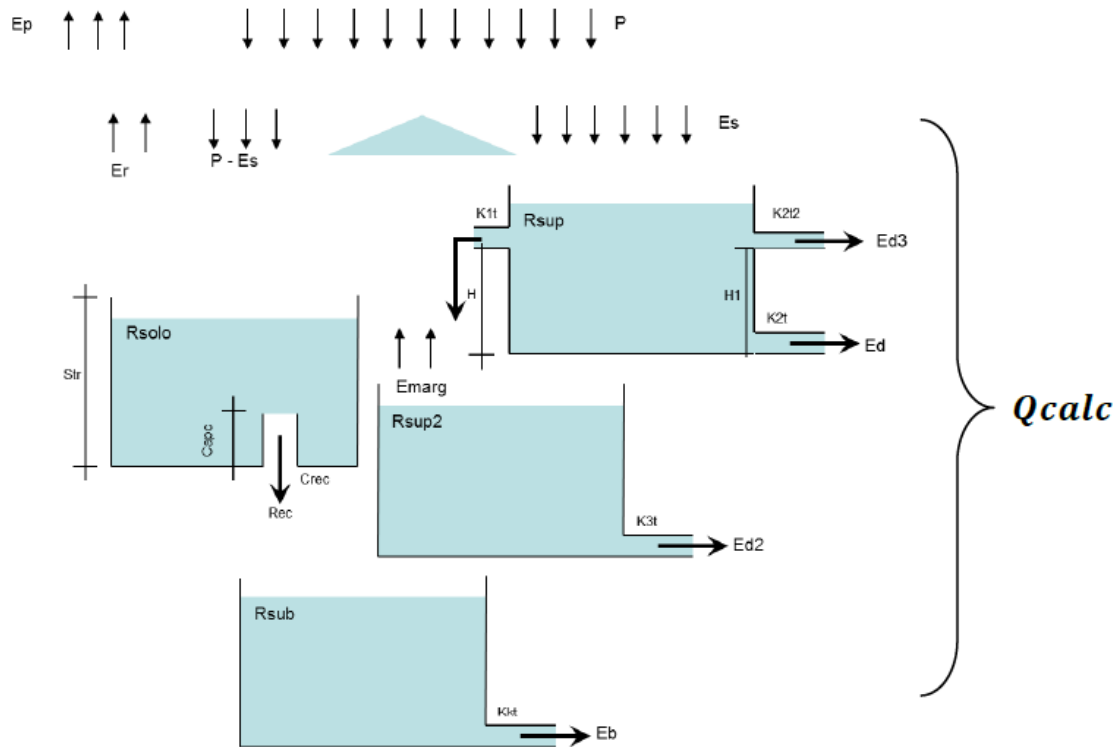


Figura 4 - Esquema do Modelo SMAP diário com quatro reservatórios matemáticos (ONS, NT 0097/2018)

A metodologia do modelo SMAP baseia-se na divisão da vazão em escoamento superficial e em escoamento subterrâneo, uma vez que eles possuem características distintas. Essa divisão é feita baseando-se na equação de runoff (Curve Number) do Soil Conservation Service (SCS) do Estados Unidos, sendo cada parcela armazenada em reservatórios fictícios que são responsáveis por descrever a forma e a duração dos escoamentos (ONS, NT 0097/2018).

Analisando primeiramente o escoamento superficial, tem-se a transferência de uma parcela do escoamento superficial para o reservatório de superfície, no qual são calculados os escoamentos superficiais e a transferência de água para o reservatório de planície. A partir do reservatório de planície é calculado o escoamento superficial de planície e uma parcela da evaporação (ONS, NT 0097/2018).

Com relação à parcela que infiltra, tem-se a transferência para o reservatório de solo, no qual computa-se a parcela de evapotranspiração real e a transferência para o reservatório subterrâneo através da recarga do aquífero, desde que a capacidade de campo do solo não tenha sido atingida. A partir do reservatório subterrâneo então, calcula-se o escoamento subterrâneo (ONS, NT 0097/2018).

As variáveis de estado de cada um dos quatro reservatórios são atualizadas a cada instante de tempo, de acordo com o seguinte procedimento:

$$R_{Solo(t)} = \text{Mín}\{R_{Solo(t-1)} + P_{(t)} - Es_{(t)} - Rec_{(t)}; Str\} \quad (1)$$

$$R_{Sub(t)} = R_{Sub(t-1)} + Rec_{(t)} - Eb_{(t)} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} R_{Sup(t)} = R_{Sup(t-1)} + Es_{(t)} - Marg_{(t)} - Ed_{(t)} - Ed3_{(t)} \\ + \text{Máx}\{0; [(R_{Solo(t-1)} + P_{(t)} - Es_{(t)} - Er_{(t)} \\ - Rec_{(t)}) - Str]\} \end{aligned} \quad (3)$$

$$R_{Sup2} = R_{Sup2(t-1)} + Marg_{(t)} - Ed2_{(t)} - Emarg_{(t)} \quad (4)$$

onde:

$R_{Solo(t)}$ = reservatório do solo no instante de tempo t (mm);

$R_{Sub(t)}$ = reservatório subterrâneo no instante de tempo t (mm);

$R_{Sup(t)}$ = reservatório da superfície no instante de tempo t (mm);

$R_{Sup2(t)}$ = reservatório de planície no instante de tempo t (mm);

$P_{(t)}$ = precipitação média, a ser considerada no instante de tempo t (mm);

$Es_{(t)}$ = escoamento para o reservatório de superfície no instante de tempo t (mm);

$Er_{(t)}$ = reservatório do solo no instante de tempo t (mm);

$Rec_{(t)}$ = recarga subterrânea no instante de tempo t (mm);

$Eb_{(t)}$ = escoamento de base no instante de tempo t (mm);

$Marg_{(t)}$ = extravasamento pelas margens no instante de tempo t (mm);

$Emarg_{(t)}$ = evaporação da planície de inundação no instante de tempo t (mm);

$Ed_{(t)}$ = primeiro escoamento superficial no instante de tempo t (mm);

$Ed2_{(t)}$ = segundo escoamento superficial no instante de tempo t (mm);

$Ed3_{(t)}$ = terceiro escoamento superficial no instante de tempo t (mm);

Str = capacidade de saturação do solo (mm);

t = instante de tempo (1 dia).

As funções de transferência também são calculadas a cada passo de tempo de acordo com as seguintes equações:

$$\text{Se } P_{(t)} > Ai \rightarrow Es_{(t)} = \frac{(P_{(t)} - Ai)^2}{(P_{(t)} - Ai + Str - Rsolo_{(t-1)})} \quad (5)$$

$$\text{Se } P_{(t)} \leq Ai \rightarrow Es_{(t)} = 0$$

$$\text{Se } (P_{(t)} - Es_{(t)}) > Ep_{(t)} \rightarrow Er_{(t)} = Ep_{(t)}$$

$$\begin{aligned} \text{Se } (P_{(t)} - Es_{(t)}) \leq Ep_{(t)} \rightarrow Er_{(t)} = & (P_{(t)} - Es_{(t)}) \\ & + (Ep_{(t)} - (P_{(t)} - Es_{(t)})) * Tu_{(t)} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Se } Rsolo_{(t-1)} > \frac{Capc}{100} * Str \rightarrow Rec_{(t)} = & \frac{Crec}{100} * Tu_{(t)} \\ & * \left(Rsolo_{(t-1)} - \frac{Capc}{100} * Str \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{Se } Rsolo_{(t-1)} \leq \frac{Capc}{100} * Str \rightarrow Rec_{(t)} = 0$$

$$\text{Se } Rsup_{(t-1)} > H \rightarrow Marg_{(t)} = (Rsup_{(t-1)} - H) * \left(1 - 0,5^{\frac{1}{k1t}} \right) \quad (8)$$

$$\text{Se } Rsup_{(t-1)} \leq H \rightarrow Marg_{(t)} = 0$$

$$Ed_{(t)} = \text{Menor} (Rsup_{(t-1)} - Marg_{(t)}; H1) * \left(1 - 0,5^{\frac{1}{k2t}} \right) \quad (9)$$

$$Ed2_{(t)} = Rsup2_{(t-1)} * \left(1 - 0,5^{\frac{1}{k3t}} \right) \quad (10)$$

$$Ed3_{(t)} = \text{Maior} (Rsup_{(t-1)} - Marg_{(t)} - H1; 0) * \left(1 - 0,5^{\frac{1}{k2t}} \right) \quad (11)$$

$$Eb_{(t)} = Rsub_{(t-1)} * \left(1 - 0,5^{\frac{1}{kkt}} \right) \quad (12)$$

onde:

A_i = abstração inicial (mm);

$E_{p(t)}$ = evapotranspiração potencial (mm);

$Tu_{(t)}$ = teor de umidade do solo (adimensional);

Capc = capacidade de campo (%);

Crec = parâmetro de recarga subterrânea (%);

H = altura representativa para transbordamento para planícies (mm);

H1 = altura representativa para início do segundo escoamento superficial (mm);

k_{1t} = constante de recessão do escoamento para planícies (dia);

k_{2t} = constante de recessão do primeiro escoamento superficial (dia);

k_{2t2} = constante de recessão do segundo escoamento superficial (dia);

k_{3t} = constante de recessão do escoamento da superfície/planícies (dia);

k_{kt} = constante de recessão do escoamento básico (dia).

As constantes de recessão (k_{1t} , k_{2t} , k_{2t2} , k_{3t} e k_{kt}) estão associadas à duração do intervalo no qual a vazão do reservatório correspondente decai à metade de seu valor, supondo que não há recarga deste reservatório durante o período. O eventual transbordo do reservatório do solo é transformado em escoamento superficial (ONS, NT 0097/2018).

O total diário de chuva a ser considerado pelo modelo no instante de tempo t , em cada bacia, é calculado a partir das seguintes expressões:

$$P_{(t)} = P_{(t-3)} * kt_{(-3)} + P_{(t-2)} * kt_{(-2)} + P_{(t-1)} * kt_{(-1)} + P_{(t)} * kt_{(0)} + P_{(t+1)} * kt_{(+1)} \quad (14)$$

$$kt_{(-3)} + kt_{(-2)} + kt_{(-1)} + kt_{(0)} + kt_{(+1)} = 1 \quad (15)$$

onde:

$P_{(t)}$ = precipitação média observada na bacia, no instante de tempo t (mm);

$kt_{(t)}$ = coeficiente de representação temporal, ou seja, os pesos utilizados para o cálculo da precipitação média na bacia, a ser considerada pelo modelo.

De acordo com a NT 139/2008, os coeficientes de representação temporal foram utilizados para o cálculo da precipitação média na bacia devido aos motivos abaixo listados:

- Em geral, as medidas de precipitação nos postos pluviométricos são realizadas às 7:00, ou seja, a maior parte da precipitação ocorrida no dia t só é medida e computada no dia $t+1$. Dessa forma, principalmente em bacias com tempo de concentração relativamente pequeno, a vazão média do dia t pode ser influenciada pela precipitação medida no dia $t+1$;
- Em bacias com tempos de concentração maiores, pode haver uma defasagem temporal entre os picos de precipitação e de vazão. Neste caso, modelos concentrados ou mesmo semiconcentrados, como o Smap, têm mais dificuldades de reproduzir esta defasagem caso a precipitação média observada na bacia no instante de tempo t seja considerada integralmente como a precipitação a ser utilizada pelo modelo neste mesmo instante de tempo.

Por fim, a vazão média diária é calculada pela seguinte equação:

$$Q_{calc(t)} = \frac{(Ed_{(t)} + Ed2_{(t)} + Ed3_{(t)} + Eb_{(t)}) * Ad}{Str} \quad (16)$$

onde:

Ad = área de drenagem (km^2)

3.4.2. A versão mensal do SMAP

Apesar da versão mensal do Smap não ser objeto de estudo deste trabalho, foi a partir de algumas adaptações nesta metodologia que se obteve a versão semanal, justificando, portanto, o estudo de sua estrutura conceitual.

Ao utilizar intervalos de tempo mensais, são necessárias algumas modificações no mecanismo de cálculo do modelo, pois passamos a ter uma soma de eventos de chuva. Isso quer dizer que a chuva de entrada do modelo passa a ser toda a chuva acumulada no mês em questão. Além disso, o reservatório superficial é suprimido, pois seu amortecimento ocorre em intervalos menores que o mês. Outra diferença importante em relação a versão diária do Smap é que o conceito de capacidade de campo, utilizado no reservatório de solo, também é suprimido (LOPES, 1999).

Sendo assim, o modelo Smap, em sua versão mensal, é constituído de dois reservatórios matemáticos, cujas variáveis de estado são atualizadas a cada mês (LOPES, 1999), conforme apresentado pela Figura 5.

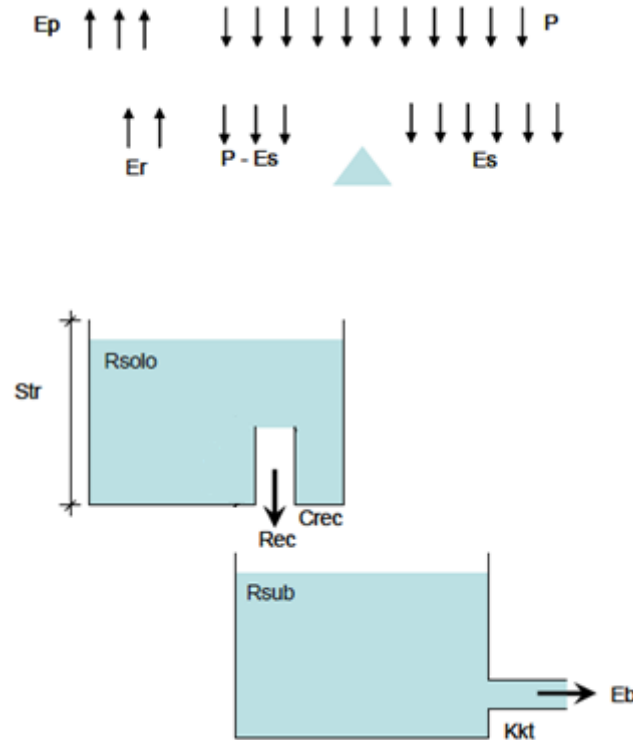


Figura 5 - Esquema do Modelo SMAP diário com quatro reservatórios matemáticos (adaptado pelo autor)

As variáveis de transferência da versão mensal do Smap são calculadas para cada passo de tempo, por meio das seguintes equações:

$$TU0_{(t)} = \frac{R_{solo}_{(t-1)}}{Str} \quad (17)$$

$$Dsol_{(t)} = 0,5 * (P_{(t)} - (P_{(t)}TU0_{(t)})^{k2t} - E_p * TU0_{(t)} - R_{solo}_{(t-1)} * \left(\frac{C_{rec}}{100}\right) * TU0_{(t)}^4) \quad (18)$$

$$TU_{(t)} = \frac{(R_{solo}_{(t-1)} + Dsol_{(t)})}{Str} \quad (19)$$

$$Es_{(t)} = (P_{(t)} * TU_{(t)})^{k2t} \quad (20)$$

$$Er_{(t)} = Ep_{(t)} * TU_{(t)} \quad (21)$$

$$Rec_{(t)} = Rsolo_{(t-1)} * \left(\frac{Crec}{100}\right) * (TU_{(t)})^4 \quad (22)$$

$$Eb_{(t)} = Rsub_{(t-1)} * \left(1 - 0,5^{(1/kkt)}\right) \quad (23)$$

onde:

$R_{solo(t)}$ = reservatório do solo no instante de tempo t (mm);

$R_{sub(t)}$ = reservatório subterrâneo no instante de tempo t (mm);

$P_{(t)}$ = precipitação média na bacia, acumulada no mês, a ser considerada no instante de tempo t (mm);

$Es_{(t)}$ = escoamento superficial no instante de tempo t (mm);

$Er_{(t)}$ = reservatório do solo no instante de tempo t (mm);

$Rec_{(t)}$ = recarga subterrânea no instante de tempo t (mm);

$Eb_{(t)}$ = escoamento de base no instante de tempo t (mm);

Str = capacidade de saturação do solo (mm);

$Ep_{(t)}$ = evapotranspiração potencial (mm);

$Tu_{(t)}$ = teor de umidade do solo (adimensional);

Tu_0 = teor de umidade do solo prévio (adimensional);

$Crec$ = parâmetro de recarga subterrânea (%);

$k2t$ = constante de recessão do escoamento superficial (mês);

kkt = constante de recessão do escoamento básico (mês).

t = instante de tempo (1 mês).

Já as variáveis de estado de cada um dos dois reservatórios são obtidas através das seguintes equações:

$$Rsolo_{(t)} = Rsolo_{(t-1)} + P_{(t)} - Es_{(t)} - Er_{(t)} - Rec_{(t)} \quad (24)$$

$$Rsub_{(t)} = Rsub_{(t-1)} + Rec_{(t)} - Eb_{(t)} \quad (25)$$

Por fim, a vazão média mensal é calculada pela equação:

$$Q_{calc(t)} = \frac{(Es_{(t)} + Eb_{(t)}) * Ad}{2630} \quad (26)$$

onde:

Ad = área de drenagem (km²)

3.4.3. Calibração do Modelo Smap

Os modelos hidrológicos do tipo “chuva-vazão” representam a etapa do ciclo hidrológico compreendida entre a precipitação e a vazão. A maioria destes modelos são conceituais e muitos de seus parâmetros como a taxa de infiltração ou o tipo de cobertura vegetal do solo, por exemplo, não podem ser estimados através de medidas diretas. Desse modo, uma etapa fundamental para a aplicação de um modelo chuva-vazão é a calibração dos seus parâmetros tomando como base sua série histórica de vazões observadas (CAPONI, SILVA e SANTOS, 2011). No entanto, devido ao avanço tecnológico da informática, os modelos hidrológicos estão cada vez mais sofisticados e complexo, recebendo uma quantidade cada vez maior de parâmetros variáveis. Isso acarreta na dificuldade da calibração manual e implica na necessidade técnico-científica de se utilizar a calibração automática (KOBİYAMA e PRETE, 2017).

Kobiyama e Prete (2017) apontam que o fator mais importante da calibração não é o valor isolado de cada um dos parâmetros do modelo, mas sim a combinação deles. Por consequência, o grande número de combinações possíveis dos parâmetros justifica a utilização da calibração automática, já que a calibração manual ou baseada na literatura seria uma tarefa extremamente difícil e complexa.

Conforme apresentado pela NT 139/2008 do ONS, a calibração da versão diária do Smap pode ser realizada por meio da rotina *Solver* da planilha eletrônica Excel, a qual ajusta os parâmetros de forma automática e iterativa. A função objetivo adotada é a maximização da seguinte expressão:

$$SomaCoef = Cef + Cer \quad (27)$$

Os valores de C_{ef} e C_{er} são obtidos por meio das seguintes expressões:

$$C_{ef} = \frac{\sum(Q_{obs(t)} - \overline{Q_{obs}})^2 - \sum(Q_{obs(t)} - Q_{calc(t)})^2}{\sum(Q_{obs(t)} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (28)$$

$$C_{er} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n \frac{abs(Q_{calc(t)} - Q_{obs(t)})}{Q_{obs(t)}}}{n} \quad (29)$$

onde:

C_{ef} = coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe;

C_{er} = coeficiente de erro relativo;

Q_{calc} = vazão calculada pelo modelo (m³/s);

Q_{obs} = vazão observada (m³/s)

O coeficiente de eficiência (C_{ef}) apresenta variação na faixa de valores compreendidos entre $-\infty$ e 1 e, devido à sua formulação, tem por característica ser mais sensível aos desvios nas vazões mais elevadas. Valores elevados deste coeficiente (mais próximos de 1) indicam elevada associação entre os dados observados e calculados, representando um bom ajuste do modelo aos dados de campo. A obtenção de um coeficiente de eficiência igual a 1 representaria, portanto, o ajuste perfeito entre as vazões observadas e calculadas (ONS, NT 139/2008).

O coeficiente de erro relativo (C_{er}) também apresenta variação na faixa de valores compreendidos entre $-\infty$ e 1, contudo, devido à sua formulação, tem por característica ser mais sensível aos desvios nas vazões mais baixas. De maneira análoga ao coeficiente de eficiência, a obtenção de um coeficiente de erro relativo igual a 1 representaria o ajuste perfeito entre as vazões observadas e calculadas (ONS, NT 139/2008).

Conforme apresentado pela Equação 19, o SomaCoef consiste na soma dos dois coeficientes, portanto o mesmo pode variar entre $-\infty$ e 2 e a obtenção de uma soma igual a 2 representaria o ajuste perfeito entre as vazões observadas e calculadas. Esta formulação do SomaCoef resulta em um coeficiente sensível aos desvios em todo o período do ano, tanto nas vazões mais baixas, quanto nas vazões mais elevadas (ONS, NT 139/2008).

Para executar essa etapa de calibração, são selecionados de dois a cinco períodos distintos de 365 dias que apresentem situações hidrológicas diversas na bacia em questão, ou seja, períodos com vazões elevadas e com estiagens. Uma vez calibrados os parâmetros tem início a etapa de validação, na qual são selecionados novamente de dois a cinco períodos distintos de 365 dias, diferentes daqueles utilizados na calibração. Calcula-se então a vazão prevista a partir da chuva observada para este período e dos parâmetros calibrados, obtendo por fim o SomaCoef deste período de validação. (ONS, NT 139/2008).

3.4.4. Métodos de reinicialização do modelo Smap

Para um modelo conceitual de previsão hidrológica realizar sua previsão é necessário que o modelo execute uma etapa anterior denominada de assimilação de dados ou aquecimento do modelo. Nessa etapa, o modelo recebe dados de períodos anteriores ao da previsão para estimar as condições iniciais da bacia e, se necessário, corrigir suas variáveis de estado com o objetivo de diminuir o desvio das vazões calculadas pelo modelo com as observadas (ONS, NT 0097/2018).

É importante pontuar que o modelo Smap opera de forma contínua no tempo, incorporando a cada intervalo de tempo a precipitação média na bacia, a contabilização de perdas por evaporação, a liberação de escoamentos e a atualização do nível d'água em cada um dos quatro reservatórios. Sendo assim, é inevitável que ocorram desvios entre o hidrograma de vazões observadas e o hidrograma de vazões calculadas pelo modelo, prejudicando a etapa de assimilação de dados. Normalmente, tais desvios são decorrência de:

- Erros ou falhas nos dados observados de precipitação;
- Baixa densidade da rede de estações pluviométricas utilizadas na operacionalização;
- Dados de evapotranspiração potencial com baixa representatividade das condições reais da bacia;
- Deficiência dos parâmetros obtidos nas etapas de calibração e validação do modelo;
- Deficiência nas formulações básicas do modelo (ONS, NT 139/2008).

Caso esses desvios não sejam corrigidos, ou seja, caso não haja um ajuste razoável entre o hidrograma de vazões observadas e o hidrograma de vazões calculadas pelo modelo na assimilação de dados, a qualidade das vazões previstas poderá ser comprometida. Conforme indicado pela NT 139/2008 do ONS, pode-se utilizar dois métodos para obter-se esse ajuste na reinicialização do modelo: ajustando as variáveis de estado iniciais; e ajustando os valores da precipitação observada.

O primeiro método tem por premissa a utilização de um algoritmo de otimização para calcular as variáveis de estado iniciais do período de assimilação, de modo que o ponto de partida do hidrograma calculado tenha o menor desvio possível do ponto de partida do hidrograma observado. Já no segundo método, denominado de “chuva perfeita”, utiliza-se um algoritmo de otimização para variar os volumes de precipitação observada no aquecimento do modelo e, conseqüentemente, as vazões calculadas a partir desta chuva, visando atingir o menor desvio possível entre os hidrogramas calculados e observados (ONS, NT 139/2008).

A NT 139/2008 do ONS sugere a utilização concomitante de ambos os métodos, pois o ajuste das variáveis de estados iniciais tem melhor desempenho para o período de chuvas fracas ou nulas, enquanto que o método da “chuva perfeita” apresenta melhor desempenho para o período de chuvas médias ou fortes. Além disso, em ambos os métodos é conveniente impor limites mínimos e máximos para a otimização das variáveis de ajuste, sendo sugerido os valores a seguir:

$$0,8 E_{b(t)} \leq E_{bin} \leq 1,2 E_{b(t)} \quad (30)$$

$$0,5 P_{(t)} \leq P_{(t)}^* \leq 2,0 P_{(t)} \quad (31)$$

onde:

E_{bin} = vazão básica inicial, no início do período de assimilação de dados (m^3/s);

$E_{b(t)}$ = vazão básica calculada pelo modelo na simulação anterior, correspondente ao mesmo período de E_{bin} (m^3/s);

$P_{(t)}^*$ = precipitação a ser considerada pelo modelo na etapa de operacionalização (mm);

$P_{(t)}$ = precipitação observada média na bacia (mm).

4.METODOLOGIA

A partir da versão mensal do Smap foi gerada uma versão semanal deste mesmo modelo, o qual foi calibrado para duas sub-bacias do SIN: a bacia da UHE Camargos (bacia do Grande); e a bacia da UHE Santa Clara (bacia do Iguaçu). Utilizando esta calibração para a versão semanal do Smap e a calibração do ONS para a versão diária do Smap, fez-se um *back test* para ambas as bacias para o período entre setembro de 2019 e setembro de 2020 no qual comparou-se o resultado dos modelos Previvaz, Smap diário e Smap semanal com as vazões observadas. Como o modelo Smap depende de um input de chuva, utilizou-se dois cenários de chuva na comparação: o primeiro cenário utilizou a previsão de precipitação do modelo meteorológico CFSv2; o segundo cenário utilizou a precipitação realizada. Por fim, empregou-se as métricas de NASH e MAPE para avaliar o erro de cada modelo. O fluxograma desta metodologia é apresentado pela Figura 6.

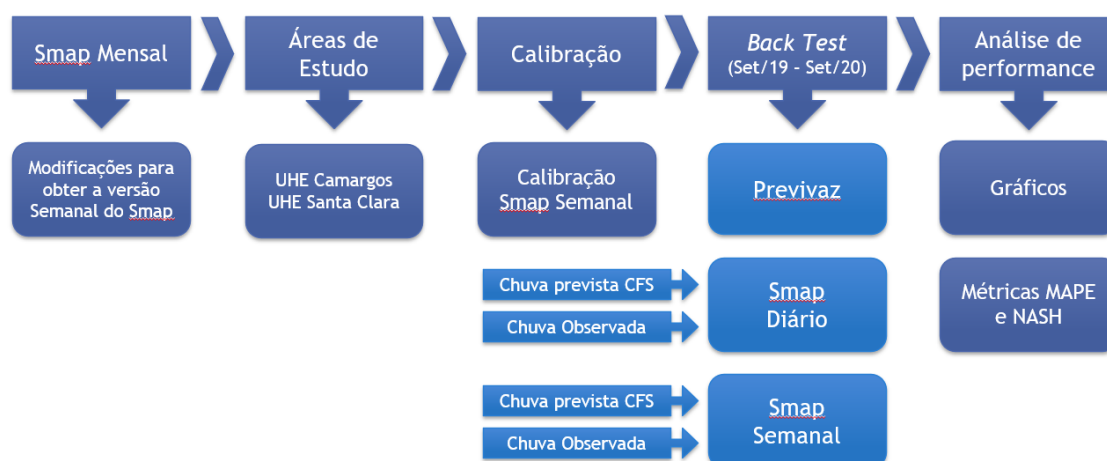


Figura 6 - Fluxograma da metodologia empregada

4.1. A versão semanal do Smap

A versão semanal proposta do Smap baseia-se no mecanismo da versão mensal deste mesmo modelo. As modificações necessárias para transformar a versão mensal na versão semanal são listadas a seguir:

1. O instante de tempo “ t ” passa a corresponder a 7 dias e, devido ao processo de programação da operação do sistema elétrico brasileiro, a semana tem início no sábado e fim na sexta;
2. A precipitação média ($P_{(t)}$), passa a corresponder ao acumulado semanal de chuva;

3. Na vazão calculada ($Q_{calc(t)}$), o fator 2630, que faz a conversão da vazão mensal para a vazão média em m^3/s , passa a ser 604,8, e a vazão calculada passa a corresponder a vazão média semanal em m^3/s .
4. Utilizou-se 12 semanas para aquecimento do modelo.

4.2. O modelo meteorológico CFSv2

A primeira versão do *Climate Forecast System* (CFS), entrou em operação em agosto de 2004 e foi amplamente utilizada pela comunidade científica, sendo descomissionado apenas em setembro de 2012, após a entrada em operação da segunda versão do CFS, o CFSv2, em março de 2011 (BECKER, BEHRINGER, *et al.*, 2014).

Diariamente são realizadas quatro rodadas de controle do CFSv2 com 9 meses de horizonte de previsão. Essas rodadas são executadas às 00, 06, 12 e 18 UTC. Além dessas rodadas são ainda executadas três rodadas sazonais perturbadas às 00 UTC e outras três rodadas perturbadas com até 45 dias às 06, às 12 e às 18 UTC, resultando num total de 16 rodadas diárias, conforme ilustra a Figura 7 (BECKER, BEHRINGER, *et al.*, 2014).

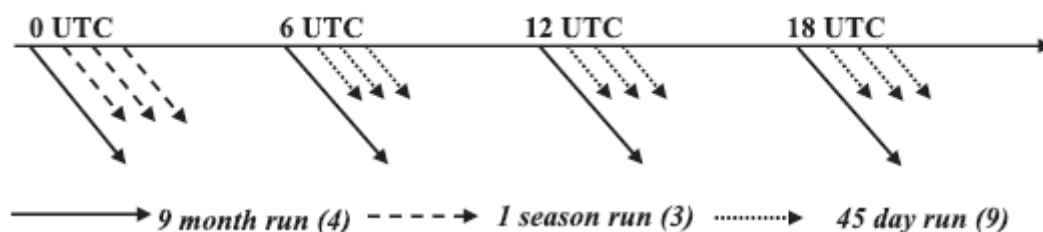


Figura 7 - Configuração operacional das rodadas diárias do modelo CFSv2 (BECKER, BEHRINGER, *et al.*, 2014)

Previsões determinísticas podem resultar em prognósticos bastante distintos da realidade, uma vez que um sistema de previsão contém diversas incertezas oriundas da natureza caótica da atmosfera, que transfere ao modelo meteorológico grande sensibilidade (QUEDI, 2019). As incertezas podem ser decorrentes do próprio modelo (parametrizações físicas, arredondamentos, etc.), do cenário utilizado e das condições iniciais. Uma maneira de quantificar as incertezas é através da realização de várias simulações (*ensembles*) de um determinado período e computar a médias dessas simulações (DIAS, DUTRA, *et al.*, 2018). Sendo assim, no presente estudo foram utilizados os ensembles das quatro rodadas de controle diárias do CFS.

4.3. Áreas de estudo

Para o estudo de caso deste trabalho foram selecionadas sub-bacias em regiões geográficas distintas, pertencentes a bacias com relevante potencial de geração hidrelétrica. São elas:

1. UHE Camargos – sub-bacia pertencente a bacia do Rio Grande, localizada na região Sudeste;
2. UHE Santa Clara – sub-bacia pertencente a bacia do Rio Iguaçu, localizada na região Sul.

A escolha destas bacias foi motivada pelo fato de serem bacias de cabeceira, logo a vazão incremental é igual a vazão natural. Isso exclui a interferência de eventos hidrológicos em sub-bacias a montante no regime de vazões analisado, além de evitar que a análise seja contaminada por eventuais desvios nos cálculos das vazões incrementais. Por fim, é importante salientar que o Smap diário já é aplicado em ambas as bacias pelo ONS.

4.3.1. A bacia hidrográfica da UHE Carmargos

Situada no estado de Minas Gerais, a bacia hidrográfica da UHE Camargos compõe a região do Alto Rio Grande. Essa região apresenta clima tropical, com chuvas no verão e estiagem no inverno. A temperatura média anual é de 20°C, sendo que os meses mais quentes do ano ocorrem entre dezembro e janeiro, e os meses mais frio são junho e julho (ONS, NT 139/2008).

Na Figura 8, ilustra-se a região ocupada pela bacia hidrográfica do Rio Grande, com a sub-bacia da UHE Camargos em seu interior, representada pelo polígono azul. A região tem uma estação chuvosa no verão, que se estende de outubro a março, período no qual ocorrem cerca de 80% do total precipitado sobre a bacia. A estação seca ocorre entre os meses de junho e agosto, no inverno. Já os meses de abril, maio e setembro são considerados meses de transição entre as estações seca e chuvosa (ONS, NT 139/2008).

No verão, as chuvas intensas são causadas principalmente pelo aquecimento do ar durante o dia, disponibilidade de umidade na atmosfera, deslocamento de frente frias, áreas de instabilidade e pela atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul – ZCAS. Já durante o inverno, somente o deslocamento de frentes frias ocasiona precipitação na

região. Entretanto, neste período elas contam com menor quantidade de umidade atmosférica, resultando em chuvas com menor intensidade (ONS, NT 139/2008).



Figura 8 - Representação da Bacia do Rio Grande e da sub-bacia da UHE Camargos em seu interior (GOOGLE EARTH PRO)

A bacia do Rio Grande tem seu potencial hidrelétrico intensamente explorado. Na Figura 9 é apresentada a representação esquemática da cascata de usinas hidrelétricas instaladas nesta bacia.

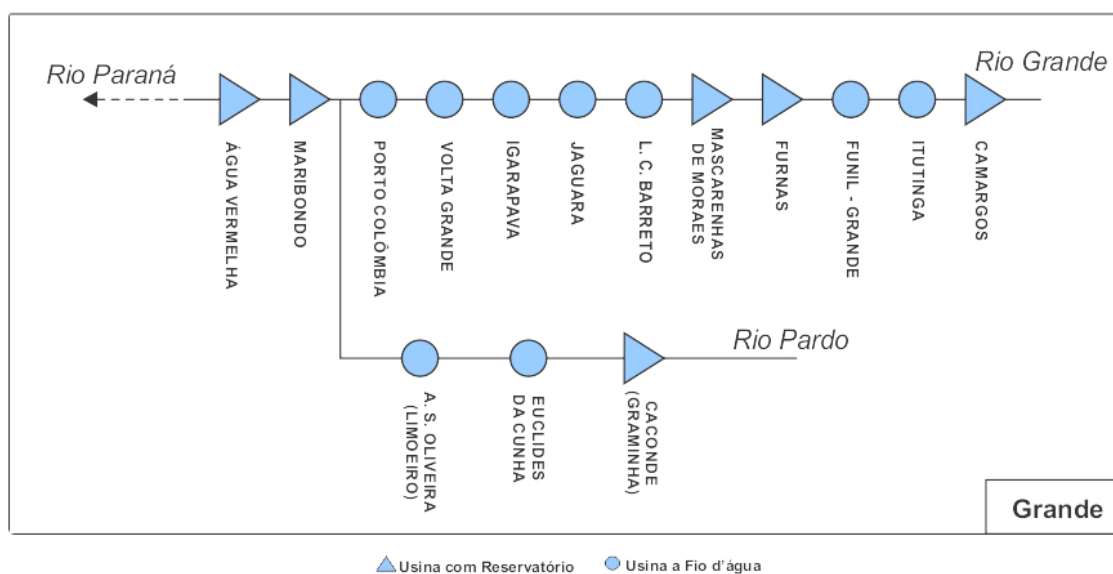


Figura 9 - Representação esquemática da exploração hidrelétrica na bacia do Rio Grande (ANA, 2020)

4.3.2. A bacia hidrográfica da UHE Santa Clara

Situada no estado do Paraná, a bacia hidrográfica da UHE Santa Clara localiza-se na região de cabeceira do Rio Jordão, um dos principais afluentes do Rio Iguaçu. A Figura 10 ilustra a região ocupada pela bacia hidrográfica do Rio Iguaçu, com a sub-bacia da UHE Santa Clara em seu interior sendo representada pelo polígono azul.

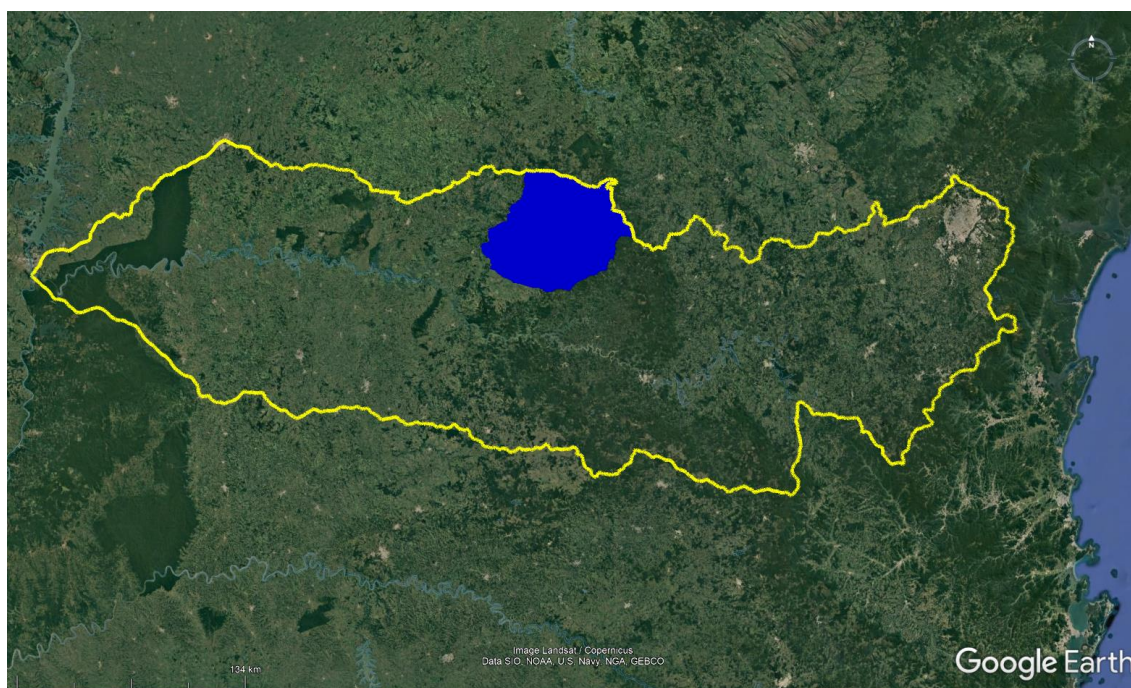


Figura 10 - Representação da bacia do Rio Iguaçu e da sub-bacia da UHE Santa Clara em seu interior (GOOGLE EARTH PRO)

As condições climáticas da região são, de modo geral, determinadas pelo movimento relativo das massas de ar que circulam sobre a região. Tais movimentos são influenciados pela posição relativa dos anticiclones sobre os oceanos Pacífico e Atlântico e do centro de baixa pressão localizado sobre o continente. Ao longo do ano, esses centros variam de posição e intensidade de maneira irregular, acarretando como consequência uma distribuição errática das principais características climáticas da região, como temperatura, pressão, umidade do ar e precipitação (ONS, NT 149/2007).

A bacia do Rio Iguaçu apresenta relevo bastante irregular, possuindo em seu trecho superior vales amplos e de baixa declividade, que lhe proporcionam boas possibilidades de armazenamento de água e em seu trecho médio e inferior encontram-se vales rochosos estreitos, com declividade acentuadas. Esses aspectos tornam o Rio Iguaçu particularmente atraente para a implantação de aproveitamento hidrelétricos (ONS, NT

$$NASH = \frac{\sum(Qobs_{(t)} - \overline{Qobs})^2 - \sum(Qobs_{(t)} - Qcalc_{(t)})^2}{\sum(Qobs_{(t)} - \overline{Qobs})^2} \quad (32)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{abs(Qcalc_{(t)} - Qobs_{(t)})}{Qobs_{(t)}}}{n} \quad (33)$$

4.4.1. Dados utilizados no Previvaz

Para rodar o Previvaz são necessários uma série de arquivos que, quando agrupados em uma pasta, recebem o nome de Deck. Toda quinta-feira o ONS gera um novo Deck com os dados necessários para a previsão semanal com o modelo Previvaz. Os dados utilizados neste trabalho para rodar o Previvaz foram obtidos dos Decks semanais publicados pelo ONS.

A principal informação necessária para rodar o modelo Previvaz é o histórico de vazões médias semanais para o posto em questão. Neste trabalho empregou-se o mesmo histórico utilizado pelo ONS em seus Decks para cada uma das semanas simuladas. Porém foi necessário fazer uma modificação na data de partida do modelo, pois, conforme discutido anteriormente, o ONS utiliza a previsão do modelo Smap diário para adicionar uma semana de vazões previstas no histórico de vazões observadas do Previvaz. Visando eliminar qualquer influência das previsões do Smap nas previsões do Previvaz, neste trabalho a semana prevista pelo Smap não foi considerada no histórico do Previvaz, antecipando-se a data de partida do Previvaz em uma semana quando comparado às rodadas do ONS.

4.4.2 Dados utilizados no Smap

Para rodar o aquecimento de ambas as versões do modelo Smap, é necessário dispor de um histórico com as vazões observadas e também com a precipitação média observada na bacia. Desse modo, os dados de vazão observada foram obtidos de relatórios consistidos disponibilizados pelo ONS. Já os dados de chuva observada foram obtidos a partir dos arquivos que compõem os Deck do SMAP publicados semanalmente pelo ONS, cujos valores de chuva foram agrupados formando um histórico.

Além desses dados, necessários para o aquecimento do modelo, ainda são necessários os dados de previsão de chuva, a partir dos quais o SMAP devolverá a previsão de vazão. Neste trabalho foram empregadas duas diferentes fontes de dados para

compor a chuva prevista no modelo: primeiro, utilizou-se a previsão de chuva do modelo CFS v2; segundo, por estar realizando-se um *back test*, utilizou-se os dados da chuva observada proveniente do histórico anteriormente comentado como se fosse chuva prevista.

É importante ressaltar que o modelo de previsão de precipitação utilizado neste trabalho, o CFS v2, não é o mesmo modelo utilizado pelo ONS em suas previsões de vazão semanais. O ONS atualmente emprega um conjunto de 3 modelos diferentes – ETA, GEFS e ECMWF – para uma previsão de no máximo 15 dias. Por este trabalho buscar uma previsão de vazões para um horizonte de tempo maior (até 42 dias, ou 6 semanas) estes modelos não seriam adequados para este propósito. Logo, o modelo CFS v2 foi o escolhido para fornecer esses dados por ter um horizonte de previsão longo o suficiente para abranger o horizonte de estudo, e por ser um modelo disponibilizado gratuitamente pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) dos Estados Unidos.

5. RESULTADOS

5.1. Calibração do Modelo Smap

Buscando-se ser o mais fiel possível aos procedimentos adotados pelo ONS, neste trabalho utilizou-se os valores calibrados e adotados oficialmente pelo ONS, publicados na NT 0097/2018, para rodar as previsões da versão diária do Smap. Deste modo, a Tabela 1 apresentam os valores destes coeficientes para as sub-bacias da UHE Camargos e da UHE Santa Clara respectivamente.

Parâmetros	UHE Camargos	UHE Santa Clara
Ad [km ²]	6.279	3.912
Kt-3	0,000	0,028
Kt-2	0,000	0,028
Kt-1	0,000	0,028
Kt-0	0,330	0,238
Kt+1	0,670	0,535
Kt+2	0,000	0,144
Str [mm]	100,0	183,3
K2t [dia]	5,5	3,0
Crec [%]	100,0	3,2
Ai [%]	2	1
Capc [mm]	42	50
Kkt [dia]	150	30
K2t2 [dia]	10	10
H1 [mm]	200	200
H [mm]	200	200
K3t [dia]	10	10
K1t [dia]	10	10
Ecof	1,05	0,88
Pcof	1,00	0,97
Ecof 2	0	0
Limite superior ebin	1,2	1,2
Limite inferior ebin	0,8	0,8

Tabela 1 - Valores dos parâmetros para a versão diária do Smap divulgados pelo ONS (ONS, NT 0097/2018)

A calibração da versão semanal do SMAP foi feita por meio da rotina *Solver* da planilha eletrônica Excel, utilizando o método de otimização GRG Não Linear para ajustar os parâmetros de forma automática e iterativa. De maneira análoga à metodologia

empregada para a calibração da versão diária, selecionou-se 10 anos de dados de chuva e de vazão do histórico, dos quais 60% deles foram empregados para calibração e 40% para validação. Os valores obtidos na calibração para cada um dos parâmetros da UHE Camargos e da UHE Santa Clara são apresentados pela Tabela 2, e seus respectivos hidrogramas de calibração são exibidos pelas Figuras 12 e 13.

Parâmetros	UHE Camargos	UHE Santa Clara
Ad [km²]	6.279	3.912
Kt-3	0,03	0,08
Kt-2	0,15	0,08
Kt-1	0,37	0,39
Kt-0	0,44	0,45
Kt+1	0,01	0,00
Str [mm]	456	556
K2t [dia]	1,72	9,98
Crec [%]	54,04	1,57
Kkt [dia]	20	20
Ecof	1,20	1,11
Pcof	1,01	1,19
Limite superior ebin	1,2	1,2
Limite inferior ebin	0,8	0,8

Tabela 2 - Valores dos parâmetros para a versão semanal do Smap, obtidos na calibração realizada pelo autor

Analisando as Figuras 12 e 13, podemos notar que as recessões das vazões calculadas em ambas as bacias estão bem ajustadas quando comparadas às recessões das vazões observadas. Esse é um bom indicativo visual para determinar a qualidade da calibração, pois, com a ausência de chuva desses períodos, pode-se atribuir as incertezas obtidas apenas ao modelo hidrológico. Além disso, outro indicador visual que pode ser utilizado para a análise da calibração é o escoamento base. O esperado é que o escoamento base não fique acima do escoamento observado, nem mesmo nos períodos de baixa vazão, quando o comportamento esperado do escoamento base é se igualar ao escoamento superficial. Pode-se observar este comportamento no escoamento base de ambas as bacias, indicando uma calibração satisfatória.

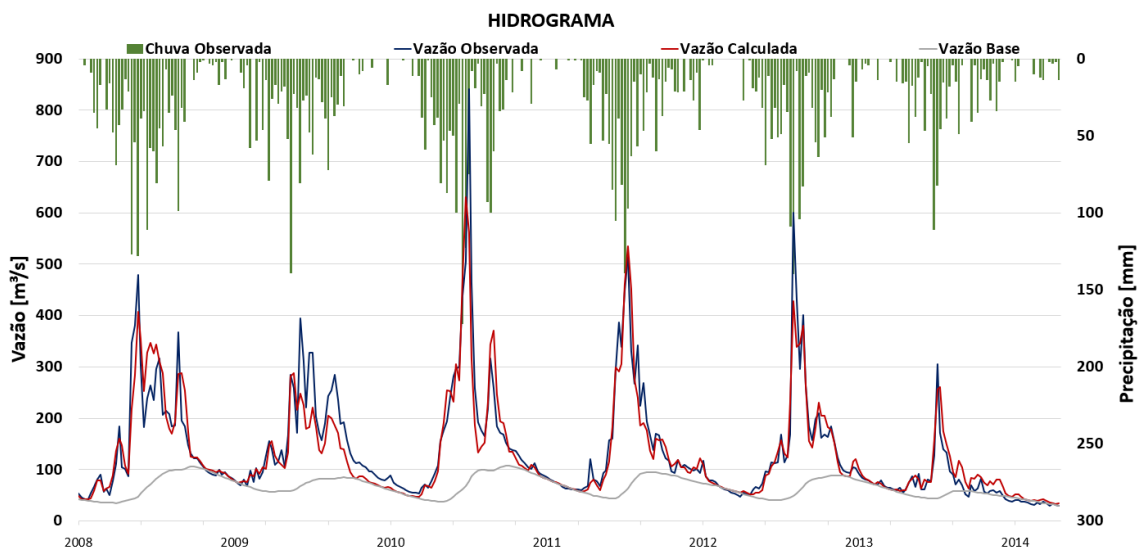


Figura 12 - Hidrograma com o resultado da calibração da versão semanal do Smap para a sub-bacia da UHE Camargos

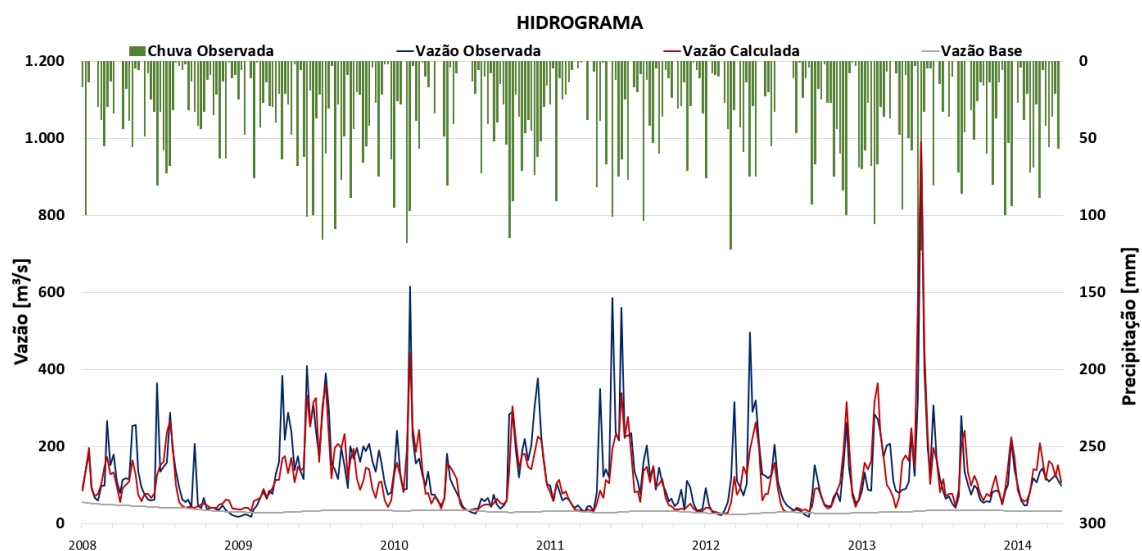


Figura 13 - Hidrograma com o resultado da calibração da versão semanal do Smap para a sub-bacia da UHE Santa Clara

A Tabela 3 apresenta o resultado do cálculo dos coeficientes da função objetivo da calibração. Como os coeficientes de ambos os modelos apresentaram resultados individuais maiores que 0,7 e SomaCoef maior que 1,5, a calibração foi considerada satisfatória. É importante ressaltar que o modelo Previzaz, por ser um modelo estocástico, não precisa ser calibrado.

Coeficientes	Camargos	Santa Clara
Cef	0,86	0,81
Cer	0,86	0,72
SomaCoef	1,72	1,53

Tabela 3 - Coeficientes da calibração por bacia

5.2. Resultados da bacia de Camargos

Nas Figuras 14 a 31 ilustra-se os resultados obtidos com as rodadas de *Back Test* para a bacia da UHE Camargos. Os resultados foram agrupados por semana operativa, de modo a representar melhor a performance dos modelos para cada horizonte de previsão. Para melhor visualização os gráficos apresentam os resultados do modelo Previvaz separadamente dos modelos Smap Diário (Smap D) e Smap Semanal (Smap S), comparando as vazões previstas com as vazões observadas no mesmo período. No caso do Smap, apresenta-se separadamente ainda os resultados com a chuva observada (OBS) e com os dados do modelo CFS v2 (CFS).

Analisando os gráficos, percebe-se que o modelo Previvaz, nas primeiras semanas de previsão propagou a tendência das vazões observadas da semana anterior, ou seja ele apresentou a tendência das vazões observadas com uma semana de atraso. Para a quarta, quinta e sexta semanas de previsão ele apresentou um viés de superestimação das vazões durante o período úmido da bacia da UHE Camargos, apesar de mostrar dificuldades em prever os picos de vazões.

O Smap semanal, quando utilizada a chuva prevista pelo CFS, mostrou volatilidade menor que a apresentada pela versão diária do Smap, indicando que a versão semanal é menos sensível à variação diária dos volumes de chuva previstos pelo modelo meteorológico.

Já, quando utilizada a chuva observada, a versão semanal do Smap mostrou boa aderência para as vazões mais baixas, mas mostrou uma tendência em superestimar os picos de vazão. Pode-se perceber ainda que, tanto na versão diária quanto na semanal, as vazões calculadas a partir da chuva observada apresentam boa aderência às vazões observadas, indicando consistência nas previsões de ambos os modelos hidrológicos.

CAMARGOS - 1ª SEMANA OPERATIVA

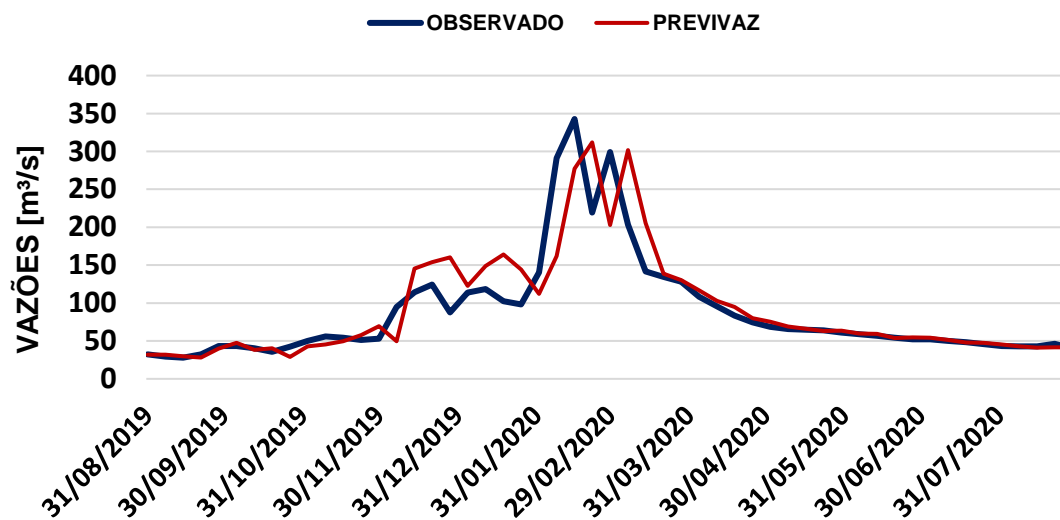


Figura 14 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previvaz para primeira semana operativa da bacia de Camargos.

CAMARGOS - 1ª SEMANA OPERATIVA

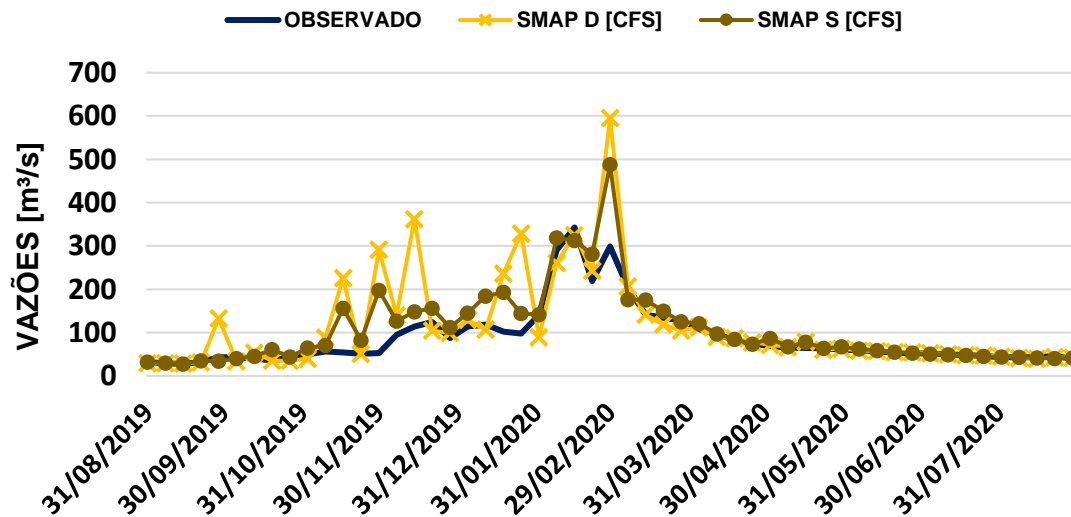


Figura 15 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para primeira semana operativa da bacia de Camargos.

CAMARGOS - 1ª SEMANA OPERATIVA

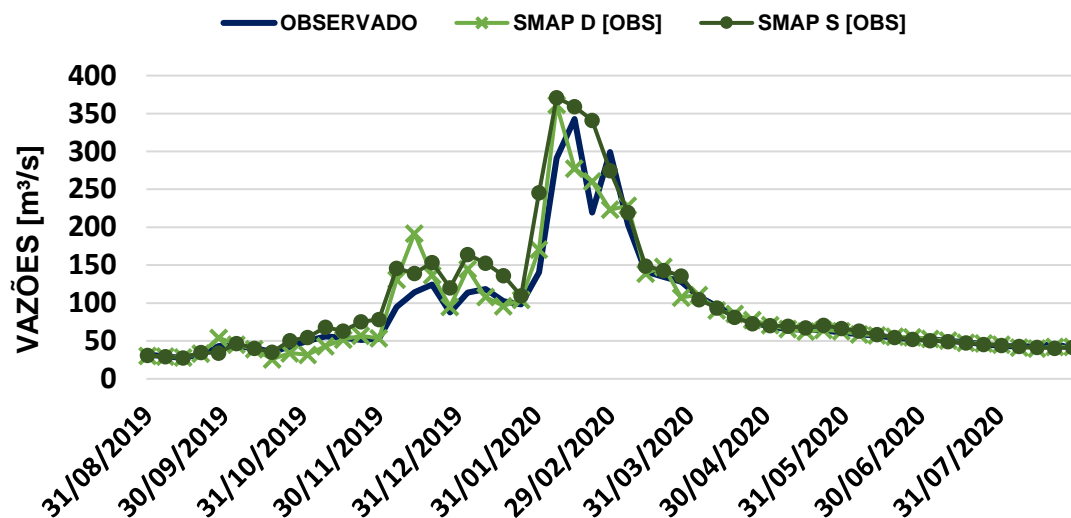


Figura 16 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para primeira semana operativa da bacia de Camargos.

CAMARGOS - 2ª SEMANA OPERATIVA

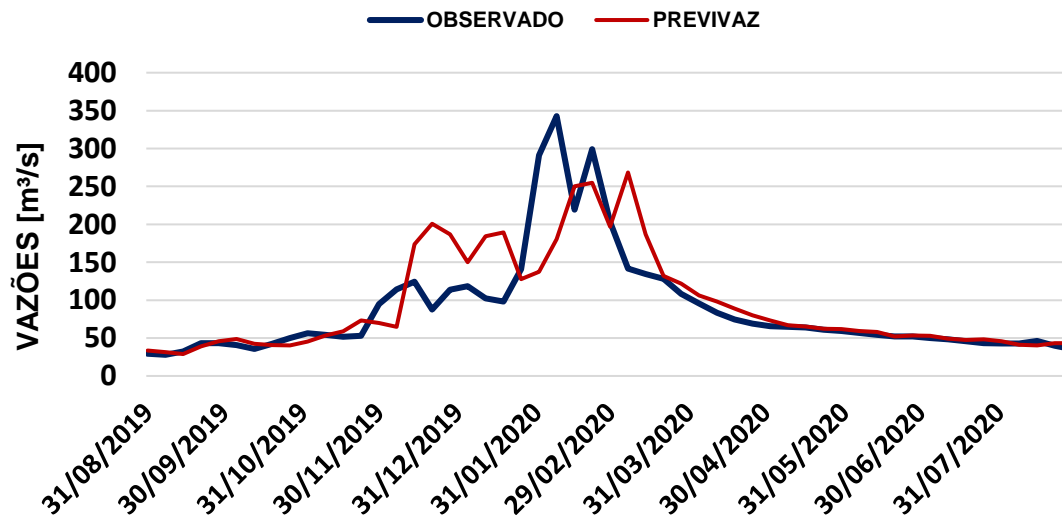


Figura 17 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previzaz para segunda semana operativa da bacia de Camargos.

CAMARGOS - 2ª SEMANA OPERATIVA

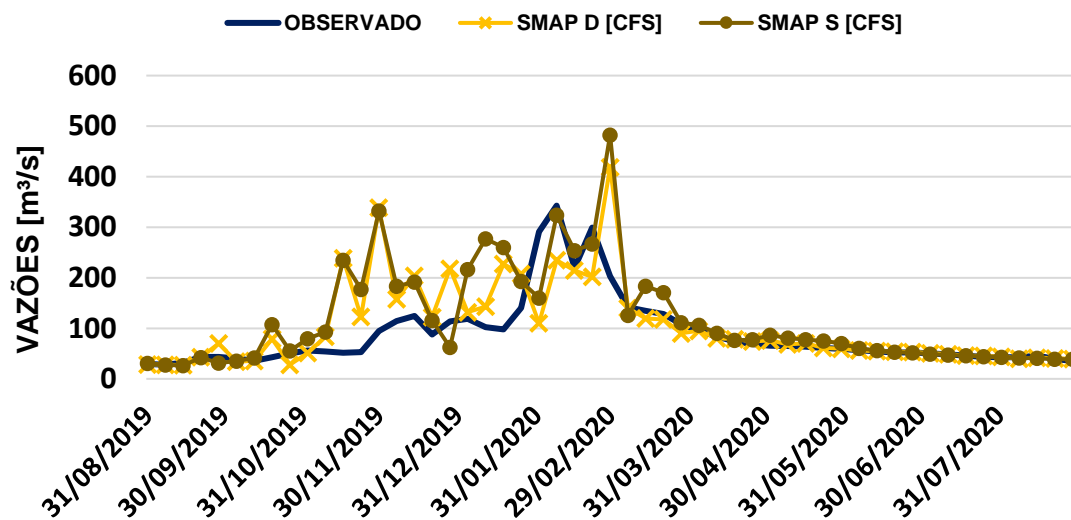


Figura 18 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para segunda semana operativa da bacia de Camargos.

CAMARGOS - 2ª SEMANA OPERATIVA

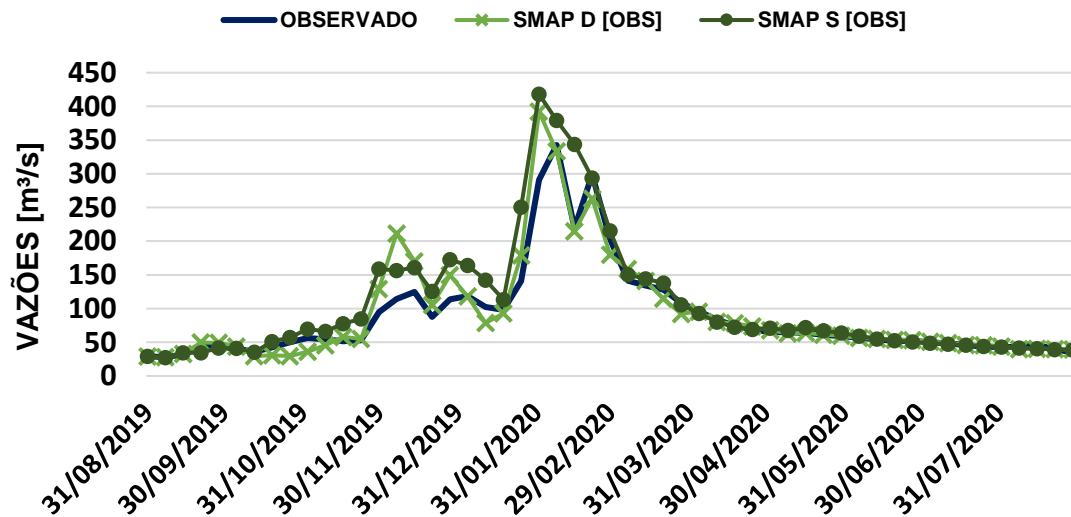


Figura 19 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para segunda semana operativa da bacia de Camargos.

CAMARGOS - 3ª SEMANA OPERATIVA

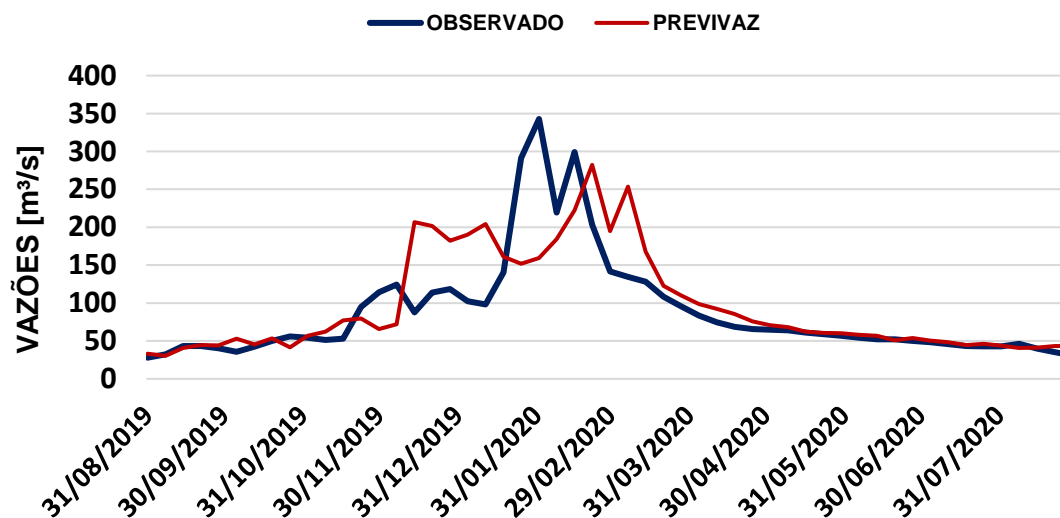


Figura 20 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previvaz para terceira semana operativa da bacia de Camargos.

CAMARGOS - 3ª SEMANA OPERATIVA

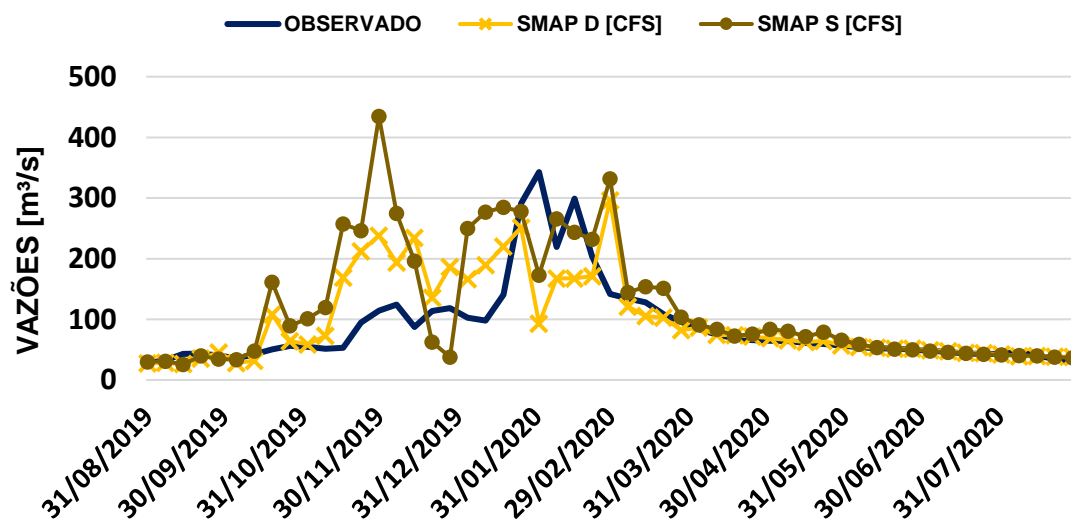


Figura 21 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para terceira semana operativa da bacia de Camargos.

CAMARGOS - 3ª SEMANA OPERATIVA

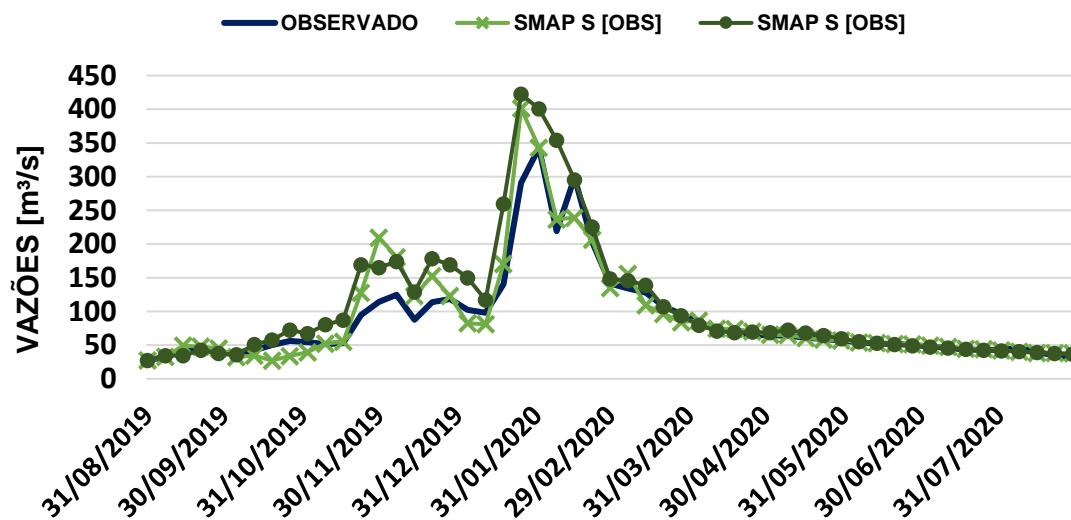


Figura 22 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para terceira semana operativa da bacia de Camargos.

CAMARGOS - 4ª SEMANA OPERATIVA

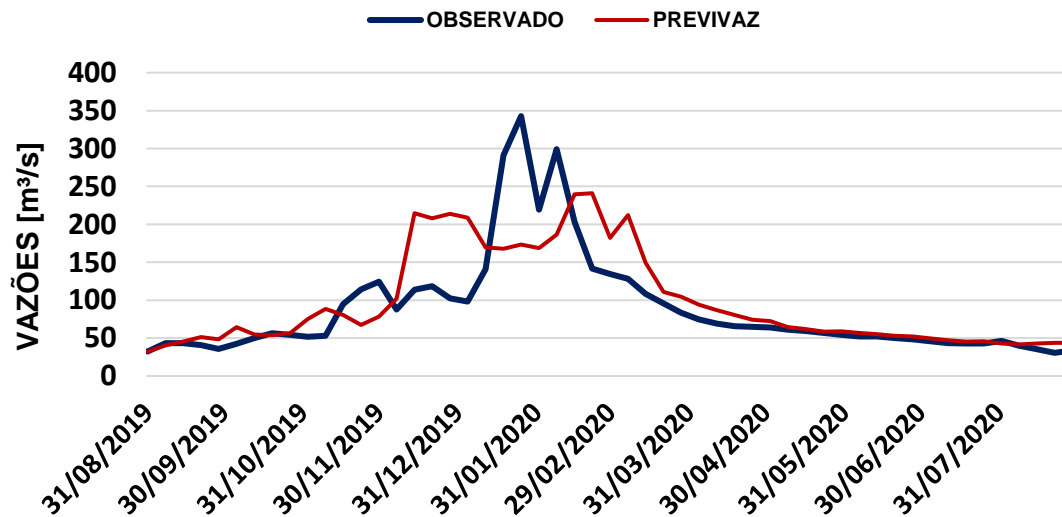


Figura 23 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previzaz para quarta semana operativa da bacia de Camargos.

CAMARGOS - 4ª SEMANA OPERATIVA

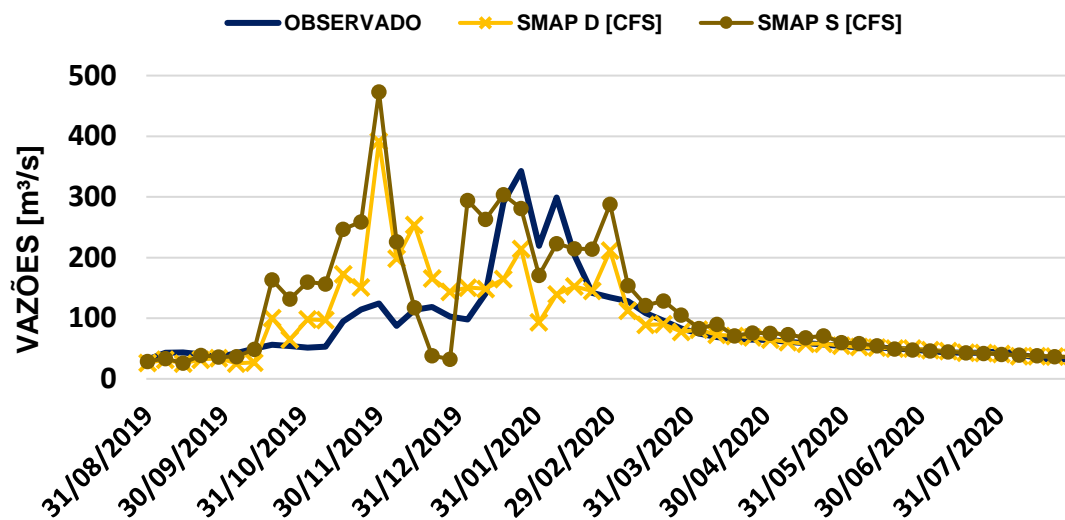


Figura 24 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para quarta semana operativa da bacia de Camargos.

CAMARGOS - 4ª SEMANA OPERATIVA

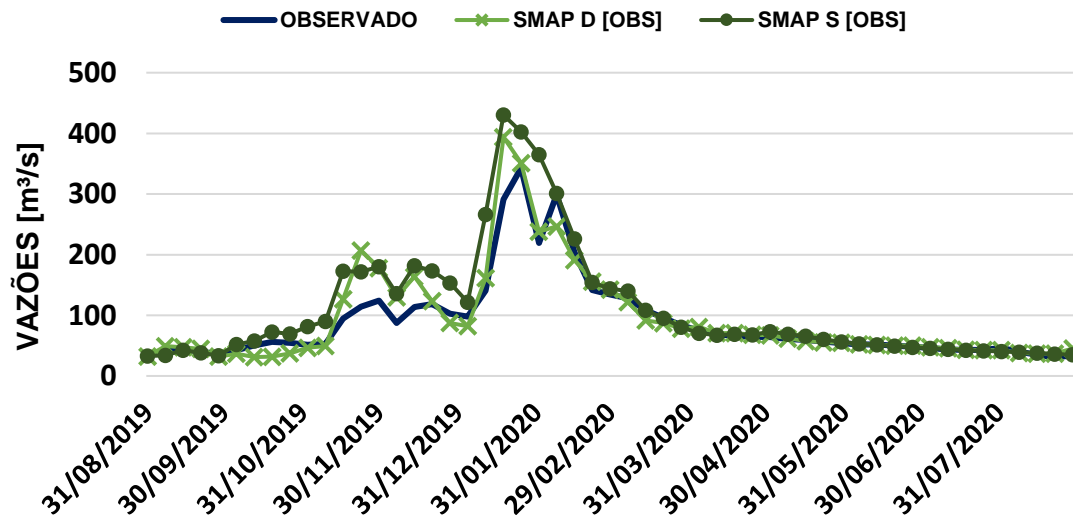


Figura 25 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para quarta semana operativa da bacia de Camargos.

CAMARGOS - 5ª SEMANA OPERATIVA

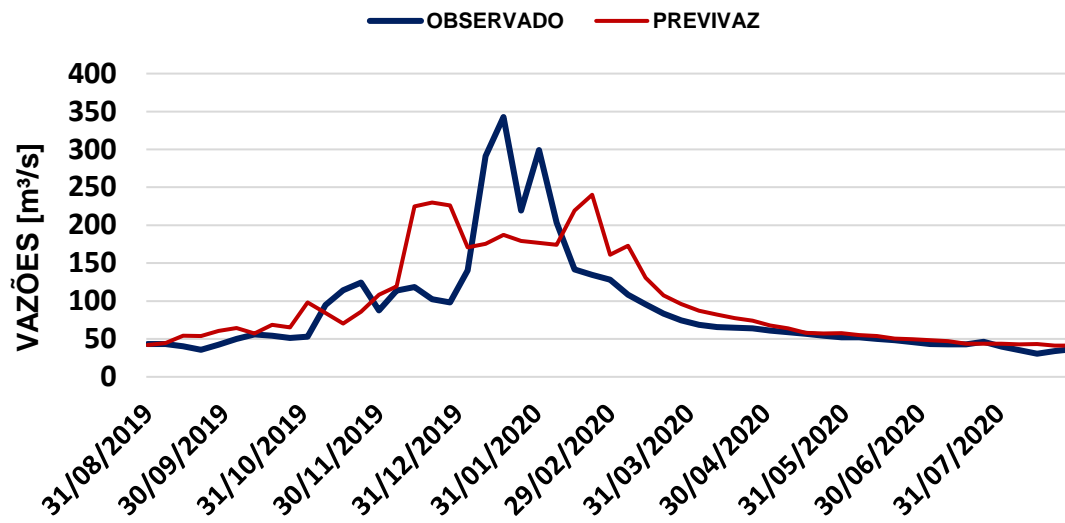


Figura 26 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previvaz para quinta semana operativa da bacia de Camargos.

CAMARGOS - 5ª SEMANA OPERATIVA

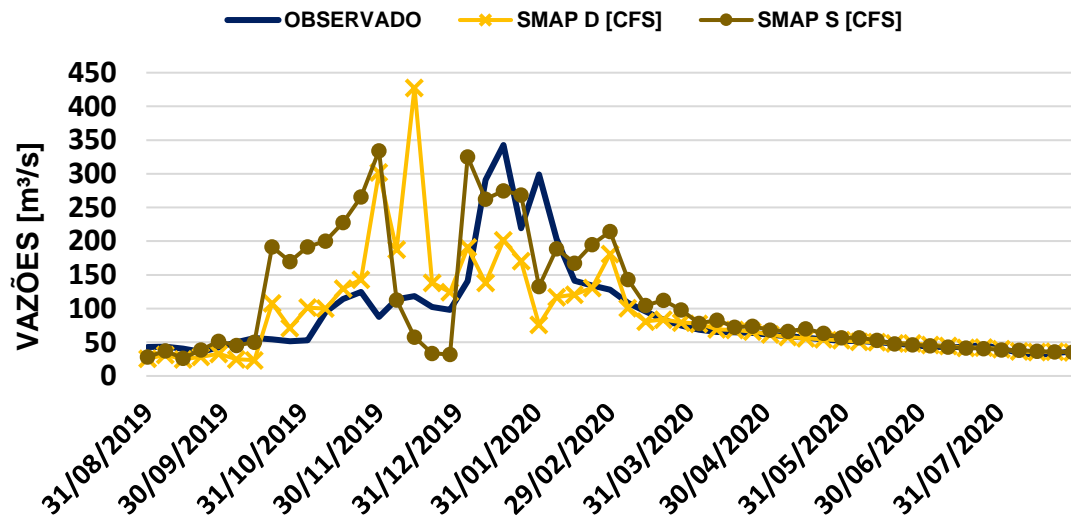


Figura 27 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para quinta semana operativa da bacia de Camargos.

CAMARGOS - 5ª SEMANA OPERATIVA

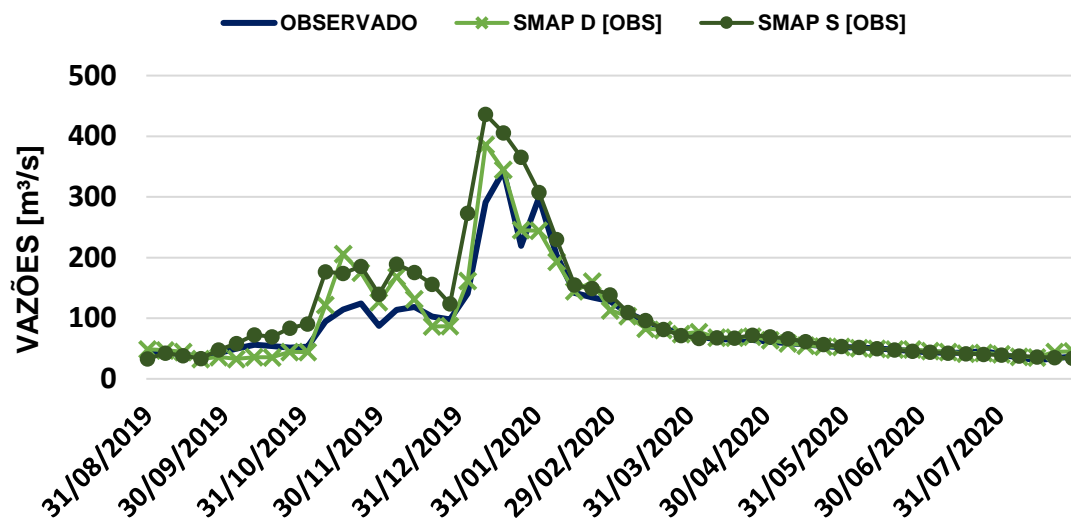


Figura 28 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para quinta semana operativa da bacia de Camargos.

CAMARGOS - 6ª SEMANA OPERATIVA

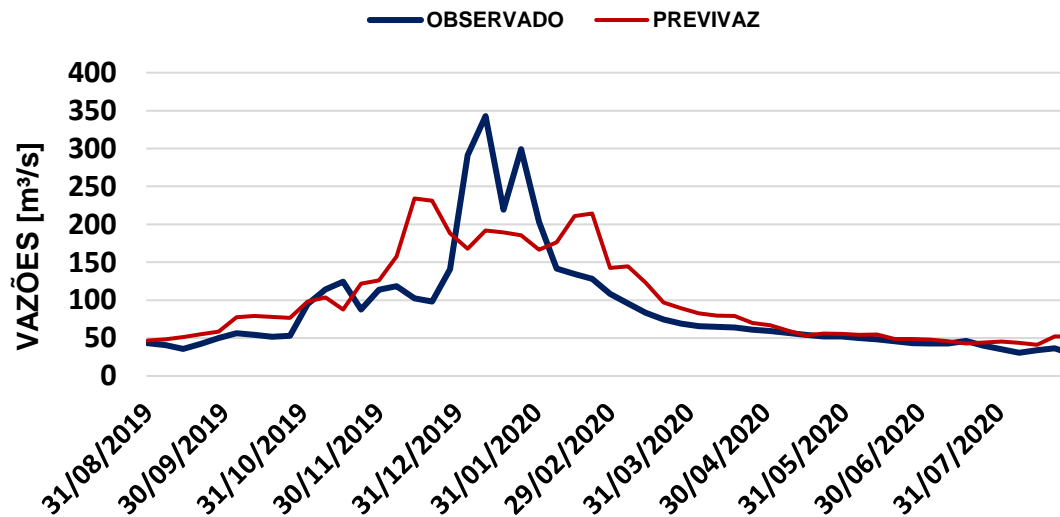


Figura 29 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previvaz para sexta semana operativa da bacia de Camargos.

CAMARGOS - 6ª SEMANA OPERATIVA

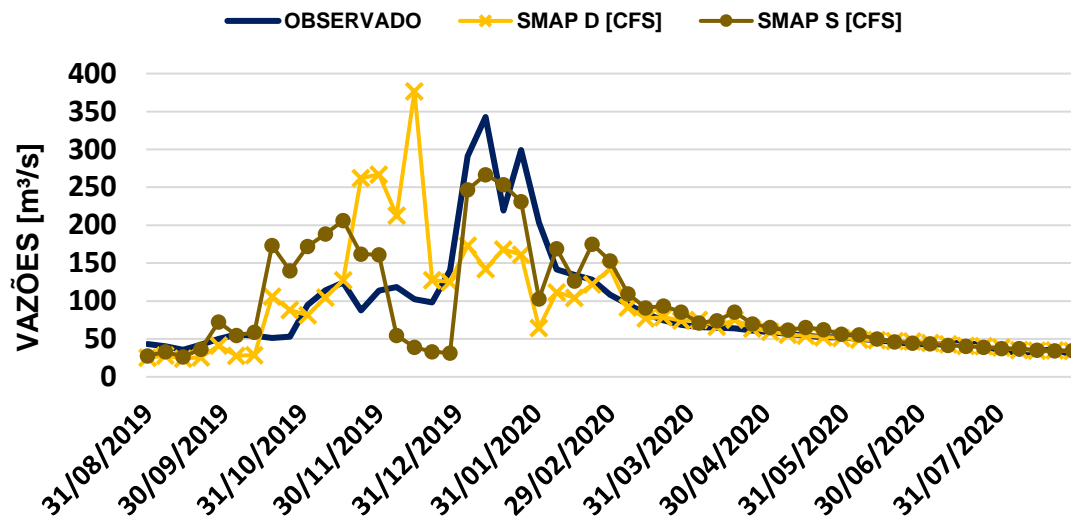


Figura 30 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para sexta semana operativa da bacia de Camargos.

CAMARGOS - 6ª SEMANA OPERATIVA

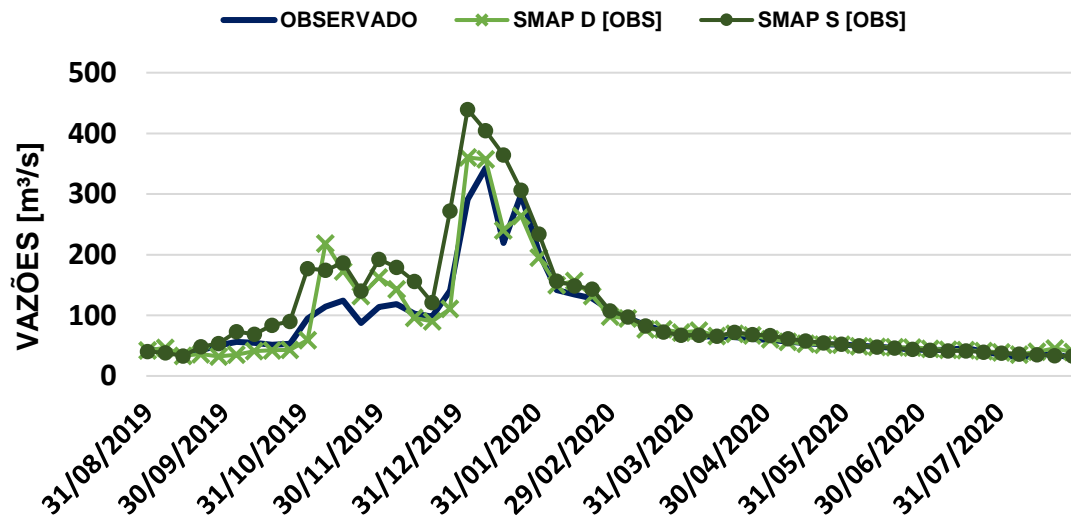


Figura 31 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para sexta semana operativa da bacia de Camargos.

5.3. Resultados da bacia de Santa Clara

Nas Figuras 32 a 49 ilustra-se os resultados obtidos com as rodadas de *Back Test* para a bacia da UHE Santa Clara. Os resultados foram agrupados por semana operativa, de modo a representar melhor a performance dos modelos para cada horizonte de previsão. Para melhor visualização os gráficos apresentam os resultados do modelo Previvaz separadamente dos modelos Smap Diário (Smap D) e Smap Semanal (Smap S), comparando as vazões previstas com as vazões observadas no mesmo período. No caso do Smap, apresenta-se separadamente ainda os resultados com a chuva observada (OBS) e com os dados do modelo CFS v2 (CFS).

Assim como ocorreu para a bacia da UHE Camargos, na bacia da UHE Santa Clara o modelo Previvaz também propagou a tendência das vazões observadas na semana anterior para a primeira semana de previsão. Conforme as semanas do horizonte avançam ele apresenta um viés de superestimar as vazões.

Analisando as rodadas do modelo Smap, pode-se ver que, quando utilizado o modelo CFS v2, tanto a versão diária quanto a versão semanal superestimam os picos de chuva nas primeiras semanas previstas. Nas últimas semanas os menores picos são superestimados enquanto que os picos maiores são subestimados, fenômenos estes que ocorrem pouco com as rodadas que utilizam a chuva observada, indicando que o modelo CFS v2 apresenta grandes incertezas em seus dados de chuva prevista. Quando utilizada a chuva observada, ambas as versões do Smap apresentaram resultados aderentes às vazões observadas, indicando um bom ajuste por parte do Smap para essa bacia.

SANTA CLARA - 1ª SEMANA OPERATIVA

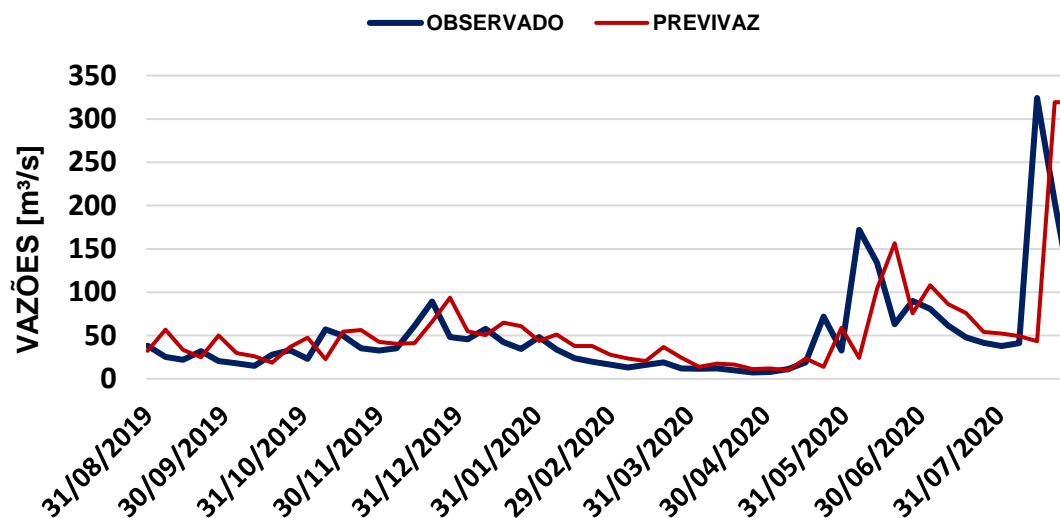


Figura 32 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previvaz para primeira semana operativa da bacia de Santa Clara.

SANTA CLARA - 1ª SEMANA OPERATIVA

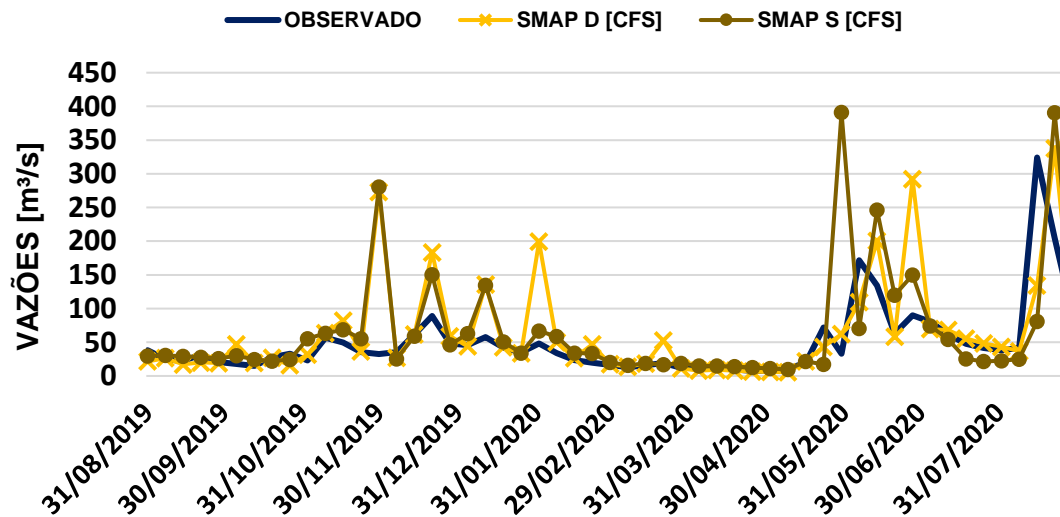


Figura 33 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para primeira semana operativa da bacia de Santa Clara.

SANTA CLARA - 1ª SEMANA OPERATIVA

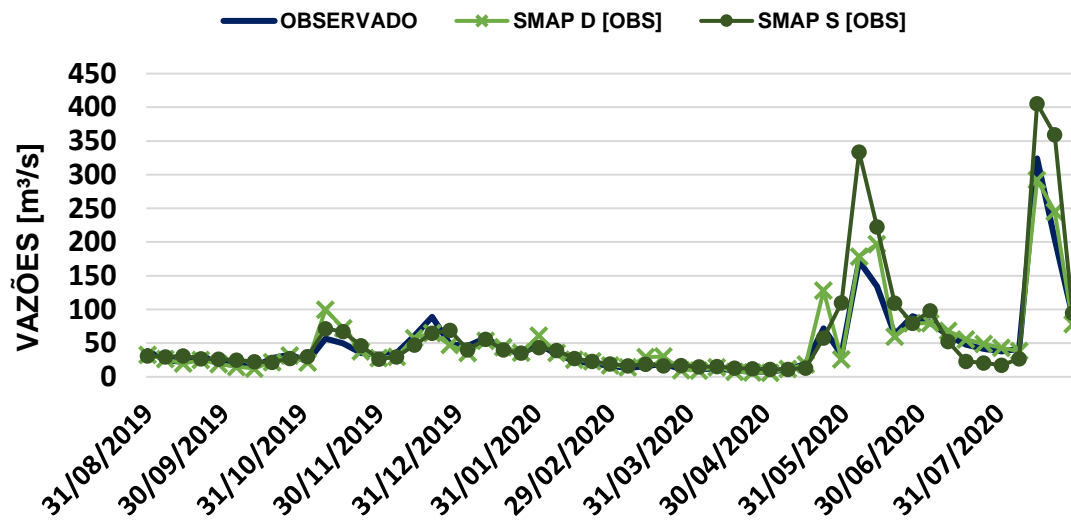


Figura 34 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para primeira semana operativa da bacia de Santa Clara.

SANTA CLARA - 2ª SEMANA OPERATIVA

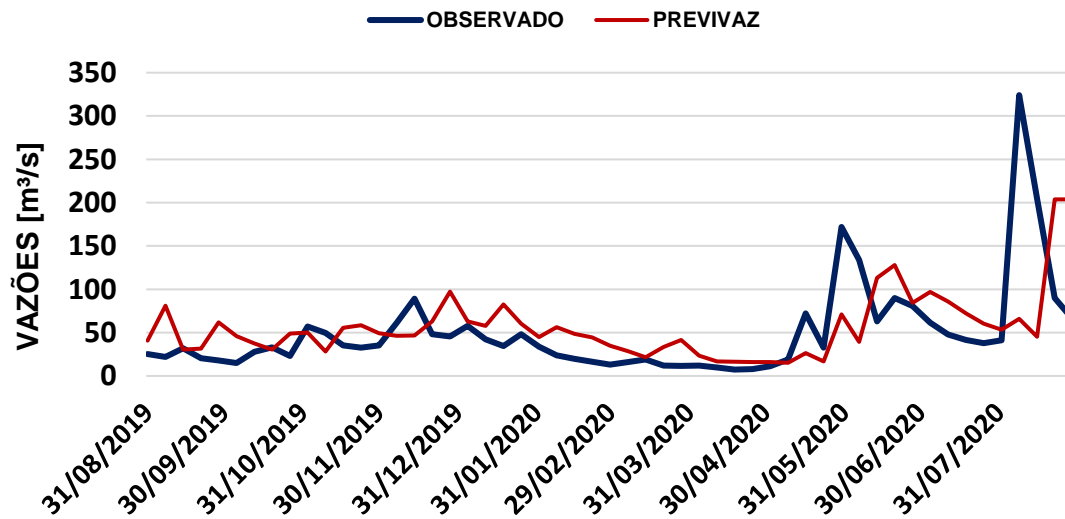


Figura 35 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previvaz para segunda semana operativa da bacia de Santa Clara.

SANTA CLARA - 2ª SEMANA OPERATIVA

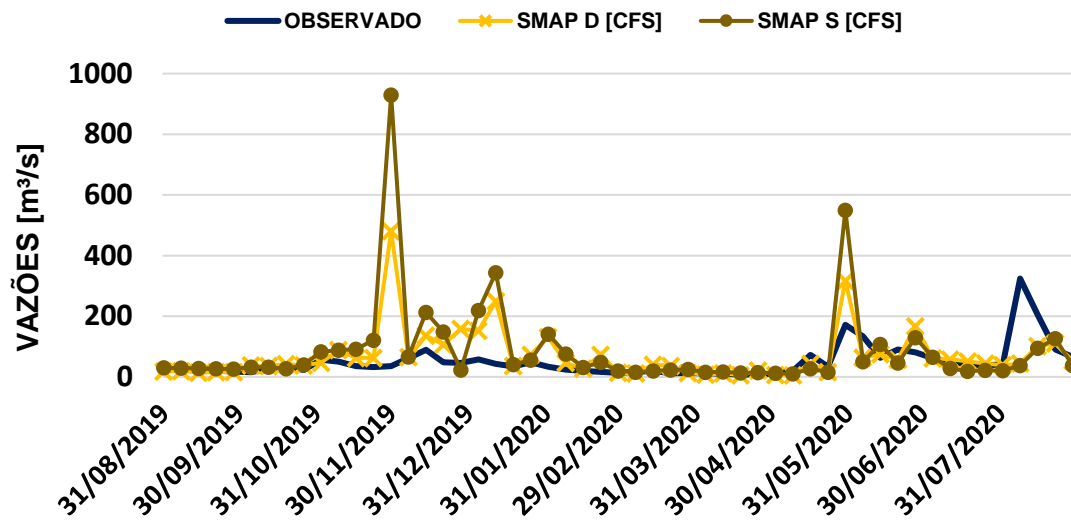


Figura 36 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para segunda semana operativa da bacia de Santa Clara.

SANTA CLARA - 2ª SEMANA OPERATIVA

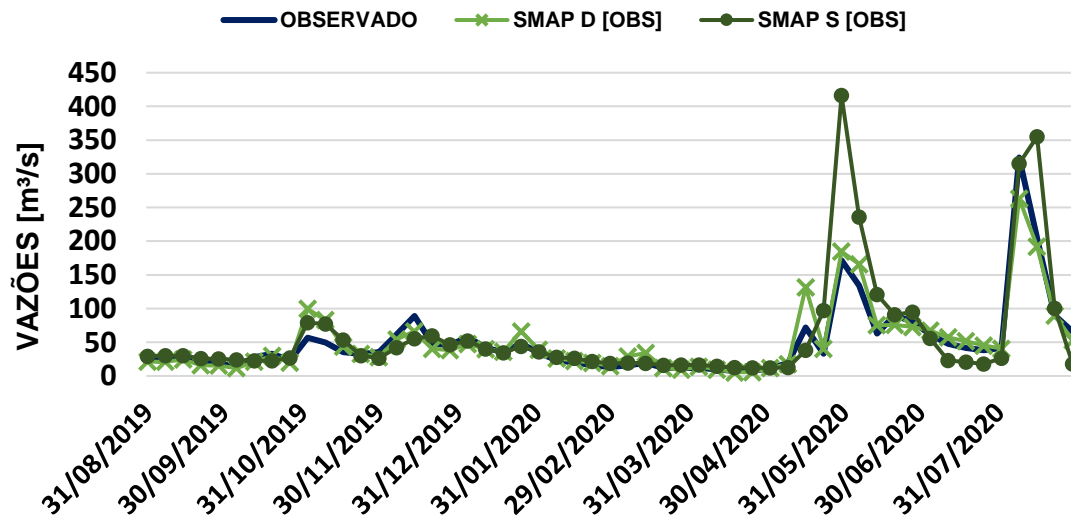


Figura 37 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para segunda semana operativa da bacia de Santa Clara.

SANTA CLARA - 3ª SEMANA OPERATIVA

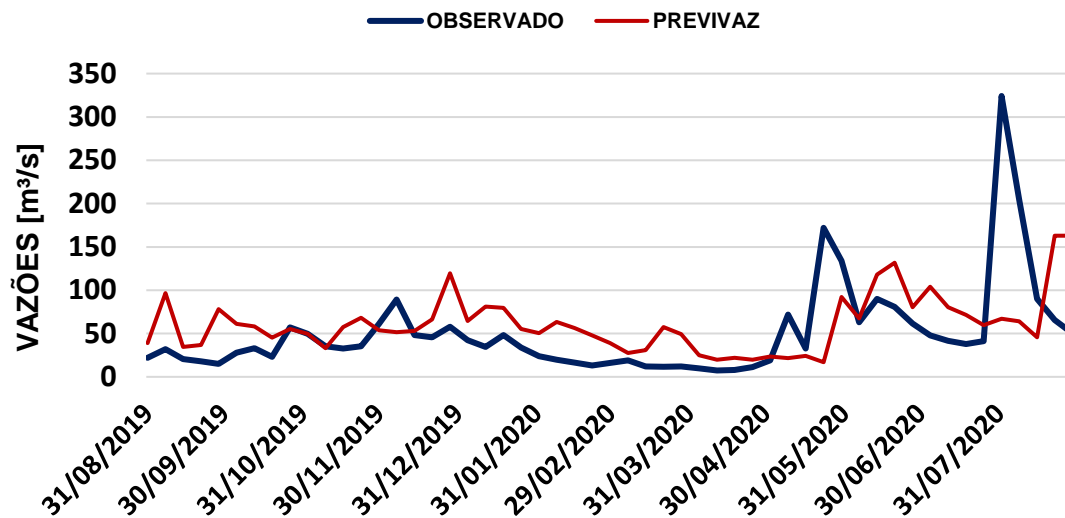


Figura 38 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previvaz para terceira semana operativa da bacia de Santa Clara.

SANTA CLARA - 3ª SEMANA OPERATIVA

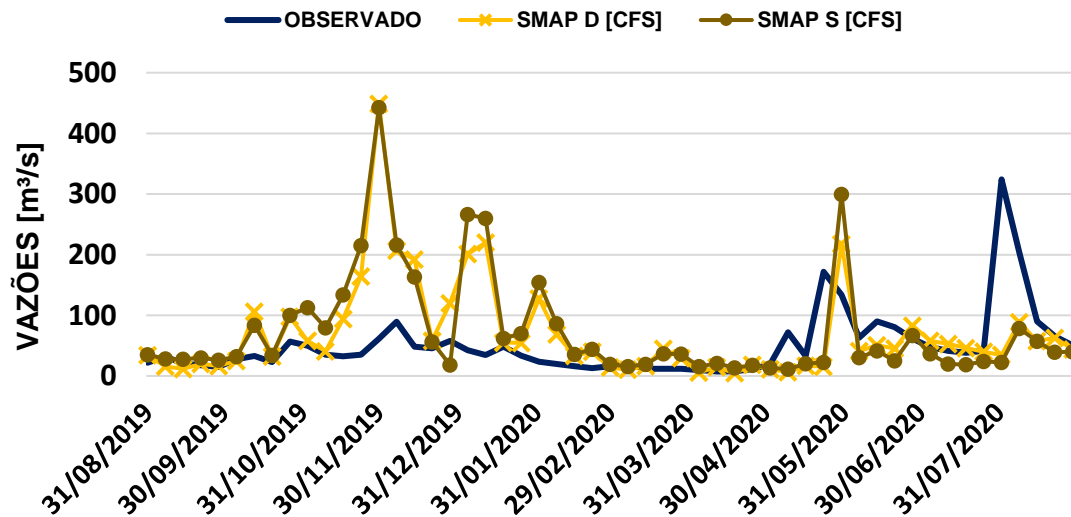


Figura 39 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para terceira semana operativa da bacia de Santa Clara.

SANTA CLARA - 3ª SEMANA OPERATIVA

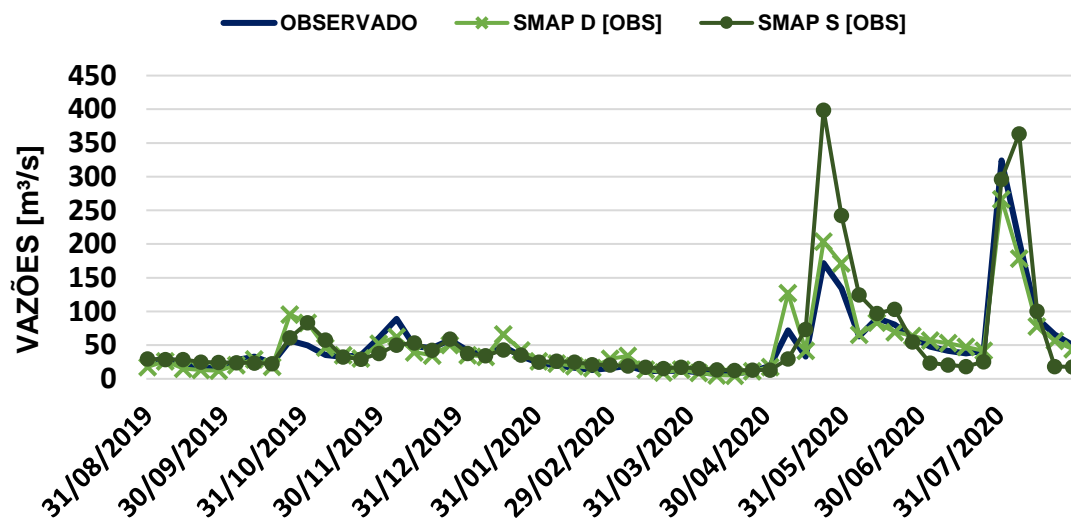


Figura 40 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para terceira semana operativa da bacia de Santa Clara.

SANTA CLARA - 4ª SEMANA OPERATIVA

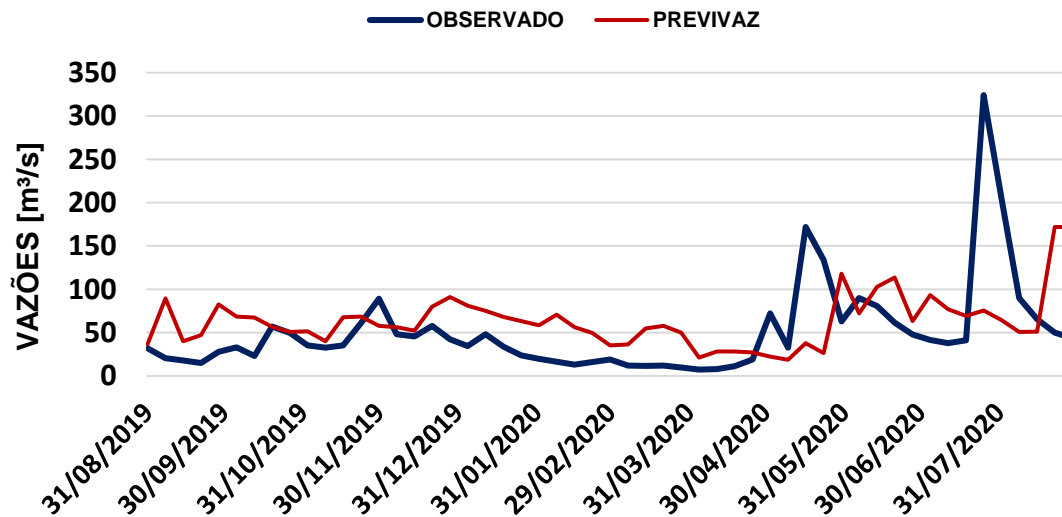


Figura 41 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previvaz para quarta semana operativa da bacia de Santa Clara.

SANTA CLARA - 4ª SEMANA OPERATIVA

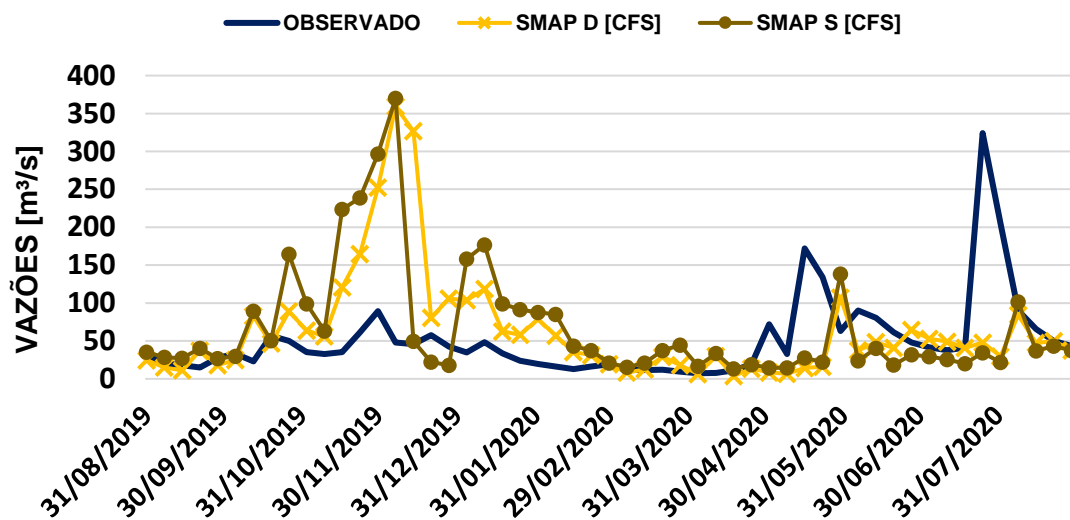


Figura 42 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para quarta semana operativa da bacia de Santa Clara.

SANTA CLARA - 4ª SEMANA OPERATIVA

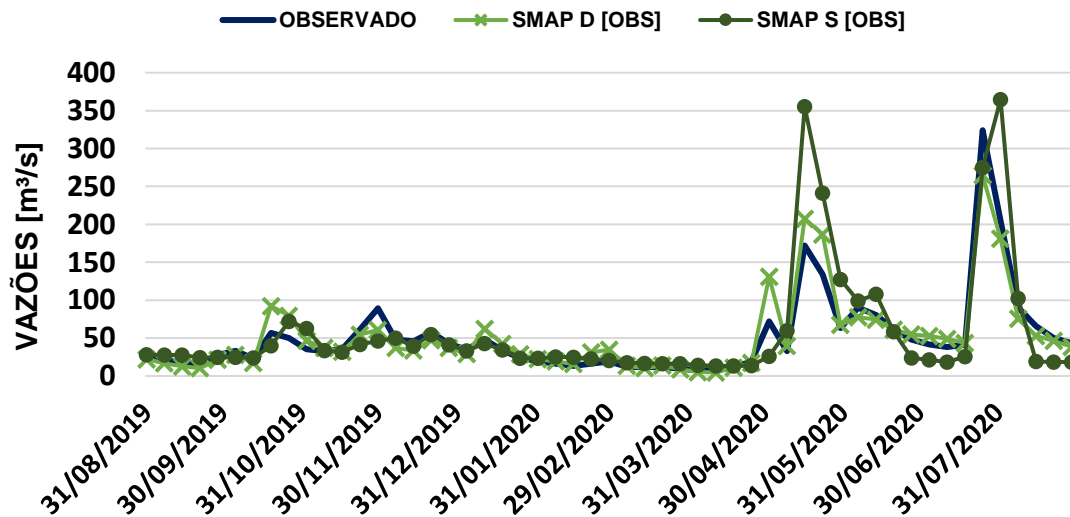


Figura 43 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para quarta semana operativa da bacia de Santa Clara.

SANTA CLARA - 5ª SEMANA OPERATIVA

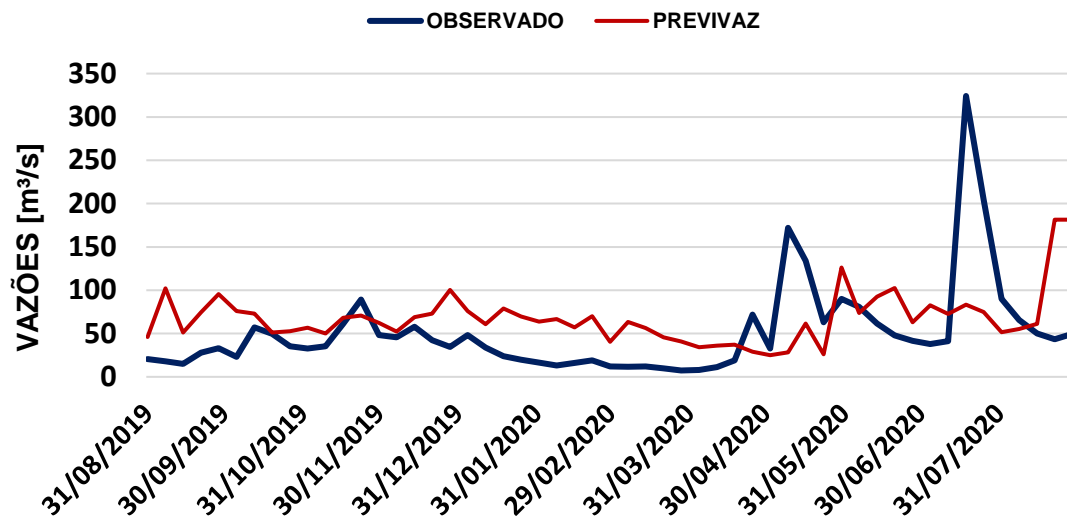


Figura 44 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previaz para quinta semana operativa da bacia de Santa Clara.

SANTA CLARA - 5ª SEMANA OPERATIVA

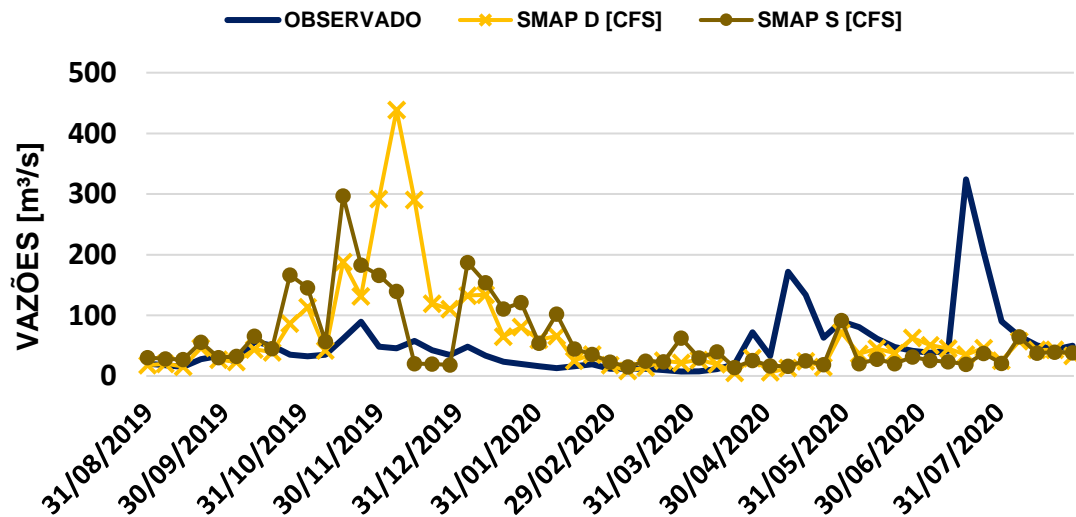


Figura 45 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para quinta semana operativa da bacia de Santa Clara.

SANTA CLARA - 5ª SEMANA OPERATIVA

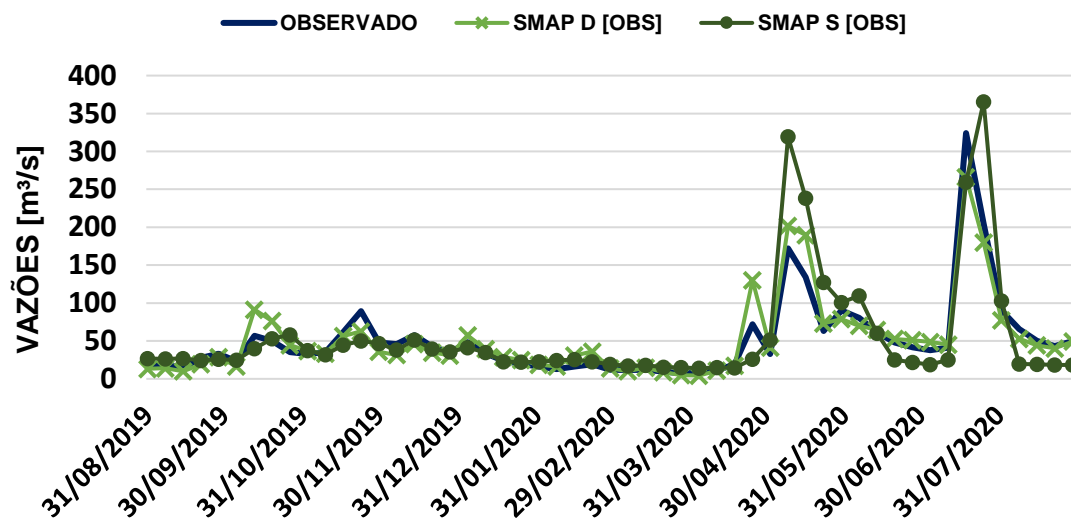


Figura 46 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para quinta semana operativa da bacia de Santa Clara.

SANTA CLARA - 6ª SEMANA OPERATIVA

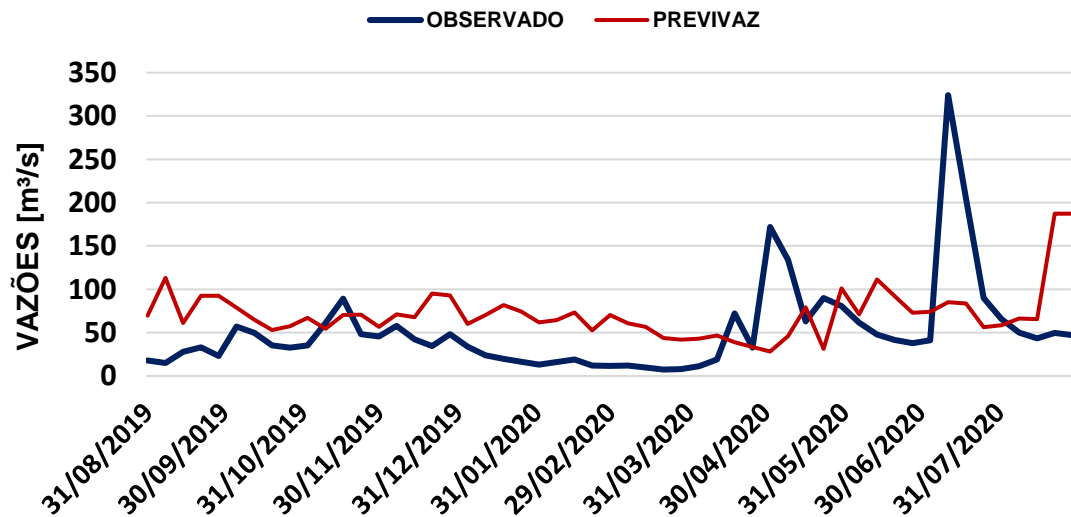


Figura 47 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo Previzaz para sexta semana operativa da bacia de Santa Clara.

SANTA CLARA - 6ª SEMANA OPERATIVA

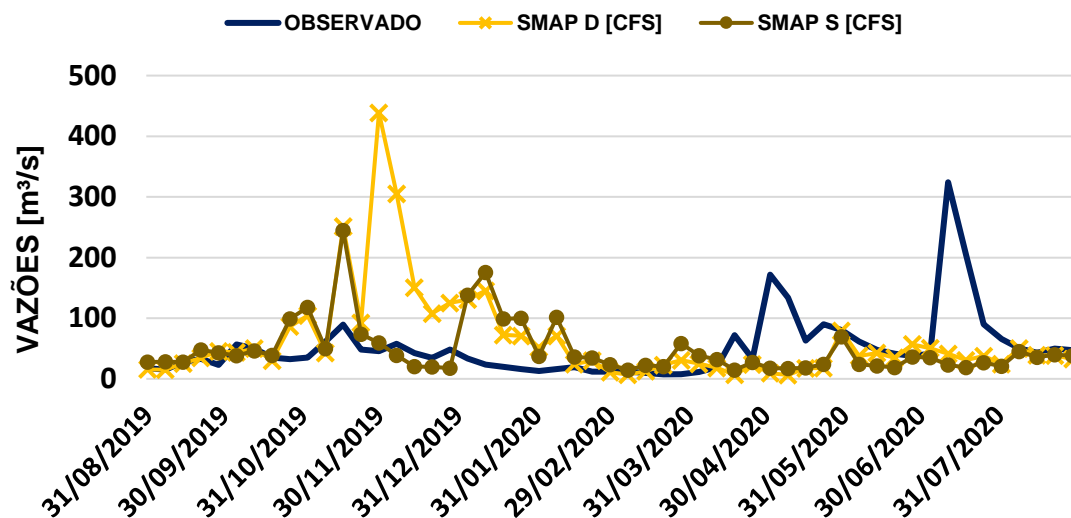


Figura 48 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva do CFS para sexta semana operativa da bacia de Santa Clara.

SANTA CLARA - 6ª SEMANA OPERATIVA

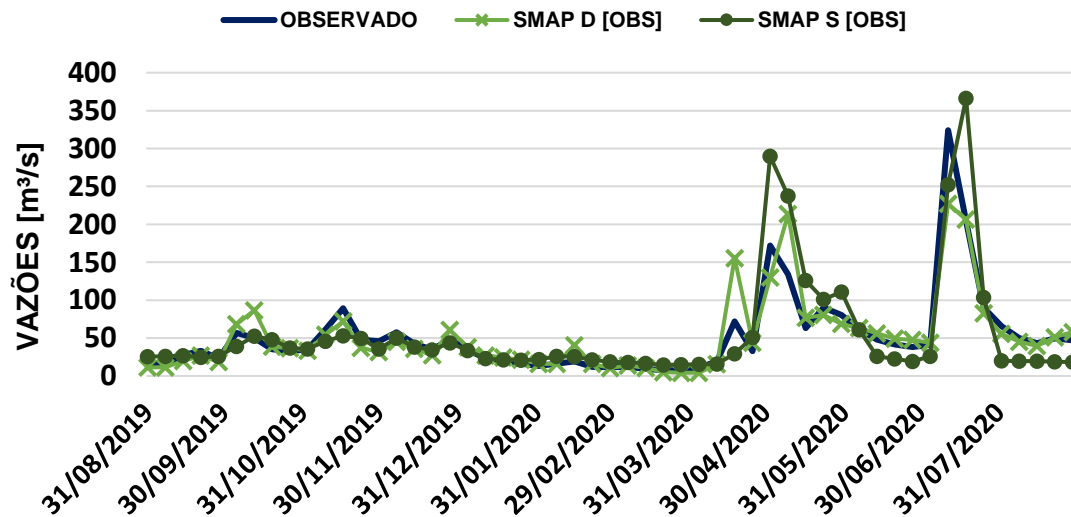


Figura 49 - Hidrograma de comparação entre vazões observadas e vazões previstas pelo SMAP Diário e SMAP Semanal utilizando a chuva observada para sexta semana operativa da bacia de Santa Clara.

5.4. Análise de erros.

As Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados da análise de erro dos modelos seguindo as métricas NASH e MAPE. Ao analisar essas métricas é importante ter em mente que para o NASH quanto mais próximo o coeficiente estiver de 1 melhor o resultado, enquanto que para o MAPE os melhores resultados são aqueles o mais próximo possível de zero.

Na Tabela 4 pode-se observar o coeficiente de NASH calculado para cada bacia em estudo e para cada horizonte de previsão. Já na Tabela 5, pode-se observar o coeficiente MAPE calculado também para cada bacia em estudo e para cada horizonte previsto.

Pode-se perceber que, de maneira geral, as rodadas utilizando o modelo meteorológico CFS v2 apresentaram performance bem inferiores aos cenários que utilizaram a chuva observada, indicando um elevado nível de incertezas nos dados de chuva prevista provenientes desse modelo.

O modelo Smap Semanal, quando utilizada a chuva observada para a previsão de vazões, apresentou performance melhor do que o modelo Previvaz em todos os cenários simulados, isso indica que a versão semanal do SMAP, proposta neste trabalho, apresenta potencial para substituir o modelo Previvaz na previsão de vazões do sistema elétrico. Quando utilizada a chuva prevista do CFS v2, o Smap Semanal apresentou performance inferior ao Previvaz na grande maioria dos cenários previstos, indicando também que o resultado dessa previsão é bastante dependente da qualidade dos dados de input de chuva prevista.

Ao analisar a tabela com os resultados do NASH e comparar as rodadas do SMAP diário e do SMAP semanal, ambos utilizando o CFS v2 como input de chuva prevista, nota-se que em ambas as bacias a versão semanal apresentou melhores resultados para a quinta e sexta semanas operativas. Pode-se entender esse resultado como um indicativo de que a versão semanal lida melhor com o acúmulo de incertezas oriundas dos dados de chuva prevista em um horizonte mais longo do que o modelo diário.

1ª SEMANA PREVISTA					
Bacia	Previvaz	Smap Diário [CFS]	Smap Semanal [CFS]	Smap Diário [OBS]	Smap Semanal [OBS]
Camargos	0,72	-0,31	0,61	0,89	0,82
Santa Clara	-0,25	-0,33	-1,15	0,91	0,50

2ª SEMANA PREVISTA					
Bacia	Previvaz	Smap Diário [CFS]	Smap Semanal [CFS]	Smap Diário [OBS]	Smap Semanal [OBS]
Camargos	0,54	0,00	-0,20	0,88	0,74
Santa Clara	-0,14	-1,68	-6,96	0,91	0,29

3ª SEMANA PREVISTA					
Bacia	Previvaz	Smap Diário [CFS]	Smap Semanal [CFS]	Smap Diário [OBS]	Smap Semanal [OBS]
Camargos	0,44	0,16	-0,54	0,85	0,68
Santa Clara	-0,18	-1,80	-2,42	0,90	0,31

4ª SEMANA PREVISTA					
Bacia	Previvaz	Smap Diário [CFS]	Smap Semanal [CFS]	Smap Diário [OBS]	Smap Semanal [OBS]
Camargos	0,46	0,16	-0,35	0,86	0,64
Santa Clara	-0,29	-1,67	-2,03	0,89	0,40

5ª SEMANA PREVISTA					
Bacia	Previvaz	Smap Diário [CFS]	Smap Semanal [CFS]	Smap Diário [OBS]	Smap Semanal [OBS]
Camargos	0,46	-0,08	-0,03	0,87	0,60
Santa Clara	-0,32	-2,24	-1,36	0,89	0,47

6ª SEMANA PREVISTA					
Bacia	Previvaz	Smap Diário [CFS]	Smap Semanal [CFS]	Smap Diário [OBS]	Smap Semanal [OBS]
Camargos	0,52	0,02	0,58	0,88	0,60
Santa Clara	-0,44	-2,18	-0,85	0,81	0,52

Tabela 4 - Tabelas com os resultados da análise de erros pelo método NASH.

1ª SEMANA PREVISTA					
Bacia	Previvaz	Smap Diário [CFS]	Smap Semanal [CFS]	Smap Diário [OBS]	Smap Semanal [OBS]
Camargos	16,34	39,90	24,86	10,63	13,91
Santa Clara	57,59	58,05	76,23	18,02	33,42

2ª SEMANA PREVISTA					
Bacia	Previvaz	Smap Diário [CFS]	Smap Semanal [CFS]	Smap Diário [OBS]	Smap Semanal [OBS]
Camargos	21,84	35,42	44,20	12,10	16,35
Santa Clara	84,21	97,72	136,60	20,78	37,10

3ª SEMANA PREVISTA					
Bacia	Previvaz	Smap Diário [CFS]	Smap Semanal [CFS]	Smap Diário [OBS]	Smap Semanal [OBS]
Camargos	26,06	32,25	51,89	13,23	18,63
Santa Clara	106,32	109,61	134,22	22,95	38,41

4ª SEMANA PREVISTA					
Bacia	Previvaz	Smap Diário [CFS]	Smap Semanal [CFS]	Smap Diário [OBS]	Smap Semanal [OBS]
Camargos	27,86	30,36	48,14	13,79	19,96
Santa Clara	127,92	108,62	138,86	23,93	39,26

5ª SEMANA PREVISTA					
Bacia	Previvaz	Smap Diário [CFS]	Smap Semanal [CFS]	Smap Diário [OBS]	Smap Semanal [OBS]
Camargos	29,00	30,33	44,83	14,27	20,80
Santa Clara	148,84	122,75	142,95	24,02	39,87

6ª SEMANA PREVISTA					
Bacia	Previvaz	Smap Diário [CFS]	Smap Semanal [CFS]	Smap Diário [OBS]	Smap Semanal [OBS]
Camargos	30,80	31,11	31,85	14,58	20,70
Santa Clara	167,42	125,04	122,40	24,70	39,51

Tabela 5 - Tabelas com os resultados da análise de erros pelo método MAPE.

6. CONCLUSÕES

A engenharia de recursos hídricos vem empregando amplamente os modelos de previsão de vazão para subsidiar a tomada de decisão em diversas áreas. Uma das aplicações mais importantes da previsão de vazões é sua utilização para o planejamento e programação da operação do sistema elétrico brasileiro pelo ONS, cujo objetivo é otimizar a utilização do recurso hidroenergético e garantir o suprimento energético no curto e longo prazo.

Nesse contexto, os modelos Previvaz e Smap Diário já vêm sendo empregados pelo ONS para a previsão de vazões médias semanais para até seis semanas operativas. Visando somar esforços para melhorar essa previsão, este trabalho propôs e analisou os resultados de uma versão semanal para o modelo Smap.

As previsões de vazão que utilizaram como input os dados de chuva prevista do modelo CFS v2 apresentaram grande tendência em superestimar os picos de chuva, indicando a inadequação desses dados para este tipo de previsão. No entanto, as rodadas de ambas as versões do Smap que utilizaram como input a chuva observada apresentaram boa aderência entre as vazões previstas e as vazões observadas.

A versão semanal do Smap teve performance melhor do que o Previvaz na maior parte dos cenários, indicando que pode ser um modelo empregado para o planejamento da operação. Além disso, ao se utilizar dados de chuva prevista, a versão semanal do Smap apresentou melhores resultados na quinta e sexta semana do horizonte de previsão, indicando que o modelo semanal pode ser utilizado para melhorar o resultado de horizontes mais longos de previsão.

Para trabalhos futuros sugere-se a calibração e aplicação da versão semanal do Smap em outras bacias brasileiras, com características hidrológicas distintas, principalmente nas regiões Norte e Nordeste, não abordadas neste trabalho. Além disso, sugere-se também o estudo de acoplamento entre as versões diária e semanal do Smap, ou seja, avaliar se a melhor performance de previsão seria obtida rodando ambos os modelos para todo o horizonte de previsão coletando nos resultados o período no qual cada versão apresenta melhor desempenho, ou se seria obtida rodando os modelos de maneira encadeada, iniciando com a versão diárias para previsão nas primeiras semanas e finalizando com a versão semanal para previsão nas últimas semanas do horizonte de previsão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA. **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios**. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/sar/sin>>. Acesso em: 12 Setembro 2020.
- BECKER, E. et al. The NCEP Climate Forecast System Version 2. **Journal of Climate**, v. 27, Março 2014.
- BUCHIANERI, V. C. **Geração da série histórica de vazão por meio do modelo smap: subsídio para o plano de manejo da bacia do Rio Grande de Ubatuba**. Dissertação de Mestrado, USP. Piracicaba. 2004.
- CAPONI, G. R.; SILVA, B. C.; SANTOS, A. H. M. **Calibração automática de um modelo chuva-vazão mensal por algoritmos genéticos**. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Maceió: [s.n.]. 2011.
- CATALDI, M.; NIELSEN, D. **Modelo Smap**. Universidade Federal Fluminense. 45 slides. [S.l.]. 2016.
- CAVALCANTE, N. B. R. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e aferição de garantia física de uma central geradora de energia no rio Santana-RJ**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2017.
- CELLA, L. C. et al. **Aplicação de um modelo simplificado para determinação das vazões naturais na cabaceira do rio Vacacaí**. XVIII Simpósio Brasileiros de Recursos Hídricos. Campo Grande: [s.n.]. 2009.
- CEPEL. **Programa de previsões de vazões semanais - Previvaz - Manual do Usuário**. [S.l.]. 2015.
- CEPEL. **Modelo DECOMP - Manual de referência**. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. [S.l.]. 2018.
- CEPEL. **Aplicação de limites nas previsões de afluências semanais no modelo Previvaz**. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. [S.l.]. NT 01/2009.
- DIAS, C. G. et al. Previsão climática sazonal para o Brasil obtida através de modelos climáticos globais e regional. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, n. 33, Abril 2018.
- GOOGLE EARTH PRO. Acesso em: 12 Setembro 2020.
- GUILHON, L. G. F.; ROCHA, V. F.; MOREIRA, J. C. Comparação de métodos de previsão de vazões naturais afluentes a aproveitamentos hidroelétricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, p. 13, julho 2007.
- HISTÓRICO da Operação: Geração de Energia. **Operador Nacional do Sistema Elétrico**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx>. Acesso em: 16 ago. 2020.
- HORTON, R. E. Analysis of runoff-plot experiments with varying infiltration capacity. **Transactions American Geophysical Union**, Washington, p. 693-711, 1939.

IBBIT, R. P. **Systematic parameter fitting for conceptual models of catchment hydrology**. Imperial College of Science and Technology, University of London. London. 1970.

KOBIYAMA, M.; PRETE, P. G. D. Calibração automática do modelo hidrológico IPH II aplicado a bacia Fragosos, Sul do Brasil. **Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, Guarapuava, v. 13, Janeiro 2017.

LOPES, J. E. G. Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. **Manual Smap**, 1999. Disponível em: <http://pha.poli.usp.br/default.aspx?id=76&link_uc=disciplina>. Acesso em: 23 nov. 2019.

MACEDO, E. P.; MARTINS, J. R. S. Avaliação da Previsão de Precipitação Utilizada na Determinação das Vazões Afluentes em Reservatórios como Ferramentas de um Sistema de Gestão de Emergências em Barragens. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, n. 1, Março 2014.

MARTINI, E. A. D. **Aplicação do modelo Smap para avaliação de impactos de mudanças climáticas: um estudo de caso para a bacia de Camargos (MG)**. UFRJ. Rio de Janeiro. 2015.

MATOS, T. S. et al. **Modelagem hidrológica com o IPH II: estudo de caso para uma sub-bacia hidrográfica do Rio Teles Pires**. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis: [s.n.]. 2017.

MCCARTHY, G. T. The unit hydrograph and flood routing. **Conference of North Atlantic Division, US Army Corps of Engineers**, New London, 1938.

ONS. **Aprimoramento da previsão de precipitação por conjunto e remoção de viés até a segunda semana operativa**. [S.l.]. NT 0075/2020.

ONS. **Aplicação do Modelo SMAP-ONS para previsões de vazões nos âmbito do SIN**. Operador Nacional do Sistema Elétrico. [S.l.]. NT 0097/2018.

ONS. **Previsão de vazões diárias ao reservatório de Três Marias usando a técnica de Redes Neurais**. Operador Nacional do Sistema Elétrico. [S.l.]. NT 051/2009.

ONS. **Aplicação do modelo Smap para previsão de vazões a curto prazo na bacia incremental de Itaipu**. Operador Nacional do Sistema Elétrico. [S.l.]. NT 129/2013.

ONS. **Metodologia para previsão de vazões uma semana a frente na bacia do Alto/Médio Rio Grande**. Operador Nacional do Sistema Elétrico. [S.l.]. NT 139/2008.

ONS. **Novo modelo de previsão de vazões com informação de precipitação para a bacia do Rio Iguaçu**. Operador Nacional do Sistema Elétrico. [S.l.]. NT 149/2007.

PULS, L. G. Flood Regulation of the Tennessee River. **House Document nº 185, 70th Congress, 1st Session, US Government Printing Office**, Washington, D. C., 1928.

QUEDI, E. S. **Previsão hidrológica em horizonte sub sazonal**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2019.

SANTOS, L. L. D. Modelos hidráulicos-hidrológicos: conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, PE, v. 2, n. 3, 2009.

SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M.; COLLISCHONN, W. Previsão de Vazão com Modelos Hidroclimáticos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, Setembro 2006.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2ª. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

TUCCI, C. E. M.; ORDONEZ, J. S.; SIMÕES, M. L. **Modelo Matemático Precipitação-Vazão IPH II**. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Fortaleza: [s.n.]. 1981.

TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4ª. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2015.