

# RELATÓRIO DE ATIVIDADES

## DEPARTAMENTO DE HIDROLOGIA



**Relatório Técnico do Sistema de Alerta Hidrológico da  
bacia do rio Muriaé - 2021**

---

**Serviço Geológico do Brasil - CPRM**

**Novembro 2021**



**SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM**  
**DIRETORIA DE HIDROLOGIA E GESTÃO TERRITORIAL – DHT**  
**DEPARTAMENTO DE HIDROLOGIA**

# **Relatório de Atividades**

## **Departamento de Hidrologia**

---

**ÁREA: RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS**  
**SUBÁREA: PREVISÃO E ALERTA DE ENCHENTES E INUNDAÇÕES**

(Relatório de Atividades N° 1 – Ano 2021)

---

### **REALIZAÇÃO**

Divisão de Hidrologia Aplicada

### **AUTORES**

Marcos Figueiredo Salviano  
Artur José Soares Matos

**São Paulo, 2021**

## **MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA**

### **Ministro de Estado**

Bento Albuquerque

### **Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral**

Alexandre Vidigal de Oliveira

## **SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM**

### **DIRETORIA EXECUTIVA**

#### **Diretor-Presidente**

Esteves Pedro Colnago

#### **Diretora de Hidrologia e Gestão Territorial**

Alice Silva de Castilho

#### **Diretor de Geologia e Recursos Minerais**

Marcio José Remédio

#### **Diretor de Infraestrutura Geocientífica**

Paulo Afonso Romano

#### **Diretor de Administração e Finanças**

Cassiano de Souza Alves

## **COORDENAÇÃO TÉCNICA**

### **Chefe do Departamento de Hidrologia**

Frederico Claudio Peixinho

### **Chefe da Divisão de Hidrologia Aplicada**

Adriana Dantas Medeiros

## **EQUIPE DE DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO**

Artur José Soares Matos

Caluan Rodrigues Capozzoli

Érico Chaves Fontes Lima

Marcos Figueiredo Salviano

Ricardo Gabriel Bandeira de Almeida

Vanesca Sartorelli Medeiros

# PROJETO SISTEMA DE ALERTA HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO MURIAÉ (SAH-MURIAÉ)

(Relatório de Atividades N° 1 – Ano 2021)

## REALIZAÇÃO

Divisão de Hidrologia Aplicada

## AUTORES

Marcos Figueiredo Salviano

Artur José Soares Matos

**FOTOS DA CAPA:** Foto do rio Carangola em Porciúncula/RJ. Foto tirada em campanha de medição de descarga líquida realizada por Aline Garcia, Rosângela Castro e Rodrigo Ernandes (Setembro/2021).

### Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

SALVIANO, Marcos Figueiredo

S184a

Relatório Técnico do Sistema de Alerta Hidrológico da bacia do rio Muriaé - 2021/ Marcos Figueiredo Salviano, Artur José Soares Matos. – São Paulo : CPRM, 2021.

1 E-book : PDF – (Projeto Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do Rio Muriaé (SAH-MURIAÉ). Área: recursos hídricos superficiais. Subárea: previsão e alerta de enchentes e inundações. Relatório de atividades, 1)

1. Hidrologia – Metodologia. 2. Hidrometria. I. Matos, Artur José Soares. II. Título. III. Série.

CDD 551.48072

Direitos desta edição: Serviço Geológico do Brasil – CPRM  
Permitida a reprodução desta publicação desde que mencionada a fonte

Serviço Geológico do Brasil - CPRM  
[www.cprm.gov.br](http://www.cprm.gov.br)  
[seus@cprm.gov.br](mailto:seus@cprm.gov.br)

## APRESENTAÇÃO

---

As enchentes são fenômenos que ocorrem quando o volume da água que atinge simultaneamente o leito de um curso d'água é superior à capacidade de transporte de sua calha normal, também chamada de leito menor ou calha principal. Quando essa capacidade de escoamento é superada acontece a inundação das áreas ribeirinhas também denominadas como planícies de inundação ou leito maior do rio.

As causas das inundações podem ser principalmente atmosféricas ou geotécnicas. Exemplos de causas atmosféricas são as chuvas intensas em pequenas bacias, precipitações frontais em grandes bacias, ciclones tropicais, furacões e tufões. Fatores geotécnicos podem ser deslizamentos, corrida de detritos, terremotos, rompimento de barragens etc.

As inundações geradas no espaço urbano, também chamada de cheias urbanas, se devem a dois processos que podem ocorrer simultaneamente ou isoladamente. Esses processos são agrupados como inundações ribeirinhas e inundações devido a urbanização.

Uma das formas recomendadas pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para gerenciar ou reduzir o impacto causado pelas inundações é a implantação de sistemas de alerta e previsão de cheias. Esta é considerada uma medida não estrutural que pode ser utilizada em conjunto com outras medidas, tais como, o planejamento do uso do solo, o uso de seguro para não incentivar a ocupação de áreas sujeitas à inundação.

Assim, os sistemas de previsão e alerta de cheias propiciam um caminho bem estabelecido para colaborar na redução do risco de perda de vidas e, dotam as comunidades e os serviços de emergência de tempo para se prepararem para a inundação e proteger os bens materiais.

Neste contexto, o Serviço Geológico do Brasil – CPRM opera desde 2014 o Sistema de Alerta Hidrológico da bacia do rio Muriaé.

## RESUMO

---

Este relatório tem como objetivo principal apresentar uma análise dos resultados das equações de previsões hidrológicas de estações do Sistema de Alerta Hidrológico da bacia Hidrográfica do rio Muriaé (SAH-Muriaé). A calibração dos modelos é realizada a partir de dados hidrológicos obtidos por meio de estações telemétricas. Os resultados da calibração indicam um bom desempenho das equações de previsão ( $KGE > 0.9$ ). Para o ano de 2022, além da operação dos sistemas de alerta, planeja-se a elaboração da mancha de inundação de ao menos um município.



## **ABSTRACT**

---

The main objective of this report is to present an analysis of the results of the hydrological forecast equations for stations of the Hydrological Alert System of the Muriaé River Basin (SAH-Muriaé). The calibration of the models is performed using hydrological data obtained through telemetric stations. The calibration results indicate a good performance of the prediction equations ( $KGE > 0.9$ ). For the year 2022, in addition to the operation of warning systems, it is planned to elaborate a flood map for at least one municipality.

## SUMÁRIO

---

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. MODELOS DE PREVISÃO UTILIZADOS E ANÁLISE DO MODELO.....</b>	<b>11</b>
2.1 Análise dos modelos.....	12
<b>3. MELHORIAS E ESTUDOS REALIZADOS .....</b>	<b>17</b>
<b>4. CRONOGRAMA DE ATIVIDADES ATUALIZADO.....</b>	<b>18</b>
<b>5. METAS E MELHORIAS A MÉDIO E LONGO PRAZO.....</b>	<b>18</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>19</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>19</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Este relatório tem como objetivo principal apresentar uma análise dos resultados das equações de previsões hidrológicas de estações do Sistema de Alerta Hidrológico da bacia Hidrográfica do rio Muriaé (SAH-Muriaé). Estas equações possibilitarão a geração de previsões de cotas futuras para dois municípios: Itaperuna (58940000) e Cardoso Moreira (58960000).

## 2. MODELOS DE PREVISÃO UTILIZADOS E ANÁLISE DO MODELO

Nesta seção estão descritos a metodologia e análise do desempenho dos modelos de previsão de cotas futuras para três municípios na bacia do rio Muriaé (Porciúncula, Itaperuna e Cardoso Moreira). Destaca-se que as previsões para Porciúncula não serão disponibilizadas para os usuários, e tem o objetivo de apoiar a operação (e.g. antecipação de um evento severo, suprir possíveis falhas na estação telemétrica).

Para a calibração das equações foram selecionados dados dos anos hidrológicos 2019/2020 e 2020/2021. Estes períodos foram selecionados devido à quantidade e severidade dos eventos ocorridos. Os dados utilizados foram os disponibilizados na plataforma Hidro – Telemetria, operado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Nesta plataforma, os dados das estações do SAH-Muriaé foram submetidos a uma análise preliminar para correção de dados espúrios e falta de acurácia dos sensores de medição de nível. Para preenchimento de falhas foram utilizados preferencialmente os dados do observador e, caso necessário, uma interpolação linear.

Para a escolha dos eventos para a calibração, a cota de atenção foi utilizada como referência para classificar um determinado evento como uma cheia. Também evitou-se eventos com muitas falhas em alguma das estações.

Utilizou-se uma equação linear, preferencialmente com dados de vazão (caso contrário, dados de cota), em que as variáveis explicativas são os dados da estação de montante e a vazão da própria estação. Sempre que possível, foram calibradas duas equações para cada estação (com diferentes variáveis de

entrada), para assim reduzir a possibilidade das previsões não serem geradas devido à falta de um dado. As equações são expressas como:

$$Y'(t + \tau) = \alpha + \beta X(t) + \gamma[Y(t) - Y(t - 1)] \quad (1)$$

em que:

$t$ : é o instante da aplicação da equação;

$(t - 1)$ : é o instante uma hora anterior ao momento previsão. Utilizado para que o modelo diferencie um hidrograma se ascensão em relação a uma recessão;

$\tau$ : é o tempo de antecipação da onda de cheia. Equivale ao tempo de deslocamento entre a estação de montante e a estação com previsão;

$Y'$ : é a vazão calculada da estação com previsão. Variável de saída;

$Y$ : é a vazão observada na estação com previsão. Variável de entrada;

$X$ : é a vazão observada na estação de montante. Variável de entrada;

$\alpha, \beta, \gamma$ : são parâmetros empíricos a serem calibrados.

Para a calibração dos parâmetros foi utilizada a metodologia *Shuffled Complex Evolution* desenvolvida na *University of Arizona* (SCE-UA) (Duan et al., 1992). A metodologia foi aplicada por meio da biblioteca *rtop* no software *R*.

Para avaliação do desempenho dos modelos utilizou-se o índice Eficiência de Kling-Gupta (KGE) (Gupta et al., 2009). Em estudos recentes este índice apresentou uma melhor capacidade de avaliar a variância do dado simulado em relação à correlação e ao índice de Nash-Sutcliffe (NSE) (Knoben, Freer & Woods, 2019). Assim como o NSE, o KGE varia de  $-\infty$  a 1 (valor ótimo).

## 2.1 Análise dos modelos

Nesta seção estão apresentados os resultados das calibrações das equações de previsão das estações do SAH-Muriaé.

Na Tabela 1 está apresentada uma síntese dos resultados do modelo linear enquanto que a Figura 1 apresenta uma comparação entre os dados

observados e os simulados para Porciúncula. Ressalta-se que os resultados deste modelo serão apenas utilizados pelos operadores (i.e. pesquisadores da CPRM) para auxílio na operação do projeto.

Tabela 1 – Avaliação do modelo de previsão para Porciúncula.

Estação a montante	Carangola (58930000)
Tempo de deslocamento	11 horas
Correlação (montante, jusante)	0.916
Erro médio do modelo (MAE)	$\pm 24 \text{ m}^3/\text{s}$
Viés percentual do modelo (PBIAS)	0.0%
KGE do modelo	0.902

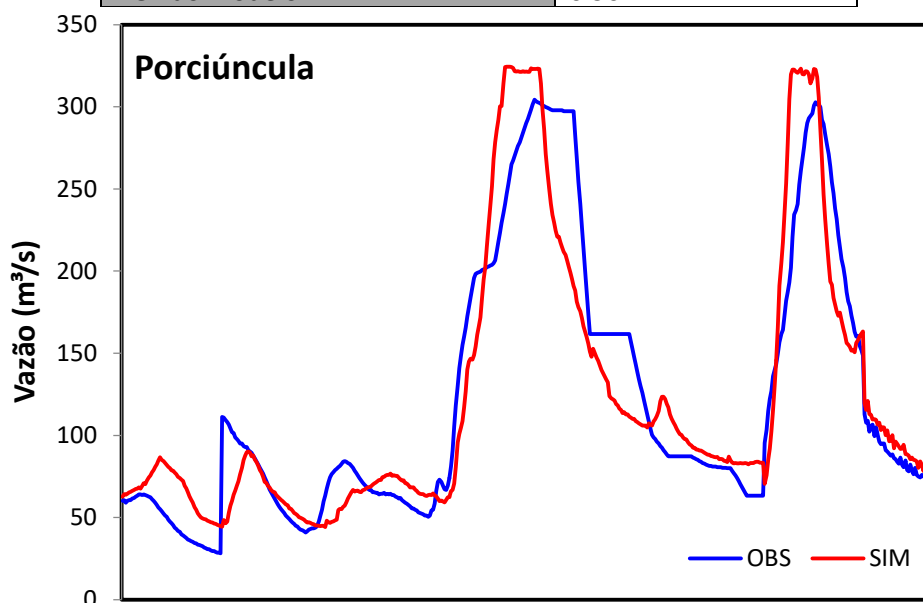


Figura 1 – Hidrograma da estação de Porciúncula no rio Carangola com os dados observados (azul) e simulados (vermelho). Série temporal no eixo x não é contínua.

Abaixo estão apresentados os resultados das equações para Itaperuna, em que foram gerados dois modelos: Modelo 1 (Tabela 2 e Figura 2) e Modelo 2 (Tabela 3 e Figura 3). O Modelo 1 resultou em um melhor resultado e será o preferencial.

Itaperuna (Modelo 1):

Tabela 2 – Avaliação do modelo de previsão para Itaperuna (Modelo 1).

Estação a montante 1	Patrocínio do Muriaé (58920000)
Estação a montante 2	Porciúncula (58934000)
Tempo de deslocamento	12 horas
Correlação (montante 1, jusante)	0.936
Correlação (montante 2, jusante)	0.920
Erro médio do modelo (MAE)	$\pm 32 \text{ m}^3/\text{s}$
Viés percentual do modelo (PBIAS)	0.0%
KGE do modelo	0.973

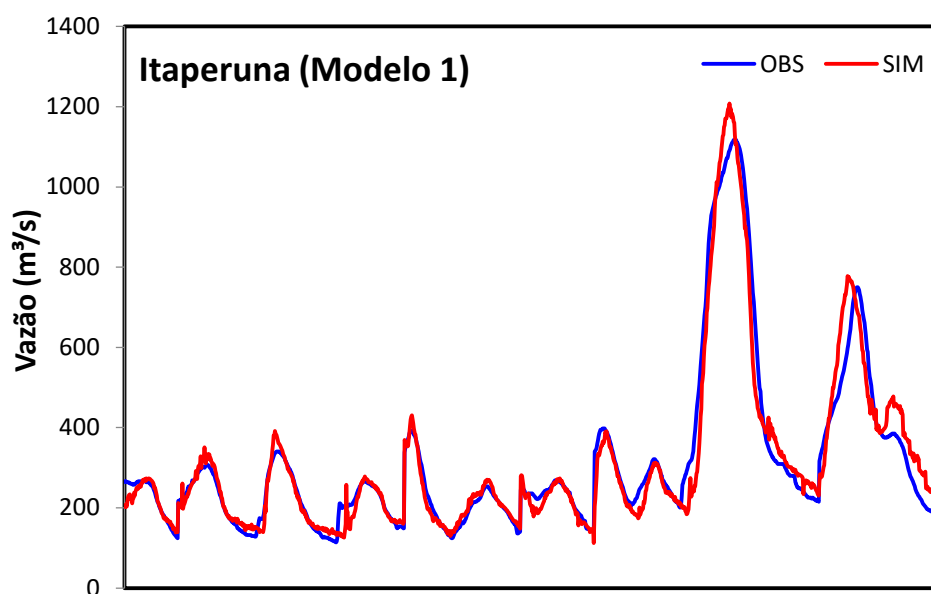


Figura 2 – Hidrograma da estação de Itaperuna no rio Muriaé com os dados observados (azul) e simulados (vermelho). Resultados do Modelo 1. Série temporal no eixo x não é contínua.

Itaperuna (Modelo 2):

Tabela 3 – Avaliação do modelo de previsão para Itaperuna (Modelo 2).

Estação a montante 1	Patrocínio do Muriaé (58920000)
Estação a montante 2	Carangola (58930000)
Tempo de deslocamento	12 horas
Correlação (montante 1, jusante)	0.935
Correlação (montante 2, jusante)	0.747
Erro médio do modelo (MAE)	$\pm 35 \text{ m}^3/\text{s}$
Viés percentual do modelo (PBIAS)	0.0%
KGE do modelo	0.954

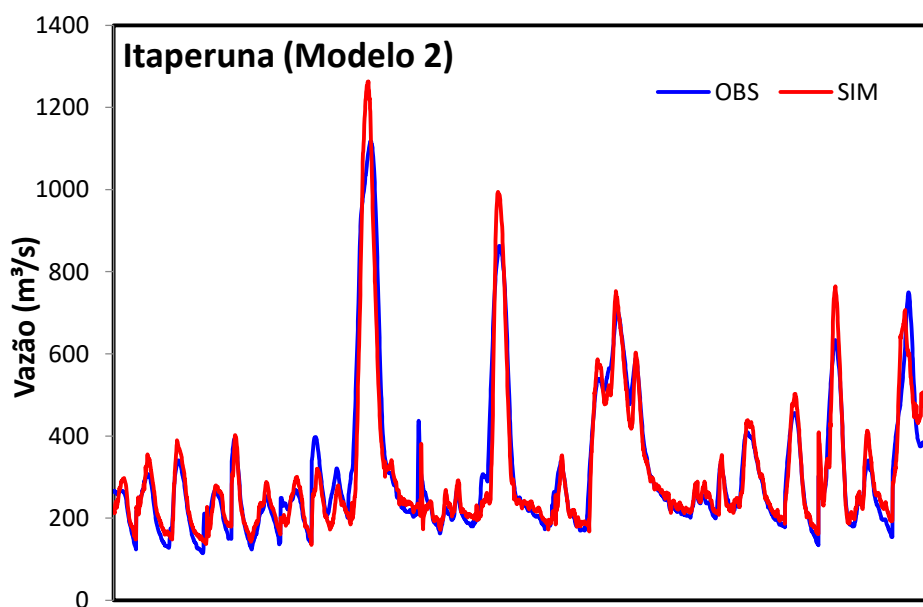


Figura 3 – Hidrograma da estação de Itaperuna no rio Muriaé com os dados observados (azul) e simulados (vermelho). Resultados do Modelo 2. Série temporal no eixo x não é contínua.

Abaixo estão apresentados os resultados das equações para Cardoso Moreira, em que foram gerados dois modelos: Modelo 1 (Tabela 4 e Figura 4) e Modelo 2 (Tabela 5 e Figura 5). O Modelo 1 resultou em um melhor resultado e será o preferencial.

**Cardoso Moreira (Modelo 1):**
**Tabela 4 – Avaliação do modelo de previsão para Cardoso Moreira (Modelo 2).**

Estação a montante	Itaperuna (58940000)
Tempo de deslocamento	15 horas
Correlação (montante, jusante)	0.962
Erro médio do modelo (MAE)	$\pm 28 \text{ m}^3/\text{s}$
Viés percentual do modelo (PBIAS)	0.0%
KGE do modelo	0.965

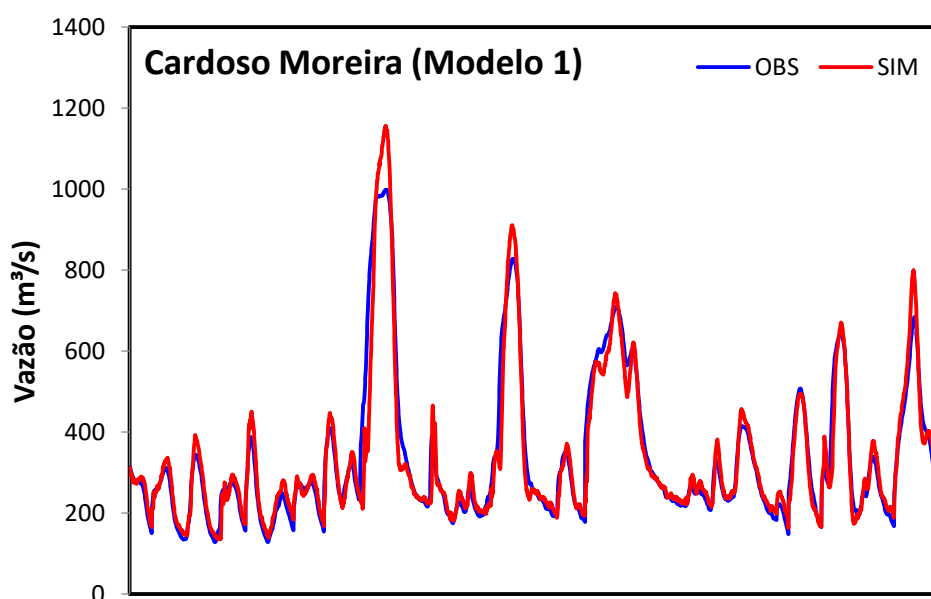


Figura 4 – Hidrograma da estação de Cardoso Moreira no rio Muriaé com os dados observados (azul) e simulados (vermelho). Resultados do Modelo 1. Série temporal no eixo x não é contínua.

**Cardoso Moreira (Modelo 2):**
**Tabela 5 – Avaliação do modelo de previsão para Cardoso Moreira (Modelo 2).**

Estação a montante 1	Patrocínio do Muriaé (58920000)
Estação a montante 2	Porciúncula (58934000)
Tempo de deslocamento	27 horas
Correlação (montante 1, jusante)	0.841
Correlação (montante 2, jusante)	0.872
Erro médio do modelo (MAE)	$\pm 56 \text{ m}^3/\text{s}$
Viés percentual do modelo (PBIAS)	0.0%
KGE do modelo	0.913



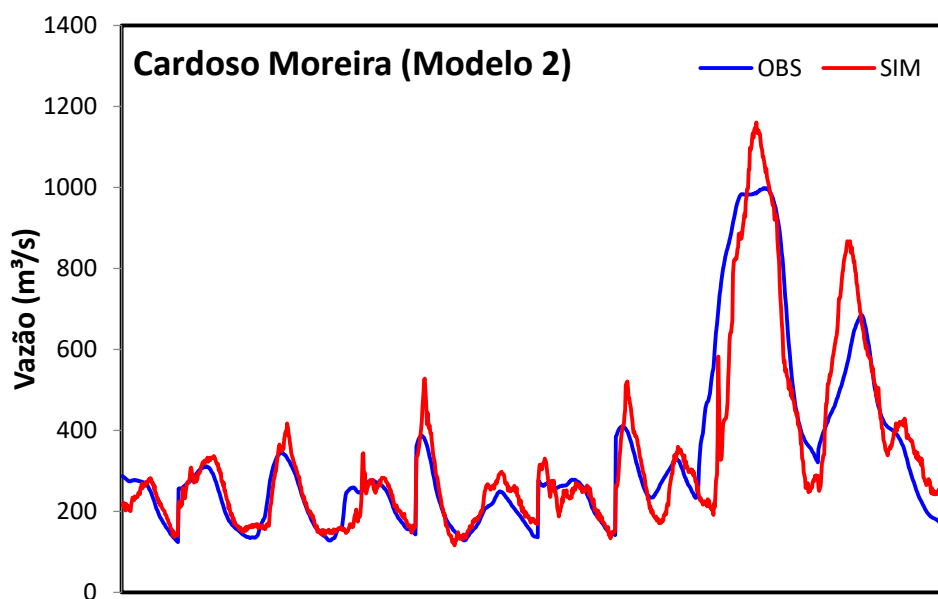


Figura 5 – Hidrograma da estação de Cardoso Moreira no rio Muriaé com os dados observados (azul) e simulados (vermelho). Resultados do Modelo 2. Série temporal no eixo x não é contínua.

### 3. MELHORIAS E ESTUDOS REALIZADOS

Para o ano de 2022 pretende-se a realização de campanhas de campo para o levantamento dos dados para a geração do mapa da mancha de inundação da área urbana do município de Itaperuna/RJ. As etapas de campo serão divididas em duas etapas. A primeira é para a geração de um Modelo Digital de Elevação (MDE) com alta resolução horizontal (~ 5 cm) e precisão (~ 10 cm) para a área urbana do município de Itaperuna/RJ. Esta atividade será desempenhada pelo DICART com o apoio do GEHITE/SP. A segunda atividade é o levantamento georeferenciado da batimetria do rio Muriaé na área urbana. Esta atividade deverá ser executada pelo GEHITE/SP.

O MDE de alta resolução, somada à batimetria do canal do rio, possibilitará a geração de um mapa da mancha de inundação para o município. Este produto tem como principal objetivo responder a seguinte questão: qual será a área inundada para cada cota.

Assim que finalizados, estes dados serão aplicados ao modelo hidrodinâmico no software HEC-RAS®.

#### 4. CRONOGRAMA DE ATIVIDADES ATUALIZADO

Na Tabela 6 está apresentado o cronograma de atividades do projeto SAH-Muriaé para o primeiro semestre de 2022.

Tabela 6 – Cronograma das atividades do projeto SAH-Muriaé para o primeiro semestre de 2022.

Atividade	11/21	12/21	01/22	02/22	03/22	04/22	05/22	06/22
Operação dos SAH's								
Relatório Anual								
Levantamento topográfico de Itaperuna								
Medições de cheia								
Atualização das Curvas-chaves								
Revisão dos modelos hidrológicos								

#### 5. METAS E MELHORIAS A MÉDIO E LONGO PRAZO

Para os próximos dois anos planeja-se a melhoria da operação dos projetos em dois aspectos principais:

- Elaboração de mapas de mancha de inundação para os municípios das bacias com estações operadas pela CPRM que estejam na área urbana (mesmo para aqueles que não tem previsão). As manchas de inundação fornecem uma informação para as Defesas Civas: qual será a área atingida para cada nível do rio. Esta informação permite um melhor planejamento e maior eficácia nas ações de mitigação do impacto das inundações. Este produto também permite um melhor zoneamento das áreas urbanas do município.
- Elaboração de modelos hidrológicos mais robustos que tenham uma menor incerteza e antecedência. Estes modelos podem ser implementados por meio de linguagens como *R* e *Python* que possibilitam a calibração por meio de redes neurais.

## 6. CONCLUSÕES

As equações calibradas apresentaram um bom desempenho ( $KGE > 0.9$ ) e para todos os municípios foi possível elaborar duas equações, o que reduz a possibilidade de uma previsão não ser realizada. Com o retorno gradual das atividades de campo, as estações telemétricas estão mais preparadas para manter o funcionamento em momentos de chuva intensa. Caso necessário, a instalação de *displays* nas estações facilita e agiliza a obtenção do dado do observador. Para a melhoria contínua dos projetos é essencial o início da elaboração das manchas de inundação e da geração de modelos de previsão mais robustos.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DUAN, Q., SOROOSHIAN, S., & GUPTA, V.K. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water resources research*, 28(4), 1015-1031.

GUPTA, H. V., KLING, H., YILMAZ, K. K., & MARTINEZ, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1-2), 80-91. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.003. ISSN 0022-1694

KNOBEN, W. J., FREER, J. E., & WOODS, R. A. (2019). Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4323-4331