

RELATÓRIO DE ATIVIDADES

DEPARTAMENTO DE HIDROLOGIA



SISTEMA DE ALERTA HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO DAS VELHAS

Relatório de Operação do Sistema no período de novembro de
2020 a março de 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

**SISTEMA DE ALERTA HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO DAS
VELHAS**

**Relatório de Operação do Sistema no período de novembro
de 2020 a março de 2021**

REALIZAÇÃO

Departamento de Hidrologia e Gestão Territorial

AUTORES

Maria Letícia Rabelo Alves Patrus

Artur José Soares Matos



Belo Horizonte, 2021

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

Ministro de Estado

Bento Albuquerque

Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

Pedro Paulo Dias Mesquita

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 TÉCNICA

Alessandro José da Silva

Artur José Soares Matos – D.Sc.

Breno Guerreiro da Motta - M.Sc.

Claudinei Geraldo Vieira

Elizabeth Guelman Davis

Emília Yumi Kawaguchi

Fernando Silva Rego - M.Sc.

José Alexandre Pinto Coelho - M.Sc.

Maria Letícia Rabelo Alves Patrus

Rodney Geraldo do Nascimento

PLANTONISTAS

Bárbara de Oliveira Lobo Cordeiro

Jackson Tiago Ribeiro

José Geraldo Alves Franco

Juliani Costa Marinho

Luiza Clemente Cardoso

Pablo de Almeida Gonçalves

Wallace Belizario de Freitas

Wanda Xavier Franca

Wesley Natan da Rocha

ESTÁGIARIOS

Larissa Brant Pimenta de Faria

Paula Rossana Dório Anastácio

Este relatório está em consonância com o Programa de Mineração e Desenvolvimento que traça o Plano de Metas e Ações 2020/2023 da Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral do Ministério de Minas e Energia, especificamente no Plano 3.3 – Ampliar o Conhecimento Geológico e dentro das Metas I – Ampliar o conhecimento dos riscos geológicos para a prevenção de desastres naturais e J – Ampliar e aperfeiçoar os sistemas de alertas de cheias

Este relatório está em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU)¹.

A Agenda 2030 e os ODS afirmam que para pôr o mundo em um caminho sustentável é urgentemente necessário tomar medidas ousadas e transformadoras. Os ODS constituem uma ambiciosa lista de tarefas para todas as pessoas, em todas as partes, a serem cumpridas até 2030. Se cumprirmos suas metas, seremos a primeira geração a erradicar a pobreza extrema e iremos poupar as gerações futuras dos piores efeitos adversos da mudança do clima.

Os Sistemas de Alertas Hidrológicos (SAH) estão inseridos nos seguintes objetivos da ODS:



¹ Link para cartilha da ODS dos SAHs:

http://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/21778/1/7_sistemas_de_alerta_hidrologico_outubro_ok.pdf

PROGRAMA GESTÃO DE RISCOS E DESASTRES NATURAIS

REALIZAÇÃO

Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial

AUTORES

Maria Letícia Rabelo Alves Patrus

Artur José Soares Matos

FOTOS DA CAPA: Registro fotográfico do rio das Velhas na estação telemétrica Ponte do Licínio, localizada no município de Presidente Juscelino, MG, obtido durante as atividades de medições de vazão realizadas pela equipe do Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

P 314 Serviço Geológico do Brasil -SGB/ CPRM Companhia de Pesquisa Recursos Minerais

Sistema de alerta hidrológico da Bacia do Rio das Velhas: relatório de operação do sistema no período de novembro de 2020 a março de 2021./ Autores Maria Letícia Rabelo Alves Patrus, Artur José Soares Matos. – Belo Horizonte: CPRM,2021.

96 p. 6.753 kbytes. Área Levantamentos, estudos, previsão e alerta de eventos hidrológicos críticos. Sistemas de Alerta Hidrológico da Bacia do Rio das Velhas,nº01.Disponível em [www.cprm.gov.br/ RIGEO](http://www.cprm.gov.br/RIGEO).

Conteúdo: Inclui padrões dos boletins de alerta hidrológicos da Bacia do Rio das Velhas.

1-Hidrologia de Minas Gerais 2- Sistema de alerta hidrológico 3- Inundações 4- Enchentes I- Título II- Patrus, Maria Letícia Rabelo. M.III- Matos, Artur José Soares IV- Coleção.

CDU: 551.577 (815.1A/Z)

Ficha Catalográfica por Bibliotecária M. Madalena Costa Ferreira CRB/MG1393 – Biblioteca Regional da CPRM de Belo Horizonte-MG

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

seus@cprm.gov.br

APRESENTAÇÃO

O Serviço Geológico do Brasil – CPRM, é uma empresa pública federal, vinculada ao Ministério de Minas e Energia – MME. Sua missão é gerar e disseminar o conhecimento geocientífico com excelência, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida e desenvolvimento sustentável do Brasil.

Nesse enfoque, o Serviço Geológico do Brasil opera, em parceria com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), sistemas de alerta hidrológico nos principais cursos d'água do país, que beneficiam mais de sete milhões de pessoas nas diversas regiões do Brasil. Tais sistemas de alerta são uma medida não estrutural adotada para a prevenção/mitigação de prejuízos causados por eventos de cheias nas bacias hidrográficas.

O Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do rio das Velhas – SAH Velhas é operado, desde o ano de 2018, no período de chuvas da Região Sudeste, especificamente entre os meses de novembro a março. Em sua primeira etapa de operação o SAH Velhas beneficia as cidades de Jequitibá e Santo Hipólito, localizadas às margens do rio das Velhas em seu médio e baixo curso.

Durante a operação do Sistema de Alerta, o Serviço Geológico do Brasil – CPRM transmite diariamente às diversas instituições governamentais, tais como o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD), Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), Corpo de Bombeiros, Polícia Militar e prefeituras municipais, um Boletim de Monitoramento Hidrológico contendo informações sobre os níveis dos rios nas estações fluviométricas monitoradas. Em situações em que os níveis do rio se elevam acima da cota de alerta são emitidos Boletins de Alerta Hidrológico, contendo previsões de nível com antecedência pré determinada. Mais informações podem ser obtidas em: www.cprm.gov.br/sace.

Nesse contexto, o presente relatório apresenta os principais elementos relativos ao Sistema de Alerta Hidrológico da bacia do rio das Velhas, bem como os aspectos relacionados à operação do Sistema de Alerta no período de novembro de 2020 a março de 2021.

RESUMO

O Serviço Geológico do Brasil – CPRM, por meio da Superintendência Regional de Belo Horizonte (SUREG-BH), opera, desde 2018, o Sistema de Alerta Hidrológico na bacia do rio das Velhas – SAH Velhas, em parceria com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). O Sistema de Alerta Hidrológico é uma medida não estrutural adotada para a prevenção/mitigação de prejuízos causados por eventos de cheias nas bacias hidrográficas. O presente relatório apresenta a descrição e os resultados da operação 2020-2021 do Sistema de Alerta do rio das Velhas, realizada no período chuvoso, entre os meses de novembro de 2020 e março de 2021.

Palavras-Chave – Sistema de Alerta Hidrológico, Bacia do rio das Velhas, Rede Hidrometeorológica Nacional.

ABSTRACT

The Geological Survey of Brazil – CPRM, through the Regional Superintendence of Belo Horizonte (SUREG-BH), has been operating, since 2018, the Flood Warning System in the Velhas river basin – SAH Velhas, in partnership with the National Water and Sanitation Agency (ANA). The Flood Warning System is a non-structural measure adopted for the prevention/mitigation of damages caused by flood events. This report presents the description and results of the 2020-2021 operation of the Velhas River Warning System, that covered the rainy period between the months of November 2020 to March 2021.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 Enchentes e Inundações | 17 |
| 1.2 Sistemas de Alerta Hidrológico - SAHs | 18 |
| 1.3 Sistemas de Alerta Hidrológico operados pelo Serviço Geológico do Brasil | 19 |
| 1.4 A plataforma SACE | 22 |
| 2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E HIDROCLIMÁTICA DA BACIA DO RIO DAS VELHAS | 25 |
| 2.1 Localização e características gerais..... | 25 |
| 2.2 Geologia..... | 28 |
| 2.3 Geomorfologia..... | 29 |
| 2.4 Vegetação | 31 |
| 2.5 Clima | 31 |
| 3. FATORES HIDROMETEOROLÓGICOS ASSOCIADOS À OCORRÊNCIA DE CHEIAS NA BACIA..... | 33 |
| 3.1 Histórico de cheias na bacia..... | 34 |
| 4. DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS..... | 36 |
| 4.1 Rede hidrometeorológica existente..... | 36 |
| 4.2 Dados das Usinas hidrelétricas | 41 |
| 4.3 Extensão das séries de dados diários das estações utilizadas no Sistema de Alerta | 41 |
| 4.4 Diagrama unifilar | 41 |
| 4.5 Traçado e atualização das curvas chave | 44 |
| 4.6 Geração de vazões e análise de consistência dos dados..... | 46 |
| 5. ESTRUTURAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE ALERTA..... | 51 |
| 5.1 Viagem de reconhecimento de campo | 51 |

| | |
|---|-----------|
| 5.2 Levantamento das cidades/localidades afetadas pelas enchentes..... | 51 |
| 5.3 Definição das cidades a serem atendidas pelo Sistema de Alerta | 53 |
| 5.4 Avaliação da rede hidrometeorológica existente e da necessidade de sua adequação ao sistema de alerta | 54 |
| 5.5 Instalação de estações telemétricas | 56 |
| 5.6 Levantamento em campo das cotas de alerta e inundação..... | 57 |
| 6. MODELOS DE PREVISÃO HIDROLÓGICA | 61 |
| 6.1 Eventos utilizados para a modelagem hidrológica..... | 63 |
| 6.2 - Estimativa dos tempos de viagem | 64 |
| 6.3 Modelos de previsão para Jequitibá | 69 |
| 6.3.1 Aplicação do método de propagação de Muskingum-Cunge | 73 |
| 6.4 Modelo de previsão para Santo Hipólito | 81 |
| 7. OPERACIONALIZAÇÃO DO SISTEMA DE ALERTA | 82 |
| 7.1 Estruturação dos dados no SACE | 82 |
| 7.2 Inserção de dados e informações relevantes no Servidor do sistema de alerta | 84 |
| 7.3 Elaboração dos boletins padrão..... | 84 |
| 7.4 Lançamento oficial do Sistema de Alerta da Bacia do rio das Velhas – SAH Velhas | 84 |
| 8. Operação do Sistema de Alerta..... | 85 |
| 8.1 Operação no período 2018-2019 | 85 |
| 8.2 Operação no período 2019-2020 | 85 |
| 8.3 Operação no período 2020-2021 | 87 |
| 9. CONCLUSÕES..... | 95 |
| 10. BIBLIOGRAFIA..... | 96 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|--------------------------------------|
| Figura 01 – Atividades de um sistema de alerta de cheias. | 19 |
| Figura 02 - temas de Alerta Hidrológico operados pelo Serviço Geológico do Brasil. | 21 |
| Figura 03 – Tela inicial da plataforma SACE para a bacia do rio das Velhas. | 23 |
| | Erro! Indicador não definido. |
| Figura 04 – Tela para o acesso às informações de um ponto específico. | 24 |
| Figura 05 – Acesso aos dados do ponto de monitoramento. | 24 |
| Figura 06 – Acesso aos gráficos do ponto de monitoramento..... | 25 |
| Figura 07 – Localização da bacia do rio das Velhas..... | 26 |
| Figura 08 – Municípios localizados no alto, médio e baixo Velhas (Fonte: CBH Rio das Velhas)..... | 27 |
| Figura 09 – Relevo sombreado da bacia do rio das Velhas..... | 30 |
| Figura 10 – Falhas durante os eventos de 1979 e 1997 em Jequitibá, Pirapama, Ponte do Licínio e Santo Hipólito..... | 35 |
| Figura 11 – Localização das estações da RHN na bacia do rio das Velhas..... | 39 |
| Figura 12 – PCD's existentes na bacia do rio das Velhas..... | 40 |
| Figura 13 – Diagrama de dados relativo à extensão das séries de cotas nas estações fluviométricas utilizadas no Sistema de Alerta (só mostra a extensão das séries, não mostra os períodos com falhas). | 42 |
| Figura 14 – Diagrama Unifilar da bacia do rio das Velhas..... | 43 |
| Figura 15 – Hidrograma de vazões médias diárias das estações de Honório Bicalho (cód. 41199998), Ponte Raul Soares (cód. 41340000), Jequitibá (cód. 41410000), Ponte do Licínio (cód. 41650002) e Santo Hipólito (cód. 41818000) no período de 09/2012 a 04/2013..... | 47 |
| Figura 16 – Descontinuidade nas vazões das estações de Rio Acima e Raposos devido à captação de Bela Fama. | 48 |
| Figura 17 – Comportamento da cheia de janeiro de 2020 nas estações de Jequitibá, Ponte do Licínio, Santo Hipólito (no rio das Velhas) e Presidente Juscelino (no rio Paraúna)..... | 50 |

| | |
|---|----|
| Figura 18 – Ilhas e várzeas no segmento do trecho do rio das Velhas entre Ponte do Licínio e Santo Hipólito (Fonte: Google Earth, 2020)..... | 50 |
| Figura 19 – Registros de enchentes nas cidades às margens do rio das Velhas. | 52 |
| Figura 20 – Réguas e PCD instaladas em Rio Acima (à esquerda) e Raposos (à direita). | 57 |
| Figura 21 – Pontos marcados para levantamento das cotas de inundação..... | 60 |
| Figura 22 – Hidrograma defasado das estações Ponte Raul Soares, Ponte Preta e Jequitibá. | 68 |
| Figura 23 – Hidrograma defasado das estações de Ponte do Licínio, Presidente Juscelino e Santo Hipólito..... | 68 |
| Figura 24 – Diagrama simplificado para Jequitibá. | 70 |
| Figura 25 – Diagrama Simplificado para Santo Hipólito). | 71 |
| Figura 26 – Vazões de Ponte Raul Soares x Jequitibá com defasagem de 17h. .. | 72 |
| Figura 27 – Hidrogramas do evento de janeiro de 2020..... | 77 |
| Figura 28 – Hidrograma defasado das estações Ponte Preta e Jequitibá entre 01/02 e 31/03/2021. | 77 |
| Figura 29 – Modelo de previsão para Jequitibá, aplicado nos eventos de janeiro/1991, janeiro/2012, janeiro/2016 e janeiro/2020. | 80 |
| Figura 30 – Modelo de previsão para Santo Hipólito, aplicado nos eventos de janeiro de 1991, fevereiro de 1992, janeiro de 2011, janeiro de 2016, janeiro de 2020 e março de 2020 | 83 |
| Figura 31 – Hidrograma das estações da calha do rio das Velhas entre 20/01 e 20/04/2021..... | 86 |
| Figura 32 – Chuva incidente na bacia do rio das Velhas nos dias 05 a 08/02/2021..... | 88 |
| Figura 33 – Cotagrama das estações monitoradas no período de 05 a 14/02/2021..... | 89 |
| Figura 34 – Hidrograma das estações monitoradas no período de 05 a 14/02/2021..... | 89 |
| Figura 35 – Variação das cotas em Jequitibá entre 07 e 11/02/2021. | 90 |

| | |
|---|----|
| Figura 36 – Chuva incidente na bacia do rio das Velhas entre os dias 17 e 22/02/2021..... | 90 |
| Figura 37 – Cotagrama das estações monitoradas no período de 15 a 28/02/2020..... | 92 |
| Figura 38 – Hidrograma das estações monitoradas no período de 15 a 28/02/2020..... | 92 |
| Figura 39 – Variação das cotas em Santo Hipólito entre 20 e 26/02/2021..... | 93 |
| Figura 40 – Cotagrama do período de 23/11/2020 a 31/03/2021..... | 93 |
| Figura 41 – Hidrograma do período de 23/11/2020 a 31/03/2021. | 94 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 01 – Estações pertencentes à RHN em operação na bacia do rio das Velhas..... | 37 |
| Tabela 02 – Curvas chave geradas e estações-ano analisadas..... | 45 |
| Tabela 03 – PCDs existentes na bacia à época do início da implementação do Sistema de Alerta..... | 55 |
| Tabela 04 – Formulário de marcação dos pontos verificados “in loco” para o levantamento das cotas de inundação | 59 |
| Tabela 05 – Cotas de alerta e inundação das cidades de Jequitibá e Santo Hipólito até 2020 | 60 |
| Tabela 06 – Novas cotas de referência em Jequitibá e Santo Hipólito levantadas em outubro de 2020..... | 61 |
| Tabela 07 – Eventos utilizados para calibração do modelo de previsão para Jequitibá | 64 |
| Tabela 08 – Eventos utilizados para calibração do modelo de previsão para Santo Hipólito..... | 64 |
| Tabela 09 – Estimativa dos tempos de concentração e de viagem das diversas estações da bacia do rio das Velhas | 66 |
| Tabela 10 – Variáveis e parâmetros do modelo de Muskingum-Cunge obtidos para o trecho do rio das Velhas entre Ponte Raul Soares e Jequitibá | 76 |
| Tabela 11 – Coeficiente de Nash relativo ao modelo principal de previsão para Jequitibá aplicado em alguns dos eventos considerados | 79 |
| Tabela 12 – Coeficiente de Nash relativo ao modelo principal de previsão para Santo Hipólito aplicado em alguns dos eventos considerados | 82 |
| Tabela 13 – Número de boletins emitidos durante a operação do SAH Velhas 2020-2021..... | 94 |

AGRADECIMENTOS

A operação do Sistema de Alerta Hidrológico da bacia do rio das Velhas nos períodos de 03 de dezembro de 2018 a 25 de março de 2019 e de 25 de novembro de 2019 a 14 de abril de 2020 só foi possível com a utilização dos dados hidrológicos provenientes da Rede Hidrometeorológica Nacional – RHN e Rede Meteorológica Nacional de Referência - RHNR, de responsabilidade da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA, operada pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM e demais parceiros. A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico disponibiliza apoio operacional e financeiro para a operação e manutenção das estações da RHN/RHNR, fornecendo, inclusive, os equipamentos de medição utilizados pelas equipes de campo.

Seguem nossos agradecimentos (por ordem alfabética):

- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA;
- Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN;
- Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas – CBH Velhas;
- Coordenadoria Estadual de Defesa Civil do Estado de Minas Gerais – CEDEC;
- Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG;
- Corpo de Bombeiros do Estado de Minas Gerais;
- Defesa Civil do Município de Jequitibá;
- Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM;
- Instituto Nacional de Meteorologia – INMET;
- Polícia Militar do Estado de Minas Gerais;
- Prefeituras Municipais de Jequitibá e Santo Hipólito
- Sistema de Meteorologia e Recursos Hídricos de Minas Gerais – SIMGE;

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enchentes e Inundações

As equipes de plantão trabalham com dados que são recebidos em intervalos horários, por transmissores via satélite ou GSM instalados nas estações de monitoramento automáticas. Esses dados são provenientes das estações da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), gerenciada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), e operada pela CPRM. Tais estações são dotadas de sensores de nível, que medem a variação nos níveis das águas com alta precisão, bem como pluviômetros automáticos, capazes de registrar a quantidade de chuva.

As causas das inundações podem ser atmosféricas ou geotécnicas. Exemplos de causas atmosféricas são as chuvas intensas em pequenas bacias, precipitações frontais em médias e grandes bacias, ciclones tropicais, furacões e tufões. Os fatores geotécnicos são deslizamentos, terremotos, rompimento de barragens, carreamento de solos, dentre outros.

As inundações geradas no espaço urbano, também chamadas de cheias urbanas, também decorrem de um desses dois processos ou de ambos e classificam-se em dois tipos distintos, associados às áreas ocupadas ou ao processo de expansão urbana, a saber: as inundações ribeirinhas e as inundações decorrentes da urbanização.

As inundações ribeirinhas ocorrem quando as várzeas ou planícies de inundação passam a ser ocupadas pela população urbana. Já as inundações decorrentes do processo de urbanização são as que resultam de projetos e obras de drenagem inadequadas; da obstrução da seção de escoamento devido à construção de pontes e aterros; da deposição de sedimentos e de resíduos sólidos e do aumento da impermeabilização da área urbana, dentre outros motivos.

A Política Nacional de Defesa Civil (Brasil, 2007) classifica os problemas decorrentes das cheias como Desastres Naturais Relacionados com o Incremento das Precipitações Hídricas e com as Inundações. Essa política define que a causa das inundações é o afluxo de grande volume de água que, ao transbordar dos leitos dos rios, lagos, canais e áreas represadas, invade os terrenos adjacentes, provocando danos.

Conforme a Política Nacional de Defesa Civil, as inundações podem ser classificadas em função de sua magnitude ou evolução. A classificação pela magnitude é feita através de dados comparativos de longo prazo, conforme abaixo:

- Inundações excepcionais;
- Inundações de grande magnitude;
- Inundações normais ou regulares;
- Inundações de pequena magnitude.

Em função da sua evolução, as inundações podem ser:

- Enchentes ou inundações graduais;
- Enxurradas ou inundações bruscas;
- Inundações litorâneas provocadas pela brusca invasão do mar.

1.2 Sistemas de Alerta Hidrológico - SAHs

Uma medida não estrutural recomendada pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para gerenciar ou reduzir o impacto causado pelas inundações é a implantação e operação de Sistemas de Alerta e Previsão de Cheias. Esta medida pode, ou não, ser associada a outras medidas não estruturais como o planejamento do uso do solo e ordenamento territorial, ou a medidas estruturais, como a construção de diques ou barramentos.

Os Sistemas de Alerta Hidrológico – SAHs - colaboram significativamente para a redução dos riscos de perdas de vida e materiais, uma vez que vem dotar às prefeituras municipais, entidades de Defesa Civil e a comunidade em geral, de informações sobre a previsão dos níveis, com antecedência suficiente para que os órgãos gestores possam se preparar para o evento de inundação e tomar as medidas de proteção necessárias.

Os SAHs são constituídos por:

- Sistemas de monitoramento e transmissão das informações relativas aos níveis e vazões dos rios e às precipitações na bacia;
- Sistemas de armazenamento dos dados hidrológicos;
- Modelos de previsão hidrológica;
- Sistemas de disseminação das previsões e dos alertas de cheias;
- Procedimentos de resposta às ocorrências de emergências.

A Figura 01 esquematiza as atividades de um sistema de alerta de cheias:

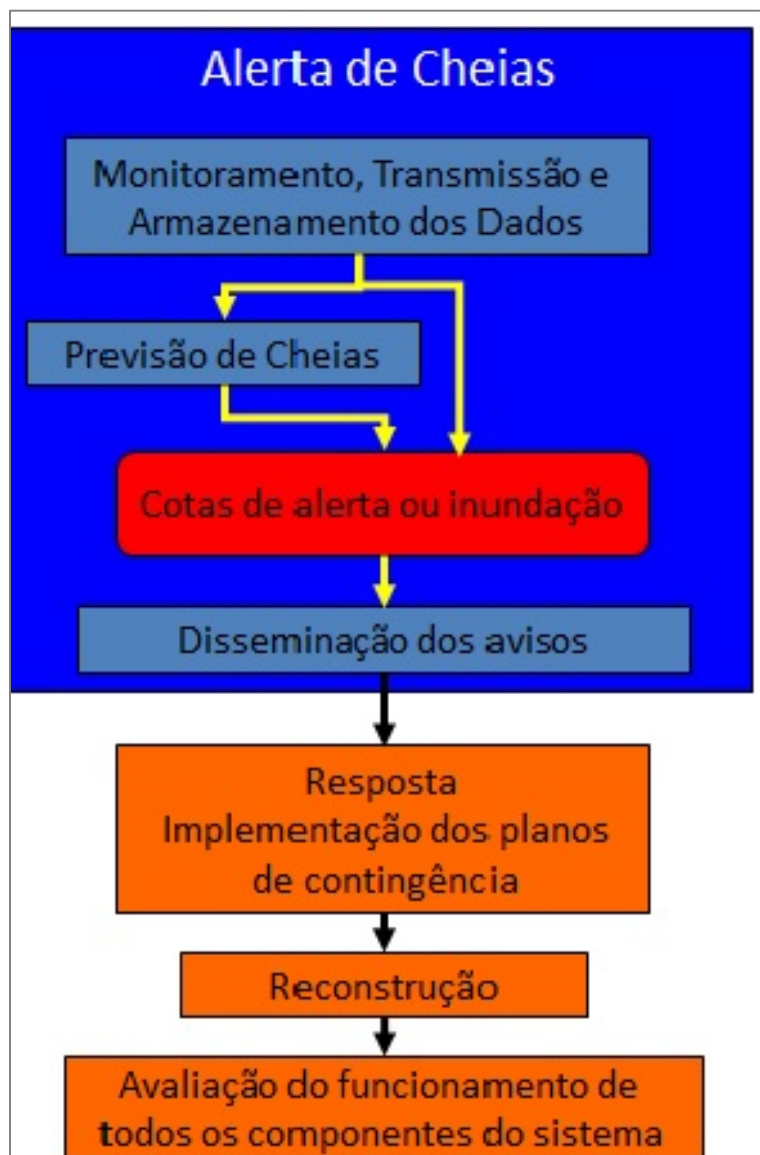


Figura 01 – Atividades de um sistema de alerta de cheias

1.3 Sistemas de Alerta Hidrológico operados pelo Serviço Geológico do Brasil

O Serviço Geológico do Brasil – CPRM tem como missão institucional “gerar e disseminar o conhecimento geocientífico com excelência, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida e desenvolvimento sustentável do Brasil”. Dentre suas atribuições, está a realização de pesquisas e estudos relacionados com os fenômenos naturais ligados a Terra, tais como terremotos, deslizamentos, enchentes, secas, desertificação e outros.

Portanto, já no ano de 1989, o Serviço Geológico do Brasil implementou e iniciou a operação de seu primeiro sistema de alerta hidrológico, na bacia amazônica – sistema integrado dos rios Solimões, Negro e Amazonas, com o fornecimento de previsão de níveis para a cidade de Manaus. Em 1994 iniciou-se a operação do sistema de alerta da bacia do rio Paraguai, beneficiando a região do Pantanal Mato-grossense. Em 1997 teve início a operação do sistema de alerta da bacia do rio Doce, que atende diversas cidades dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Em 2010 foi implementado o sistema de alerta da bacia do rio Caí, no Rio Grande do Sul.

No ano de 2012 a empresa instituiu a ação **“Levantamentos, Estudos, Previsão e Alerta de Eventos críticos”**, vinculada ao programa Gestão de Riscos e Desastres, do Governo Federal. Essa ação engloba todos os projetos relacionados com eventos hidrológicos críticos, em especial, a operação de novos sistemas de alerta hidrológicos, o mapeamentos de áreas susceptíveis à inundações, o zoneamento de áreas inundáveis, entre outros.

Desde então foram implementados, ao longo do período 2012-2020, outros doze sistemas de alerta em diversas bacias brasileiras, totalizando dezesseis sistemas em operação no ano de 2020, incluindo o Sistema de Alerta do rio das Velhas. Esses sistemas são operados anualmente durante os períodos chuvosos e beneficiam mais de sete milhões de pessoas nas diversas regiões do Brasil.

A Figura 02 mostra as bacias que apresentam sistemas de alerta hidrológico operados pelo Serviço Geológico do Brasil.

Em todos os sistemas de alerta, o Serviço Geológico do Brasil – CPRM realiza o monitoramento dos níveis d’água e precipitação incidente nas estações telemétricas por ele operadas e que integram os sistemas de alerta. Essas estações, também conhecidas como Plataformas de Coletas de Dados (PCDs), enviam, a cada hora, os dados dos níveis dos rios registrados de quinze em quinze minutos e, em alguns casos, também os volumes de chuva para os mesmos intervalos de tempo. Esses dados, uma vez recebidos, são armazenados em banco de dados. As PCDs que compõem os sistemas de alerta hidrológicos integram a Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), sendo muitas operadas como estações da Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência (RHNR). A operação e manutenção destas estações, assim como o uso dos equipamentos de medição, tem apoio operacional e financeiro da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico ANA.

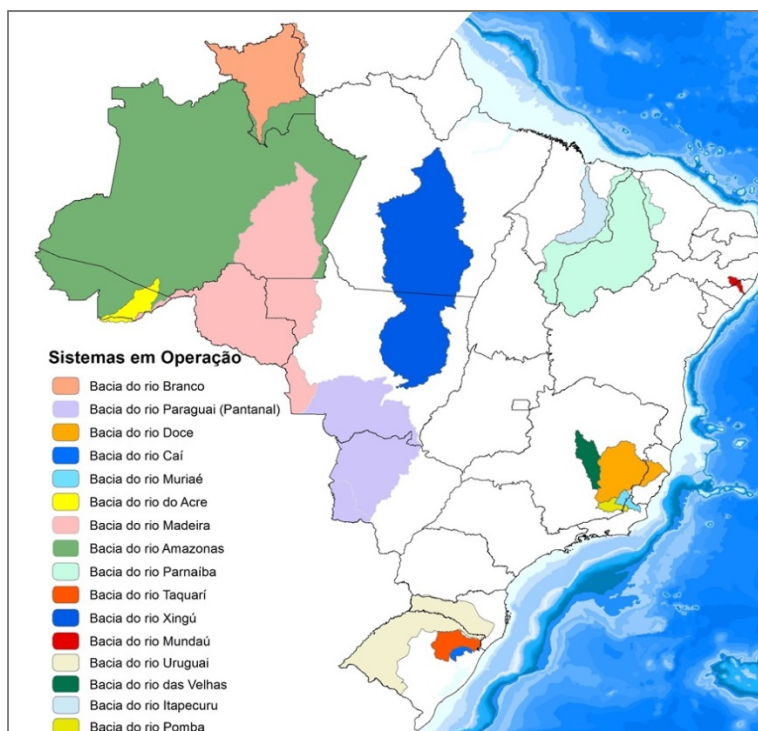


Figura 02 - Sistemas de Alerta Hidrológico operados pelo Serviço Geológico do Brasil

Além disso, no âmbito dos sistemas de alerta, é efetuada a previsão dos níveis dos cursos d'água monitorados através da utilização de modelos de previsão hidrológica desenvolvidos pela equipe técnica institucional e emitidos, de forma sistemática durante todo o período de operação do sistema, boletins de monitoramento hidrológico e adicionalmente, em situações de cheia, também boletins de alerta hidrológico.

Os boletins de monitoramento hidrológico contêm as informações das cotas e precipitações nas estações monitoradas em forma de gráficos e tabelas. Os boletins de alerta hidrológico são emitidos a partir do momento em que se verifica a possibilidade real de ocorrência de inundação em determinada localidade, ou seja, quando o curso d'água já atingiu ou deverá atingir em breve um determinado nível de alerta. Esses boletins de alerta hidrológico contêm, além de todas as informações apresentadas nos boletins de monitoramento, também as previsões, com uma antecedência pré determinada, das cotas que o rio deverá atingir nas localidades beneficiadas pelo Sistema, assim como outras informações consideradas relevantes.

Todos os boletins são enviados para as Defesas Civas Municipais e Estaduais, Prefeituras, Governos Estaduais e diferentes órgãos do Governo Federal. Todos os

dados também são disponibilizados para usuários em geral, através do portal do Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

Ressalva-se que o Serviço Geológico do Brasil não opera sistemas de alerta em municípios onde as inundações ocorrem devido ao transbordamento de pequenos cursos d'água urbanos que apresentem resposta muito rápida às precipitações, ou as decorrentes do processo de urbanização, principalmente aquelas causadas pela drenagem pluvial urbana inadequada. Em casos excepcionais, a CPRM poderá colaborar com os órgãos governamentais e prefeituras, na organização de ações preventivas e de ordenamento territorial.

1.4 A plataforma SACE

A plataforma SACE (Sistema de Alerta de Eventos Críticos) foi desenvolvida pelo Serviço Geológico do Brasil e é uma ferramenta auxiliar extremamente útil para o trabalho das equipes técnicas que operam os sistemas de alerta, tanto no acompanhamento das variações dos níveis nas diversas estações telemétricas, quanto na elaboração das previsões hidrológicas para as localidades beneficiadas pelo sistema de alerta hidrológico.

O SACE possui também as seguintes funções:

- Armazenamento dos dados de níveis e precipitações das estações telemétricas monitoradas;
- Armazenamento dos dados de vazões defluentes das usinas hidrelétricas existentes nas bacias monitoradas;
- Disponibilização e ampla divulgação dos dados hidrológicos e boletins gerados pelas equipes de operação, uma vez que a plataforma SACE pode ser acessada a qualquer tempo através do portal do Serviço Geológico do Brasil–CPRM www.cprm.gov.br/sace, inclusive por meio de smartphones, e possui layout bastante amigável.

Todos os sistemas de alerta desenvolvidos pela CPRM utilizam como referência básica para sua operação, as seguintes cotas de referência:

- Cota de atenção: cota a partir da qual o acompanhamento dos níveis do curso d'água deve ser realizado com maior frequência e atenção pela equipe técnica.
- Cota de alerta: Cota a partir da qual os modelos de previsão entram em operação contínua e seus resultados passam a ser enviados sistematicamente através de

boletins de alerta hidrológico para as Prefeituras Municipais, Defesa Civil e demais órgãos competentes.

- Cota de inundação: quando ocorre o transbordamento do curso d'água e ocorre inundação em algum ponto do município monitorado. Normalmente considera-se como cota de inundação a cota da soleira da porta da primeira edificação a ser inundada na localidade monitorada, a qual é levantada pela equipe em campo utilizando-se a referência de nível da seção de réguas da estação hidrométrica.

Desta forma, na tela inicial da plataforma SACE de cada Sistema de Alerta, é apresentado o mapa da bacia e cada ponto monitorado é representado por um círculo e cuja cor representa a cota de referência, conforme a seguir:

- Cota de atenção (cor amarela);
- Cota de alerta (cor laranja);
- Cota de inundação (cor vermelha);
- Cota abaixo do nível de atenção (cor verde);
- Estação sem transmissão (cor cinza).

A Figura 3 mostra, como exemplo, a tela inicial da plataforma SACE para a bacia do rio das Velhas, em que todos os pontos monitorados apresentavam cota abaixo do nível de atenção no momento em que foi feito o acesso à página.

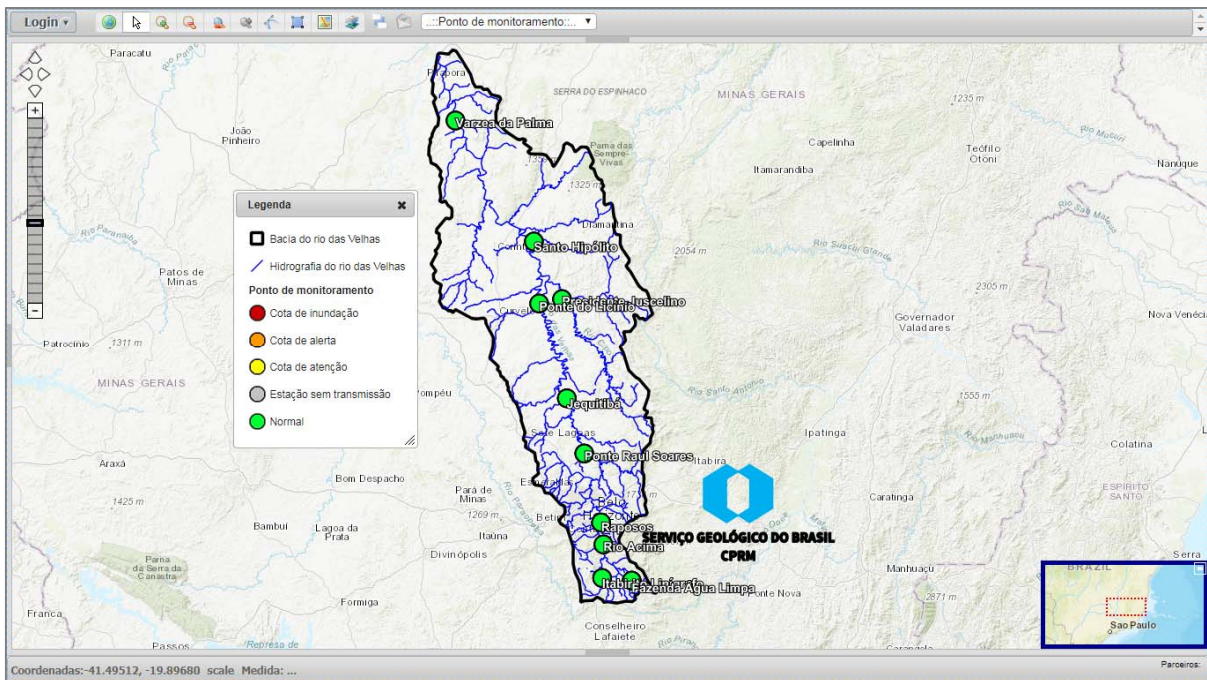


Figura 03 – Tela inicial da plataforma SACE para a bacia do rio das Velhas

O acesso às informações de níveis e precipitação incidente em cada estação monitorada é feito a partir de um clique no respectivo ponto, o que abre uma nova janela que por sua vez oferece a opção de acessar os dados da estação correspondentes ao período mais recente, ou os respectivos gráficos que mostram a variação dos níveis e precipitações para o mesmo período, conforme mostram as Figuras 04, 05 e 06.

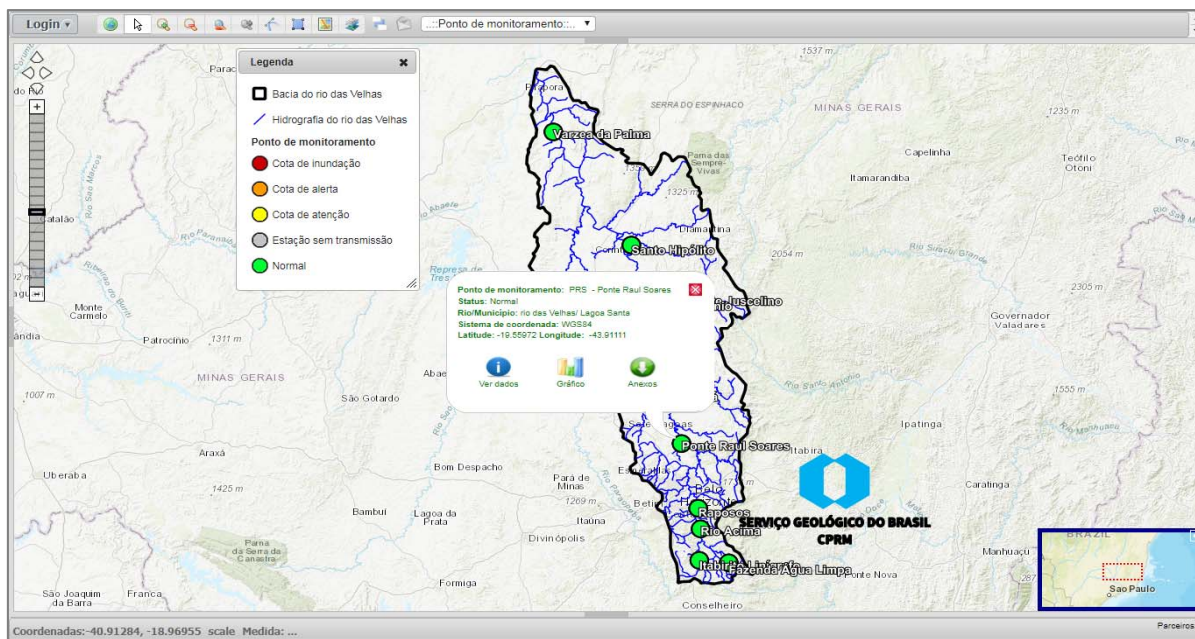


Figura 04 – Tela para o acesso às informações de um ponto específico

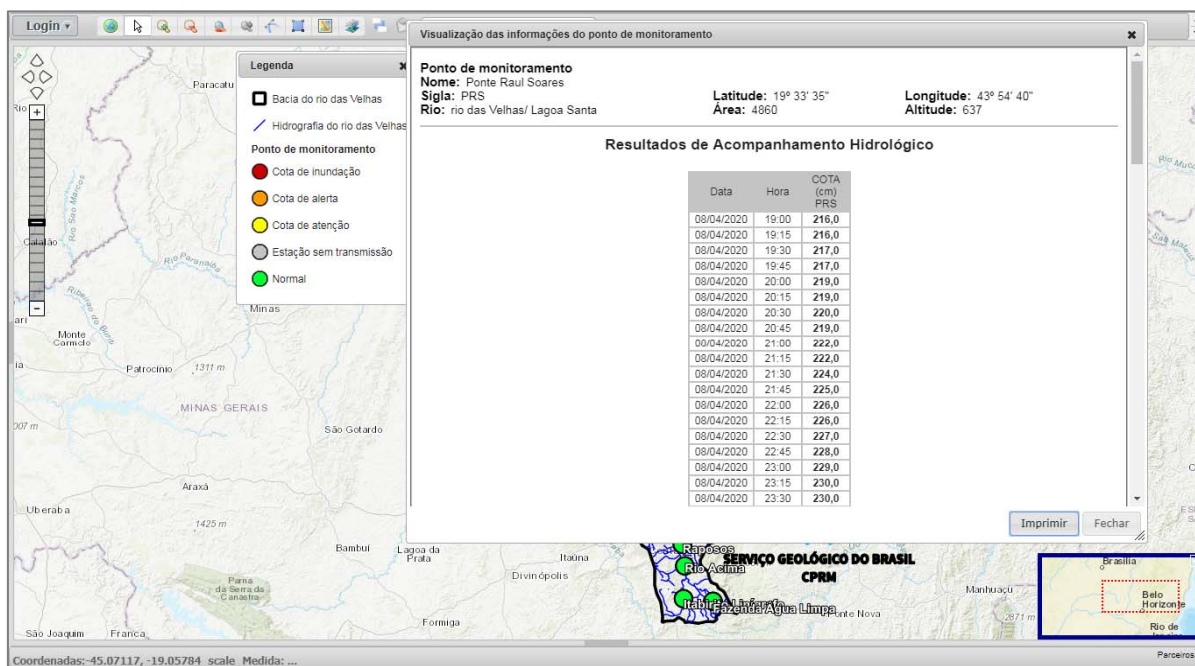


Figura 05 - Acesso aos dados do ponto de monitoramento

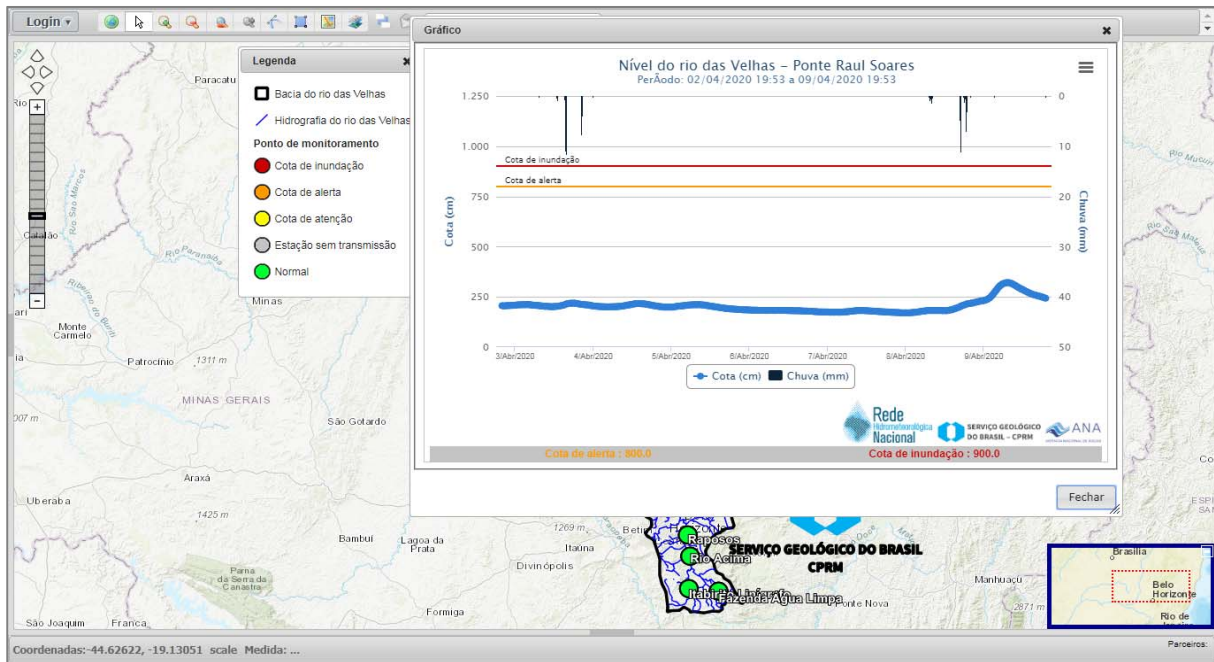


Figura 06 - Acesso aos gráficos do ponto de monitoramento

2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E HIDROCLIMÁTICA DA BACIA DO RIO DAS VELHAS

2.1 Localização e características gerais

A bacia do rio das Velhas está inteiramente inserida no Estado de Minas Gerais e, portanto, é uma bacia estadual. Está localizada na região central do estado, entre as latitudes 17°15"S e 20° 25"S e longitudes 43° 25"W e 44° 50"W e possui uma área de drenagem de 27.865 km².

A bacia apresenta forma alongada e a extensão total do rio das Velhas é da ordem de 740km, com sentido predominantemente SSE-NNW, desde suas nascentes, localizadas no município de Ouro Preto, numa altitude da ordem de 1.490m, até sua confluência com o Rio São Francisco, no distrito de Barra do Guaicuí, município de Várzea da Palma, MG, na altitude de 484m. O rio das Velhas é o maior afluente do rio São Francisco em extensão no Estado de Minas Gerais.

Seus principais afluentes pela margem direita são os rios Taquaraçu, Jaboticatubas, Paraúna e Pardo e pela margem esquerda o córrego do Onça, os ribeirões Arrudas, da Mata, Jequitibá, Picão, da Onça e os rios Itabirito e Bicudo. As vazões específicas médias anuais são da ordem de 19 L/s.km² nas cabeceiras da bacia; esses valores decaem gradativamente ao longo do curso d'água, atingindo valores de cerca de 12 L/s.km² próximo à confluência com o rio São Francisco.

O rio das Velhas teve grande importância histórica para o desenvolvimento da região central de Minas Gerais, tendo sido um dos principais caminhos através dos quais se desenvolveu o ciclo do ouro.

A Figura 07 mostra a bacia do Rio das Velhas, sua localização no Estado de Minas Gerais e sua posição relativa na bacia do rio São Francisco.

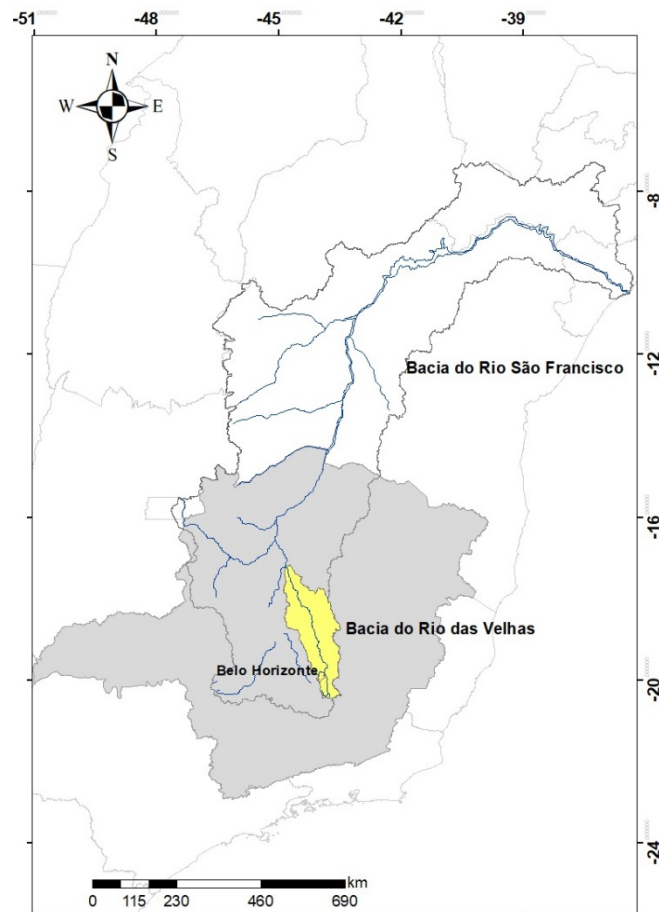


Figura 07 - Localização da bacia do rio das Velhas

A bacia do rio das Velhas engloba total ou parcialmente 51 municípios, onde reside uma população de 4.836.207 habitantes (IBGE, 2010), sendo que 70% desse total concentra-se na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). O rio das Velhas, inclusive, é utilizado para o abastecimento de parte da RMBH; a captação de Bela Fama, pertencente à Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA, está localizada a montante de Belo Horizonte, no município de Nova Lima. Contudo, o lançamento de efluentes e esgotos da RMBH é o maior responsável pela degradação da qualidade das águas do Rio das Velhas ao longo de seu médio curso.

De acordo com o Plano Diretor do Comitê de Bacia do rio das Velhas, a bacia é dividida em três regiões, a saber:

- Alto rio das Velhas: área compreendida entre as cabeceiras e toda a Região Metropolitana de Belo Horizonte a montante do município de Santa Luzia;
- Médio rio das Velhas: Entre o município de Santa Luzia e a confluência com o rio Paraúnas, considerando-se lateralmente as divisas municipais.
- Baixo rio das Velhas: da confluência do rio Paraúnas até a confluência com o rio São Francisco.

A Figura 08 mostra os 51 municípios inseridos total ou parcialmente na bacia, bem como as regiões do alto, médio e baixo Velhas.

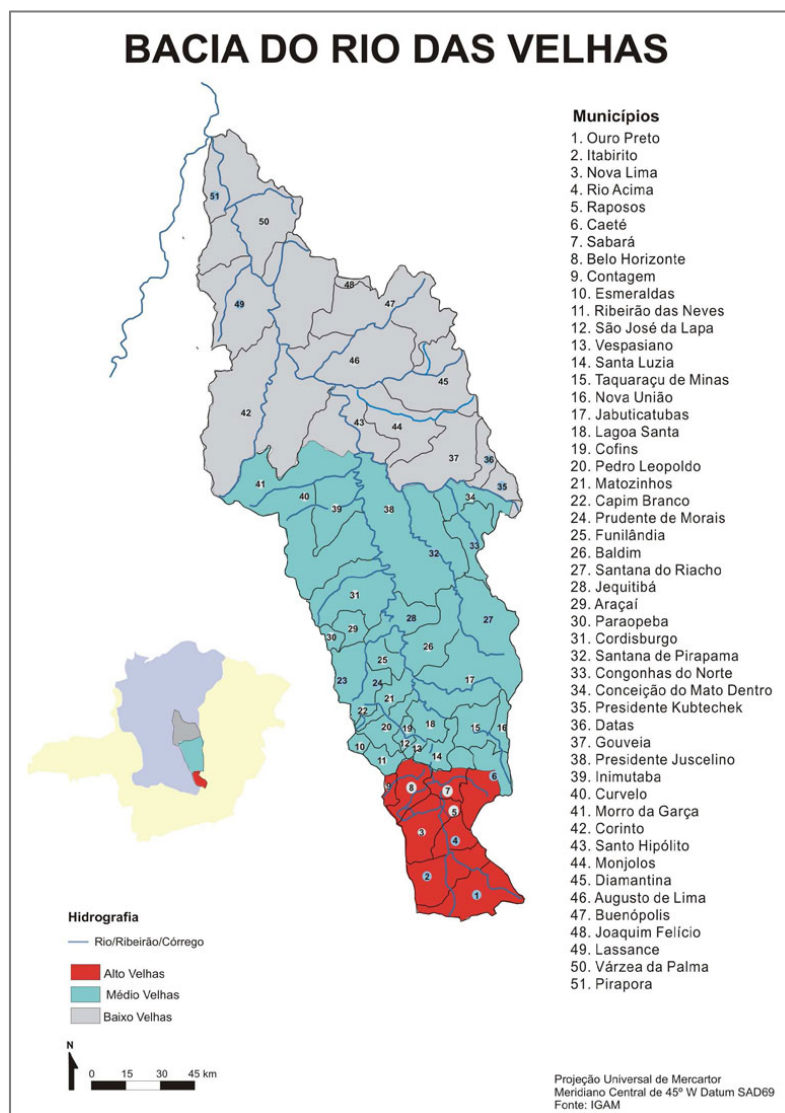


Figura 08 – Municípios localizados no alto, médio e baixo Velhas (Fonte: CBH Rio das Velhas)

2.2 Geologia

O alto rio das Velhas, desde suas nascentes até o norte da cidade de Belo Horizonte, quando adentra a Bacia Sedimentar Proterozóica Superior de Bambuí, drena rochas meta-vulcânicas, meta-vulcano-sedimentares e meta-vulcano-sedimentares arqueanas do Supergrupo Rio das Velhas, assim como rochas meta-sedimentares proterozóicas inferiores do Supergrupo Minas e rochas granito-gnáissicas arqueanas e proterozóicas dos Complexos Bação e Belo Horizonte. A intensa ocupação pelo homem nesta região causou uma erosão acelerada dos terrenos e, conseqüentemente, um grande volume de sedimentos inconsolidados que tem assoreado os cursos d'água da bacia do rio das Velhas.

No médio curso do rio das Velhas, ou seja, desde a área ao norte de Belo Horizonte até a serra do Cabral, próximo a Várzea da Palma, o rio das Velhas corta rochas principalmente do Grupo Bambuí, sendo que as sub-bacias dos rios Cipó e Paraúna cortam em suas cabeceiras rochas dos Grupos Macaúbas e Espinhaço e do núcleo arqueano de Gouvêa.

Logo ao norte de Belo Horizonte, o vale do rio das Velhas encaixa-se em sedimentos carbonáticos da Fm. Sete Lagoas/Gr. Bambuí. Desenvolve-se então um intenso regime de drenagem cárstica. Em seguida drena rochas pelíticas e carbonáticas intercaladas do Subgrupo Paraopeba/Gr. Bambuí, até a serra do Cabral, quando corta rochas da Formação Jequitaí e Grupo Espinhaço. Seus afluentes da margem direita drenam, além das rochas já citadas, a seqüência carbonática da Formação Lagoa do Jacaré/Grupo Bambuí, próximo a Santo Hipólito e Buenópolis, as seqüências arenosas e conglomeríticas (quartzitos e meta-conglomerado) dos Grupos Macaúbas e Espinhaço e os gnaisses e xistos verdes do núcleo de Gouvêa.

Da serra do Cabral até a Barra do Guaicuí, no baixo curso do rio das Velhas, o mesmo corre em uma peneplanície enquanto seus afluentes cortam as serras e chapadas laterais. O terreno do vale é formado por rochas do Subgrupo Paraopeba/Gr. Bambuí em seu eixo, por rochas do Grupo Espinhaço e Formação Jequitaí da serra do Cabral em sua vertente leste e por rochas da Formação Três Marias/ Grupo Bambuí e de chapadas laterizadas (os Campos Gerais) em sua vertente oeste.

2.3 Geomorfologia

O relevo da bacia é caracterizado por unidades morfoestruturais e por planaltos, depressões e áreas dissecadas resultantes de processos morfoclimáticos. As unidades presentes são a Depressão São Franciscana, o Quadrilátero Ferrífero e a Serra do Espinhaço.

A Depressão São Franciscana é delimitada ao sul pelo Quadrilátero Ferrífero e a leste pela serra do Espinhaço. A mesma originou-se ao longo da drenagem do rio São Francisco, inicialmente nos vales dos grandes rios orientados por fraturas, alargando-se posteriormente por processos de aplainamento. Aí predominam as formas aplainadas, as superfícies onduladas e pedimentos ravinados. No contato com os escarpamentos ocidentais da serra do Espinhaço, predominam colinas e cristas com vertentes ravinadas e vales encaixados. Ao norte de Belo Horizonte, observa-se a ocorrência do carste coberto, caracterizado por verrugas, torres e escarpas isoladas, intercaladas com côncavo-convexo. As altitudes variam entre 500 e 900m.

As cabeceiras do rio das Velhas se encontram no chamado Quadrilátero Ferrífero, com características geomorfológicas peculiares no estado de Minas Gerais. O condicionamento estrutural desta unidade determinou a existência de formas de relevo invertido do tipo sinclinal suspenso, e anticlinal esvaziado. Nas rochas não controladas pela estrutura, predominam as cristas com vertentes ravinadas, vales encaixados e as colinas com vales de fundo chato. As altitudes variam entre 900 e 1.500m.

A extremidade leste da sub-bacia é formada pela Serra do Espinhaço, de desenvolvimento longitudinal e cotas altimétricas entre 1.000 e 1.300m. A mesma é constituída de formas de dissecção em rochas do Supergrupo Espinhaço e restos de antigas superfícies de aplainamento que se alternam em picos, cristas e escarpamentos orientados por fratura. Em sua borda ocidental verifica-se uma sucessão de escarpas de linha de falha. Nesta unidade encontram-se importantes aquíferos fraturados de onde originam numerosas fontes.

A Figura 09 mostra o relevo sombreado, obtido através do modelo digital do terreno.

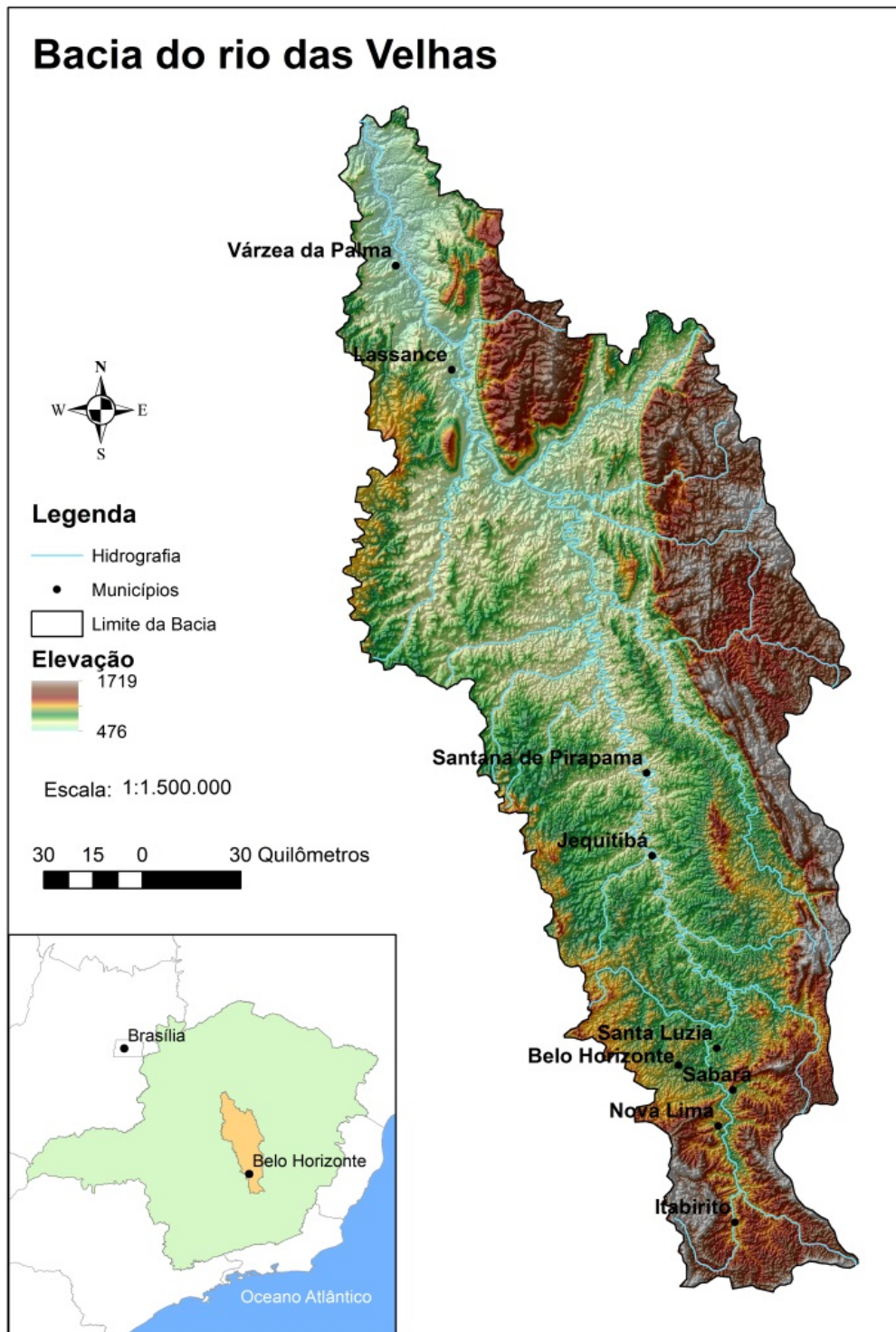


Figura 09 - Relevo sombreado da bacia do rio das Velhas

2.4 Vegetação

Na bacia do alto rio das Velhas, a vegetação original está praticamente desaparecida, devido à intensa ocupação, tendo sido substituída por vastas extensões de pastos e combinação de pastos e capoeiras nas regiões anteriormente ocupadas por matas. Na área que se estende desde as nascentes do rio das Velhas até aproximadamente a cidade de Caeté, pode ser observado, nas capoeiras (formação em fase de desenvolvimento originária de floresta cortada ou queimada), vestígios da floresta subcaducifólica outrora existente, caracterizada por dois estratos arbóreos constituídos de elementos com troncos esbeltos e folhas predominantemente decíduas.

A partir da cidade de Belo Horizonte, em grande extensão até aproximadamente a cidade de Santana do Pirapama, a vegetação atual constitui-se de pastos, observando-se nas extremidades oeste e leste da bacia, respectivamente, o cerrado e os campos de altitude, que se estendem ao longo de toda a serra do Espinhaço, desde o município de Jaboticatubas até a serra do Cabral. Os campos de altitude existentes no Espinhaço são caracterizados pelo agrupamento de algumas famílias botânicas e de espécies endêmicas. Predominam Eriocauláceas, Compostas e Ciperáceas, musgos e arbustos das famílias das Veloziáceas, Melastomatáceas, entre outros. Nesta área, verifica-se ainda a ocorrência de algumas manchas de florestas artificiais em monocultura de Eucaliptus.

No médio curso do rio das Velhas, predomina a ocorrência alternada de cerrado e campo, este notadamente na região do Espinhaço, além de pequenas áreas de reflorestamento artificial. Já no baixo Velhas, volta a ocorrer a existência de pastos em faixa estreita ao longo do rio, enquanto as áreas mais elevadas a oeste desta bacia, são ocupadas novamente por cerrado.

2.5 Clima

As características climáticas mais importantes na região são a predominância de temperaturas medianas a elevadas durante todo o ano e a existência de duas estações bem marcadas: uma estação chuvosa no verão e outra seca no inverno. As temperaturas médias anuais variam entre 20º e 23ºC, atingindo valores inferiores a 20ºC apenas nas altitudes mais elevadas encontradas na serra do Espinhaço e nas cabeceiras do rio das Velhas.

De acordo com a publicação “Normais Climatológicas (1961-1990)”, editado pelo Ministério da Agricultura e Reforma Agrária em 1992, o mês mais quente do ano é fevereiro, com médias variando de 22º a 24ºC, com exceção apenas em reduzida área no alto da serra do Espinhaço, onde a média cai a 21ºC. A temperatura máxima absoluta oscila entre 38º e 40º nas áreas da sub-bacia com altitudes inferiores a 700m.

Julho é o mês mais frio e registra temperaturas médias entre 16º e 20ºC, com a média das mínimas variando entre 7º e 12ºC. Nas cabeceiras da bacia, as mínimas absolutas atingem valores próximos a 0ºC. A amplitude térmica anual é da ordem de 14º a 19ºC.

O regime pluviométrico é decorrente do equilíbrio dinâmico entre o sistema de circulação do anticiclone tropical do Atlântico Sul e o anticiclone polar, além do efeito das correntes perturbadas do oeste. Observa-se também, significativa influência orográfica, com o registro de precipitações mais elevadas nas encostas das serras situadas a barlavento. Os ventos predominantes são na direção NW-NE. O regime pluviométrico é o típico dos climas tropicais, com estação chuvosa no verão e estação seca no inverno.

As precipitações médias anuais variam de 1.800mm nas cabeceiras, decrescendo com as latitudes, até 1.000 mm na confluência com o rio São Francisco. A influência orográfica se faz notar, com registro de precipitações médias anuais mais significativas, em torno de 1500 mm, nos contrafortes da serra do Espinhaço. O trimestre mais chuvoso ocorre nos meses de novembro a janeiro em toda a bacia, contribuindo com 50 a 55% da precipitação ocorrida no ano; o trimestre mais seco corresponde aos meses de junho a agosto.

Existem na bacia três tipologias climáticas, de acordo com a classificação de Wladimir Köppen:

- Cwb - clima temperado brando com verão ameno (temperatura média do mês mais quente inferior a 22ºC) e inverno brando (temperatura média do mês mais frio inferior a 18ºC); a estação seca é coincidente com o inverno. Este tipo climático ocorre junto às cabeceiras da bacia do rio das Velhas e ao longo de toda a serra do Espinhaço, onde as altitudes são mais elevadas, entre 1.000 e 1.300m.

- Cwa - clima temperado brando com verão quente (temperatura média do mês mais quente superior a 22°C) e inverno brando (temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C); a estação seca corresponde ao inverno. É o tipo climático característico de faixa estreita que se estende a leste da bacia, desde o alto curso rio das Velhas até a serra do Cabral.
- Aw - clima tropical chuvoso, quente e úmido, com inverno seco e verão chuvoso. A temperatura média do mês mais frio é sempre superior a 18°C. Este tipo climático ocorre nas demais áreas da sub-bacia, que apresentam altitudes menos elevadas.

3. FATORES HIDROMETEOROLÓGICOS ASSOCIADOS À OCORRÊNCIA DE CHEIAS NA BACIA

As cheias na bacia do rio das Velhas são um fenômeno natural e fazem parte da dinâmica fluvial do rio. Elas geralmente ocorrem durante o período chuvoso, que se estende de outubro a março na Região Sudeste do Brasil, mais frequentemente nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março.

As enchentes geralmente estão associadas à ocorrência da Zona de Convergência do Atlântico Sul – ZCAS, que é o principal sistema meteorológico de grande escala responsável pelo regime de chuvas sobre as Regiões Sul e Sudeste brasileiras durante o período de verão.

A ZCAS é uma grande faixa de nebulosidade com orientação noroeste/sudeste, se estendendo da região amazônica até a região central do Atlântico Sul. Diversos fatores locais podem favorecer a ocorrência da ZCAS: a confluência entre o ar do anticiclone do Atlântico Sul (ASAS) e o ar de latitudes mais altas (próximas da linha do equador), a convergência de umidade e a presença de cavado a leste da Cordilheira dos Andes, propiciando o escoamento de umidade da região amazônica em direção ao Atlântico Sul.

Observações indicam uma associação entre as enchentes na Região Sudeste com a permanência da ZCAS por períodos prolongados sobre o Sudeste. Essa permanência da ZCAS por períodos superiores a três dias, geram precipitações persistentes que criam condições de saturação do solo e produzem grande

escoamento superficial que, ao alcançar o leito dos rios, como o rio das Velhas, extrapolam a sua capacidade de transporte causando as enchentes e inundações.

3.1 Histórico de cheias na bacia

Há registros de que a primeira ponte construída sobre o rio das Velhas em Jequitibá, ligando a cidade à região de Santana de Pirapama, foi parcialmente levada pelas águas em 1808. Uma nova ponte foi construída no local, até que em 1858, outra grande enchente acabou novamente com a travessia. Essa cheia de 1858 está documentada no livro *Viagem de Canoa de Sabará ao Oceano Atlântico*, de Richard Francis Burton.

Ao longo dos últimos sessenta anos, período em que a bacia já era monitorada por meio de estações fluviométricas instaladas na calha principal do rio das Velhas e em alguns tributários, foram registrados diversos eventos de cheia na bacia, sendo três de maior magnitude, incluindo o evento recente de janeiro de 2020.

Em 1979, quando fortes chuvas incidiram sobre a região, ocorreu uma grande cheia. Várias cidades foram atingidas, com o extravasamento não apenas do rio das Velhas, mas de vários afluentes urbanos, o que gerou muitas perdas materiais às populações ribeirinhas.

Algumas cheias de menor magnitude ocorreram nos anos seguintes, sem gerar danos significativos à população até que em janeiro de 1997 outra forte cheia voltou a ocorrer, atingindo a maioria das cidades localizadas às margens do rio das Velhas, o que reforçou, entre os órgãos gestores do Estado de Minas Gerais e prefeituras municipais, a demanda pela adoção de medidas estruturais e não estruturais, dentre elas a implantação e operação de um sistema de alerta na bacia.

Infelizmente, não se tem o registro das variações de nível durante aqueles dois maiores eventos de cheias, tanto o de 1979 quanto o de 1997, uma vez que as réguas das estações fluviométricas foram arrancadas pela força das águas e levadas pela enchente. Tal fato impediu os observadores hidrológicos de realizar as leituras e, dessa forma, não se obteve registros suficientes para o conhecimento do comportamento da onda de cheia nas estações monitoradas. A Figura 10 mostra os hidrogramas de 1979 e 1997 com as respectivas falhas para algumas estações localizadas na calha do rio das Velhas.

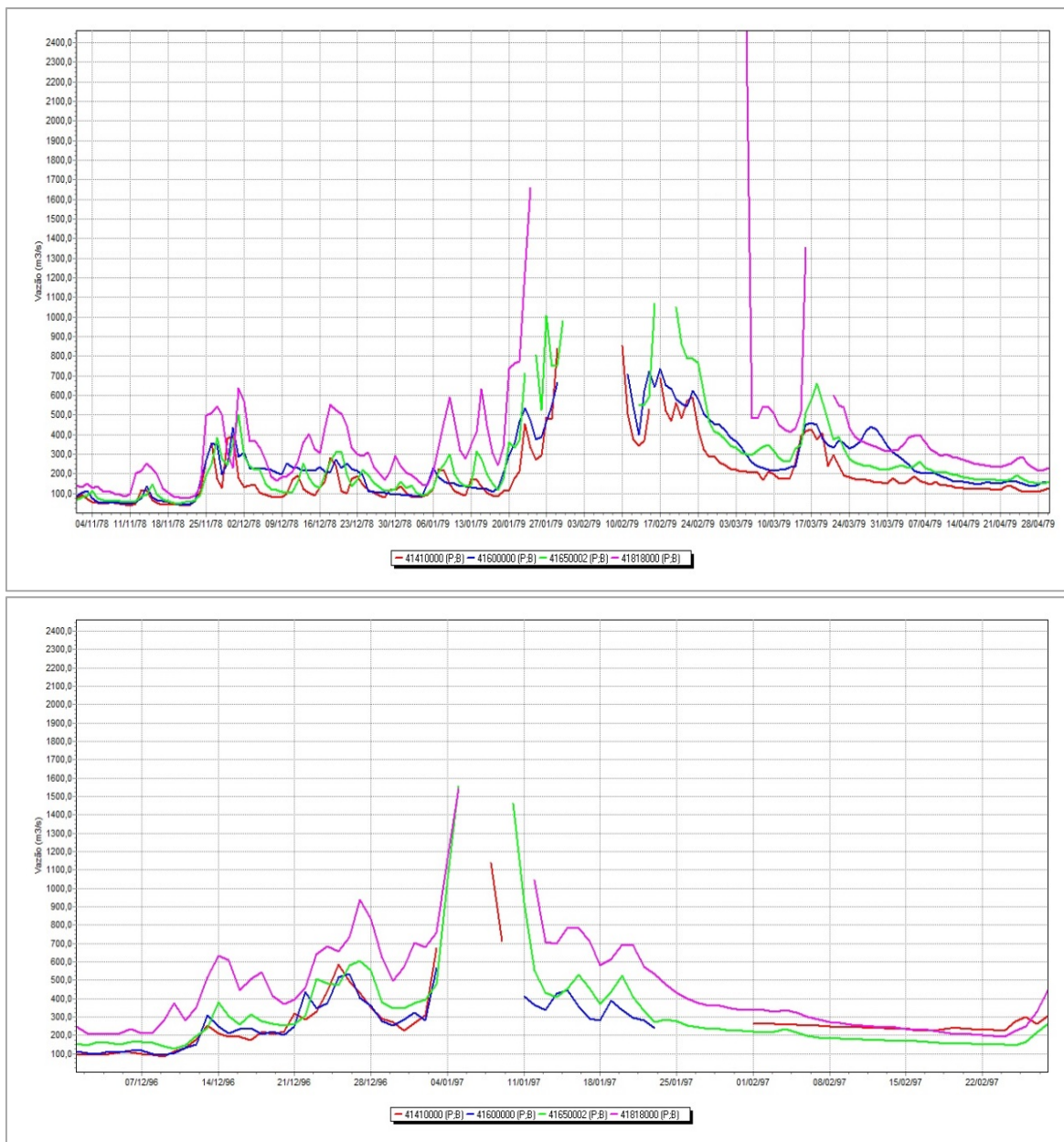


Figura 10 - Falhas durante os eventos de 1979 e 1997 em Jequitibá, Pirapama, Ponte do Licínio e Santo Hipólito.

Outros eventos de menor magnitude foram observados nos anos de 1985, 1991, 1992, 2003, 2011 e 2016. Esses eventos, com dados de cotas registradas diariamente às 07:00 e às 17:00 horas ao longo de toda a onda de cheia, foram utilizados pela equipe técnica do Serviço Geológico do Brasil no desenvolvimento dos primeiros modelos de previsão para o Sistema de Alerta Hidrológico do rio das Velhas.

4. DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS

4.1 Rede hidrometeorológica existente

Existem atualmente na bacia do rio das Velhas 21 estações fluviométricas/fluviográficas e 34 estações pluviométricas/pluviográficas pertencentes à Rede Hidrometeorológica Nacional, que são operadas pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM, conforme mostrado na Tabela 01.

Dentre as estações fluviométricas, doze são automáticas com transmissão. Das estações pluviométricas, quinze são automáticas; dessas, cinco apenas registram e armazenam os dados em *data logger* e dez também transmitem.

O Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM, através de convênio tripartite celebrado com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico e o Serviço Geológico do Brasil para a Sala de Situação do Estado de Minas Gerais, instalou, em meados de 2015, Plataformas de Coleta de Dados nas estações Fazenda Água Limpa, Itabirito Linígrafo e Lassance, todas elas transmissão via satélite. Essas estações já existiam como estações convencionais, eram e continuam sendo operadas pelo Serviço Geológico do Brasil. As estações telemétricas de Rio Acima e Raposos foram instaladas em 2017 com o objetivo de subsidiar o sistema de Alerta.

Além das estações pertencentes à Rede Hidrometeorológica Nacional, existem estações telemétricas instaladas recentemente pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais – CEMADEN, na calha do rio das Velhas, nas cidades de Rio Acima, Raposos e Santa Luzia; também no ribeirão Sabará e em Caeté. Contudo, essas estações atualmente não estão transmitindo. A Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, também possui estações telemétricas na bacia.

Ressalta-se que todas as PCDs existentes foram instaladas a partir de 2010. Portanto, as séries de dados hidrométricos disponíveis para todo o período anterior a 2010, são constituídas pelas leituras das réguas realizadas pelos observadores das estações duas vezes ao dia, às 07:00 e às 17:00 horas.

Tabela 01: Estações pertencentes à RHN em operação na bacia do rio das Velhas

| Estações pertencentes à Rede Hidrometeorológica Nacional em operação na bacia do rio das Velhas | | | | | | | | |
|---|----------|------------------------------|---------|------------------------|---------------|-----------|---------------|-----------|
| Código F | Código P | ESTAÇÃO | Tipo | PCD (tipo/transmissão) | Coordenadas F | | Coordenadas P | |
| | | | | | Latitude | Longitude | Latitude | Longitude |
| 41151000 | 2043056 | Fazenda Agua Limpa-Jusante | PFDQT | VAISALA GOES (IGAM) | -20,305 | -43,616 | -20,305 | -43,616 |
| 41180000 | 2043060 | Itabirito-Linógrafo | PFDQT | VAISALA GOES (IGAM) | -20,301 | -43,798 | -20,301 | -43,798 |
| 41195050 | 2043016 | Rio Acima | FDQT | VAISALA GOES | -20,092 | -43,791 | - | - |
| 41199998 | 2043128 | Honório Bicalho-Montante | FDSQT | HIDROMEC GPRS | -20,024 | -43,823 | -20,024 | -43,823 |
| 41200430 | 1943148 | Raposos | FDQT | VAISALA GOES | -19,963 | -43,807 | -19,963 | -43,807 |
| | 1943010 | Caeté | P | AGSOLVE | | | -19,901 | -43,668 |
| 41250000 | 1943009 | Vespasiano | PrFrDQ | - | -19,687 | -43,921 | -19,687 | -43,921 |
| 41260000 | 1943105 | Pinhões | FDQ | - | -19,705 | -43,815 | -19,705 | -43,815 |
| 41300000 | 1943023 | Taquaraçu | PFDQ | - | -19,653 | -43,687 | -19,664 | -43,688 |
| 41340000 | 1943049 | Ponte Raul Soares | PFDSQ | DUAL BASE | -19,560 | -43,911 | -19,561 | -43,918 |
| 41380000 | - | Ponte Preta | FDQ | VAISALA GOES | -19,462 | -43,904 | - | - |
| 41410000 | 1944081 | Jequitibá | FDQ | HIDROMEC OTT NET DL | -19,217 | -44,025 | -19,217 | -44,025 |
| 41440005 | - | Represa-Jusante | FDQ | - | -19,371 | -44,153 | - | - |
| 41600000 | 1944020 | Pirapama | PFDQ | HIDROMEC GPRS | -19,011 | -44,038 | -19,013 | -44,037 |
| 41650002 | 1844010 | Ponte do Licínio-Jusante | PrFDSQ | HIDROMEC OTT NET DL | -18,673 | -44,194 | -18,671 | -44,191 |
| 41685000 | - | Ponte do Picão | FDQ | - | -18,588 | -44,232 | - | - |
| 41780002 | 1844009 | Presidente Juscelino-Jusante | PrFrDSQ | HEXIS | -18,645 | -44,051 | -18,644 | -44,048 |
| 41818000 | 1844001 | Santo Hipólito (Aneel/Cemig) | PrFrDQ | HIDROMEC OTT NET DL | -18,306 | -44,226 | -18,300 | -44,223 |
| 41890000 | 1744030 | Estação de Curimataí | PFDQ | - | -17,996 | -44,178 | -17,995 | -44,177 |
| 41940000 | 1844018 | Ponte do Bicudo | PFDQ | VAISALA GOES (IGAM) | -18,196 | -44,570 | -18,201 | -44,577 |
| 41990000 | 1744009 | Várzea da Palma | PFDSQ | HEXIS | -17,595 | -44,714 | -17,594 | -44,716 |
| | 1744010 | Lassance | P | | 17,9136 | 44,5694 | -17,890 | -44,577 |

Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2020) – Atualizada pelos autores

Tabela 01 (continuação): Estações pertencentes à RHN em operação na bacia do rio das Velhas

| Estações pertencentes à Rede Meteorológica Nacional em operação na bacia do rio das Velhas | | | | | | | | |
|--|----------|----------------------------|----------|---------------------------|---------------|-----------|---------------|-----------|
| Código F | Código P | ESTAÇÃO | Tipo | PCD (tipo/transmissão) | Coordenadas F | | Coordenadas P | |
| | | | | | Latitude | Longitude | Latitude | Longitude |
| - | 1843000 | Usina Paraúna | P | - | - | - | -18,636 | -43,966 |
| - | 1844017 | Corinto | P | - | - | - | -18,372 | -44,444 |
| - | 1844019 | Morro Da Garça | P | AGSOLVE | - | - | -18,542 | -44,599 |
| - | 1943000 | Mineração Morro Velho | P | - | - | - | -19,979 | -43,850 |
| - | 1943004 | Jaboticatubas | P | - | - | - | -19,521 | -43,744 |
| - | 1943006 | Sabará | P | - | - | - | -19,893 | -43,815 |
| - | 1943022 | Caixa de Areia | Pr | AGSOLVE | - | - | -19,945 | -43,913 |
| - | 1943035 | Vau da Lagoa | Pr | AGSOLVE | - | - | -19,219 | -43,588 |
| - | 1943042 | Fazenda Caraíbas | P | - | - | - | -19,120 | -43,838 |
| - | 1944009 | Pedro Leopoldo | Pr | AGSOLVE | - | - | -19,634 | -44,053 |
| - | 1944024 | Fazenda Vargem Bonita | P | - | - | - | -19,237 | -44,123 |
| - | 2043002 | Lagoa Grande (MMV) | Pr | AGSOLVE | - | - | -20,179 | -43,943 |
| - | 2043004 | Rio do Peixe (MMV) | P | - | - | - | -20,138 | -43,893 |
| - | 2043042 | Represa das Codornas (MMV) | P | - | - | - | -20,165 | -43,892 |
| - | 2043043 | Represa do Miguelão (MMV) | P | - | - | - | -20,126 | -43,950 |

Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2020) - Atualizada pelos autores

As Figuras 11 e 12 mostram, respectivamente, a localização das estações pertencentes à RHN na bacia do rio das Velhas e as imagens de algumas das PCDs existentes nos rios das Velhas e Paraúna e no ribeirão Itabirito.

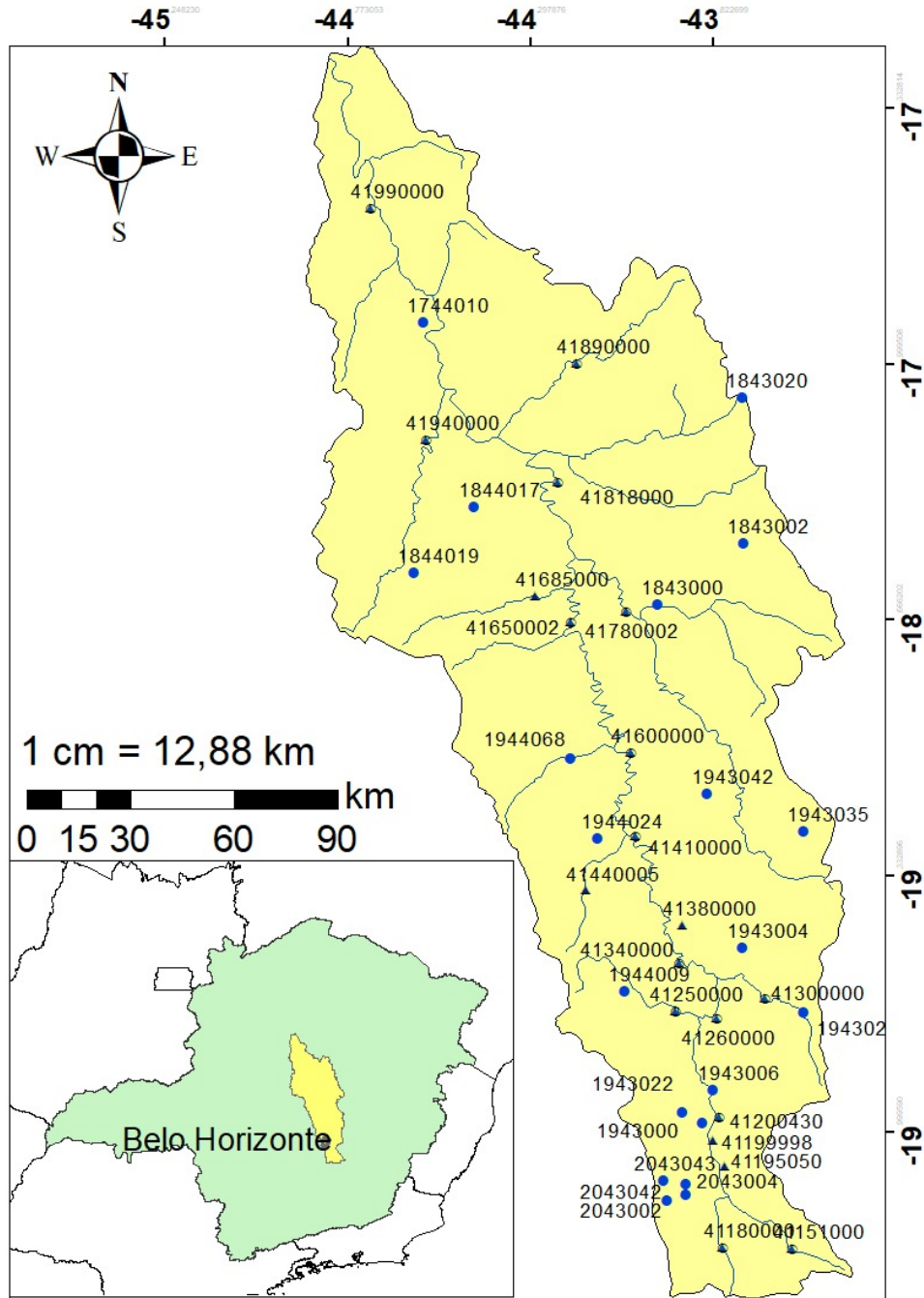


Figura 11 – Localização das estações da RHN na bacia do rio das Velhas



Figura 12 - PCD's existentes na bacia do rio das Velhas

4.2 Dados das Usinas hidrelétricas

Existem na bacia algumas usinas de pequeno porte, sendo duas PCHs pertencentes à CEMIG: a Usina Hidrelétrica Rio de Pedras, no rio das Velhas, no município de Itabirito e a Usina Paraúna, no rio Paraúna, no município de Gouveia. Além dessas existem também a PCH E Nova, da Anglo Gold, localizada no rio do Peixe, PCH Madame Denise, pertencente à Belgo Siderurgia S.A, localizada no rio Taquaraçu e a Hidrelétrica Serra das Agulhas, localizada no rio Pardo Pequeno. Os dados horários de vazões defluentes dessas usinas fornecidos pelas empresas responsáveis são obtidos e armazenados na plataforma SACE.

4.3 Extensão das séries de dados diários das estações utilizadas no Sistema de Alerta

O diagrama de dados é uma forma de visualização da extensão das séries disponíveis, de forma a se avaliar de maneira rápida a disponibilidade de dados em determinado período de tempo numa região ou área específica.

A Figura 13 mostra o diagrama de dados das estações existentes na calha do rio das Velhas e nos rios Itabirito e Paraúna.

4.4 Diagrama unifilar

O diagrama unifilar é uma representação esquemática da posição relativa das estações fluviométricas existentes, cidades e localidades, usinas, captações, assim como da confluência com os diversos tributários e contém também outras informações consideradas relevantes como o sentido do fluxo, código das estações, sua área de contribuição, dentre outros.

A Figura 14 apresenta o diagrama unifilar da bacia do rio das Velhas.



Figura 13 - Diagrama de dados relativo à extensão das séries de cotas nas estações fluviométricas utilizadas no Sistema de Alerta (só mostra a extensão das séries, não mostra os períodos com falhas)

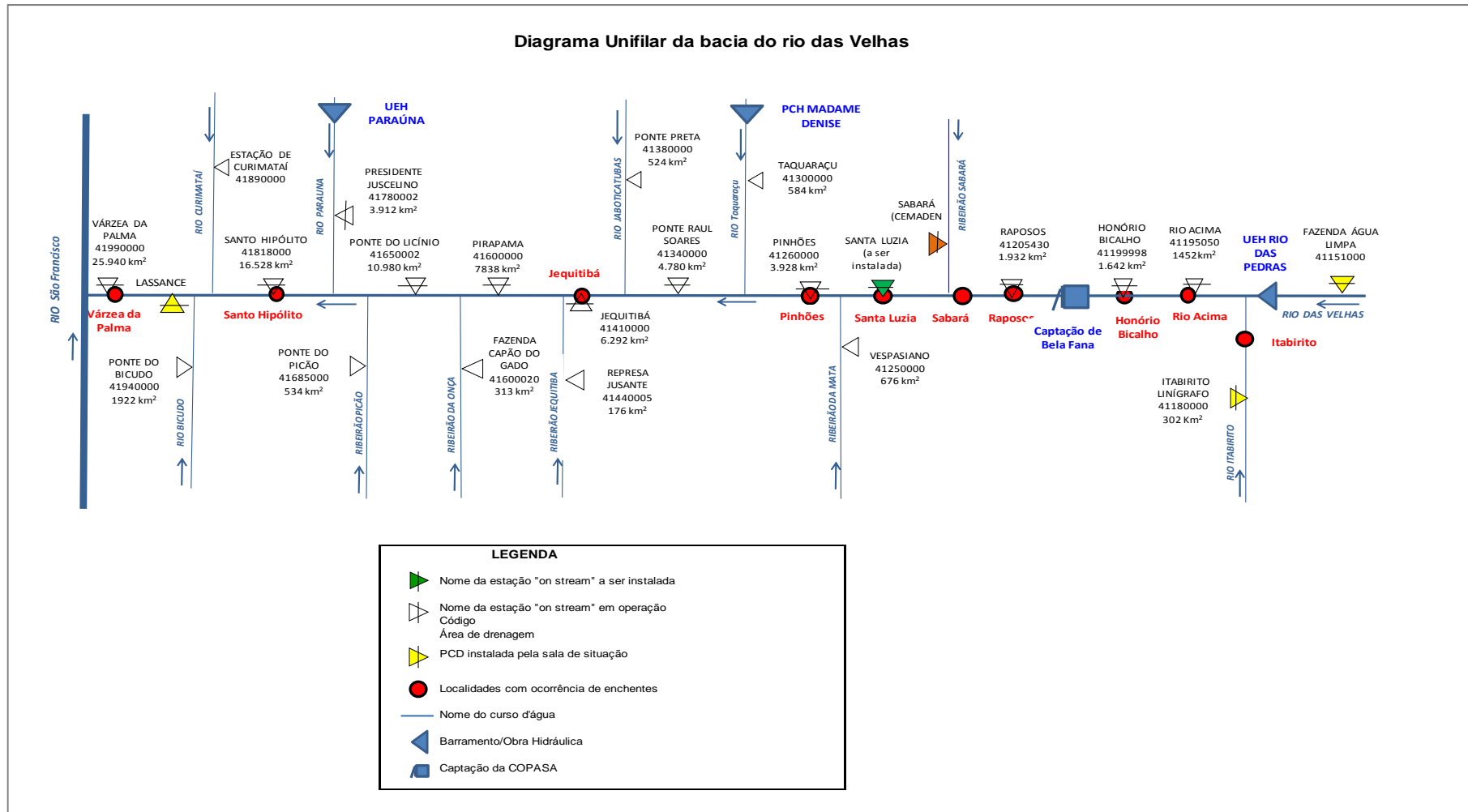


Figura 14 - Diagrama Unifilar da bacia do rio das Velhas

4.5 Traçado e atualização das curvas chave

Visando a elaboração dos modelos de previsão hidrológica, para os quais são necessárias as séries consistidas de vazões, em especial as vazões máximas e considerando que as curvas chave existentes eram muito desatualizadas e apresentavam distorções nos tramos superiores extrapolados, logo no início das atividades do projeto foram traçadas novas curvas chave para toda a série histórica de dados das estações localizadas na calha do rio das Velhas, nos rios Taquaraçu, Paraúna e no ribeirão Itabirito. Essas novas curvas também foram sendo atualizadas ao longo dos três últimos anos, à medida que se dispunha de novas medições, incluindo as medições em cotas altas realizadas no evento de janeiro de 2020.

As novas curvas chave foram definidas ajustando-se, para diversos períodos de validade e determinadas amplitudes, as medições de descarga a uma curva potencial, do tipo:

$$Q = a (h - h_0)^b, \text{ onde:}$$

- Q é a vazão em m³/s;
- h é a cota média diária em metros;
- a, h₀ e b são os parâmetros de ajuste à curva potencial.

Para a extrapolação do ramo alto das curvas foram aplicados os métodos de extrapolação já consagrados, a saber: Stevens, Área x Velocidade, Manning, Conveyance e Logarítmico, e adotado o método que se considerou mais adequado para cada estação. Para o ramo inferior foram adotadas a extrapolação logarítmica, para todos os períodos de validade.

Na aplicação dos métodos de extrapolação foram utilizados os dados de cotas, vazões e velocidades das medições de descarga, sempre associados às características geométricas da seção de réguas, obtidas a partir dos perfis da estação.

O traçado das curvas chave atendeu todas as diretrizes e recomendações estabelecidas pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM, juntamente com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA, quais sejam:

- Alternância entre os desvios positivos e negativos (diferença percentual entre os valores de vazão das medições e os calculados pela curva) ao longo de toda a amplitude das curvas;
- Alternância de desvios positivos e negativos gerados por todas as curvas ao longo de toda a amplitude de cotas observadas;

- Alternância de desvios positivos e negativos de todas as curvas ao longo do tempo, para toda a série histórica.
- Balanço entre a quantidade de desvios positivos e negativos das medições, para cada período de validade das curvas, com variação máxima entre 30 e 70%;
- Convergência das curvas nos tramos superiores extrapolados.

Ressalta-se que as curvas das estações de Rio Acima e Raposos, em função dessas estações terem sido instaladas recentemente e do reduzido número de medições de descarga, em especial em cotas altas, tem caráter preliminar e deverão ser revisadas posteriormente, quando houver mais medições, principalmente nos tramos superiores.

Foram admitidas extrapolações bastante significativas, da ordem de 3 e 4 metros respectivamente, nas estações Fazenda Água Limpa e Itabirito Linígrafo. É fundamental a realização de medições em cotas altas para avaliação das extrapolações adotadas.

No total foram estabelecidas 842 curvas chave/períodos de validade, as quais foram inseridas no banco de dados do projeto, tendo sido geradas vazões e analisadas 632 estações/ano, conforme mostrado na Tabela 02.

Tabela 02: curvas chave geradas e estações-ano analisadas

| Estação | Código | Início | Fim | Estações-ano analisadas | Curvas chave/períodos de validade |
|--------------------------|----------|------------|------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Fazenda Água Limpa | 41151000 | 28/05/1994 | 31/12/2020 | 25,8 | 48 |
| Itabirito Linígrafo | 41180000 | 28/06/1956 | 31/12/2020 | 63,9 | 118 |
| Honório Bicalho Montante | 41199998 | 27/04/1971 | 31/12/2020 | 49,0 | 46 |
| Pinhões | 41260000 | 11/09/1975 | 31/12/2020 | 44,6 | 77 |
| Taquaraçu | 41380000 | 06/10/1938 | 31/12/2020 | 81,5 | 136 |
| Ponte Raul Soares | 41340000 | 12/02/1938 | 31/12/2020 | 82,1 | 40 |
| Ponte Preta | 41380000 | 30/08/1941 | 31/12/2020 | 79,3 | 38 |
| Jequitibá | 41410000 | 24/06/1965 | 31/12/2020 | 54,9 | 65 |
| Pirapama | 41600000 | 02/07/1956 | 31/12/2020 | 63,8 | 61 |
| Ponte do Licínio | 41650002 | 19/12/1976 | 31/12/2020 | 43,6 | 43 |
| Presidente Juscelino | 41780002 | 26/08/1976 | 31/12/2020 | 43,6 | 76 |
| Santo Hipólito | 41818000 | 20/06/1938 | 31/12/2020 | 81,9 | 94 |
| TOTAL | | | | 710,9 | 842 |

Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2020)

4.6 Geração de vazões e análise de consistência dos dados

Foi criado um banco de dados para a bacia do rio das Velhas, em formato HIDRO, contendo todos os dados disponíveis das estações existentes: cotas dupla leitura, cotas médias diárias, resumo de medições de descarga, perfis transversais e, precipitações diárias.

As curvas chave estabelecidas para as estações estudadas foram introduzidas nesse banco, o que permitiu a geração das vazões médias diárias para todas as séries de dados das estações.

Os dados de vazões obtidos para cada estação da calha do rio das Velhas foram plotados em hidrogramas, juntamente com os dados de estações de apoio localizadas a montante e/ou a jusante, de forma a se identificar distorções e incoerências entre os dados.

A Figura 15 apresenta os hidrogramas de vazões médias diárias, em escala logarítmica, para o período de 01/09/2012 a 30/04/2013, como exemplo, de cinco estações da calha do rio das Velhas desde o alto até o baixo curso, quais sejam Honório Bicalho (cód. 41199998), Ponte Raul Soares (cód. 41340000), Jequitibá (cód. 41410000), Ponte do Licínio (cód. 41650002) e Santo Hipólito (cód. 41818000). Observa-se pelos hidrogramas, a similaridade do regime de vazões médias diárias nas diversas estações localizadas no mesmo curso d'água.

Como o objetivo do trabalho era a obtenção das vazões relativas aos eventos de cheia mais significativos ocorridos ao longo do período de dados das estações, a análise de consistência foi direcionada fundamentalmente para esses eventos, cujas durações são de alguns dias. Não foi feita análise de consistência para toda a série de dados, nem o preenchimento de falhas nos dados de cota.

Contudo, inconsistências sistemáticas verificadas nas vazões de pico das estações em relação à de seus apoios, como a ocorrência de incrementais negativos (vazão da estação de montante maior que a vazão da estação de jusante), ou significativa desproporcionalidade nos dados, problemas esses que geralmente decorrem do traçado do ramo alto das curvas chave, foram todos avaliados.

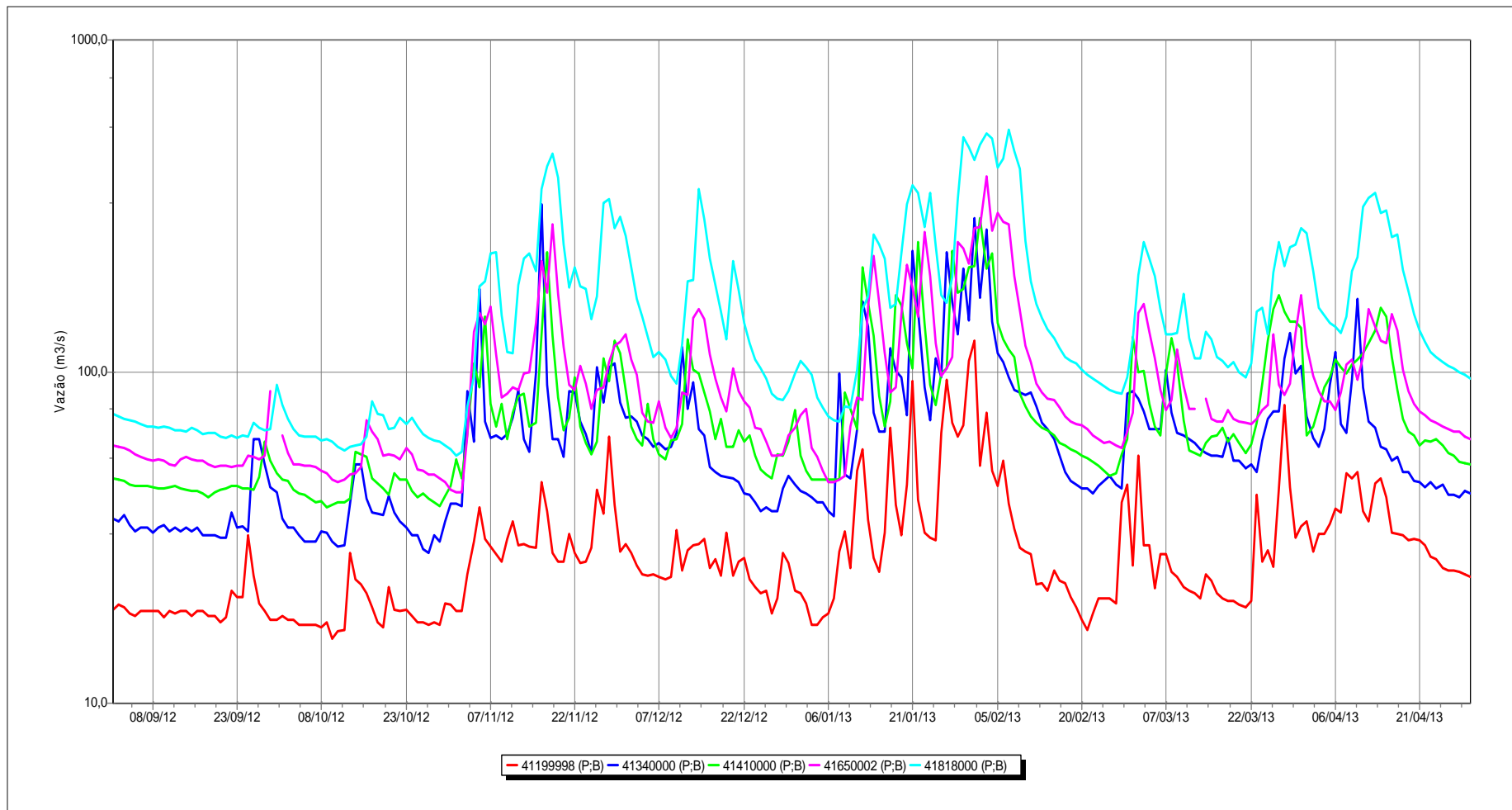


Figura 15 - Hidrograma de vazões médias diárias das estações de Honório Bicalho (cód. 41199998), Ponte Raul Soares (cód. 41340000), Jequitibá (cód. 41410000), Ponte do Licínio (cód. 41650002) e Santo Hipólito (cód. 41818000) no período de 09/2012 a 04/2013.

Nestes casos, as curvas foram revisadas e geradas novas vazões de forma a se obter séries as mais fidedignas possíveis, o que é fundamental para o desenvolvimento dos modelos hidrológicos de previsão vazão x vazão.

No caso dos eventos de cheias, valores pontuais identificados como incoerentes em relação aos observados nas estações de apoio como, por exemplo, erros de metro, foram verificados e caso constatado problema, as respectivas cotas foram corrigidas e as vazões recalculadas. Por outro lado, falhas em cotas em situações de pico de cheia não foram preenchidas devido à grande incerteza associada ao preenchimento.

No caso das cotas horárias das PCDs em operação ao longo do período mais recente (a partir de 2012), as falhas pontuais foram preenchidas.

Ressalta-se que, devido à captação de Bela Fama, localizada na calha do rio das Velhas a jusante das estações de Rio Acima e Honório Bicalho e a montante da estação de Raposos, os hidrogramas das vazões horárias das estações de Rio Acima e Raposos, apresentam clara descontinuidade no regime de vazões, com a ocorrência de incrementais negativos nas mínimas, conforme pode ser observado na Figura 16. Essa descontinuidade é da ordem de grandeza do volume de água captado em Bela Fama.

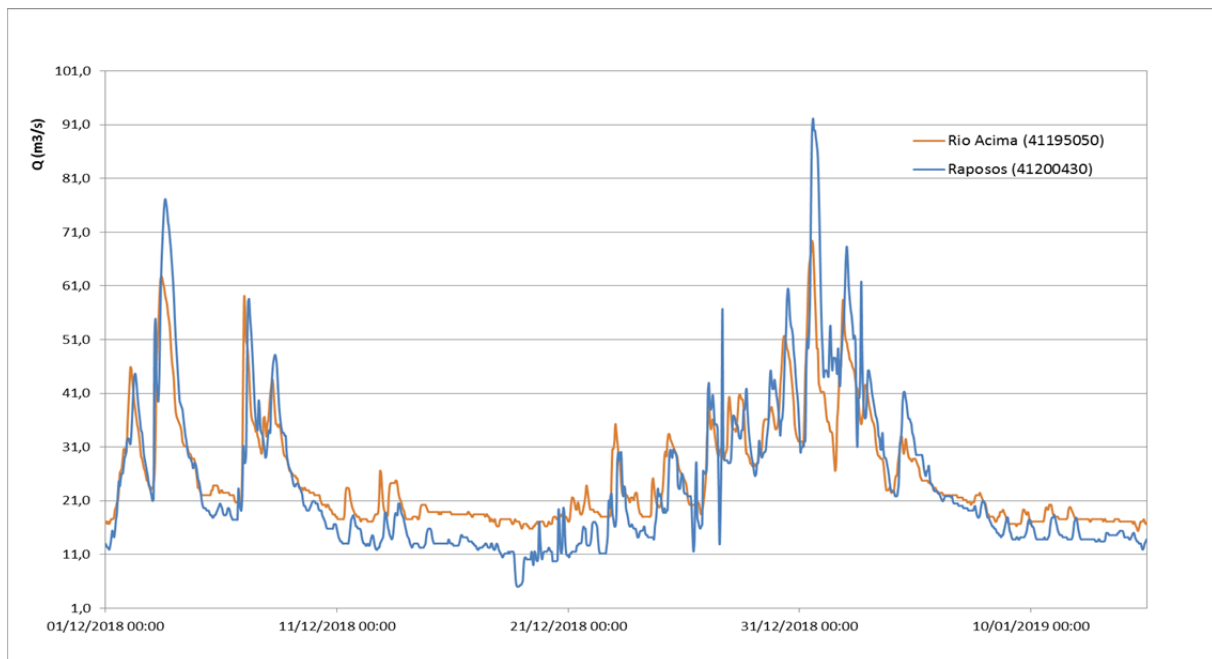


Figura 16 - Descontinuidade nas vazões das estações de Rio Acima e Raposos devido à captação de Bela Fama

Observa-se também que, no caso de grandes cheias, como a que ocorreu recentemente em janeiro de 2020, as vazões de pico da estação Jequitibá são superiores às observadas na estação Ponte do Licínio, muito embora os volumes dos hidrogramas de cheia sejam um pouco inferiores. Tal fato decorre da extensa área de acumulação existente ao longo do trecho do rio entre essas duas estações na situação de cotas altas, com a ocorrência de extensas várzeas que são gradativamente inundadas, o que gera o amortecimento do pico em Ponte do Licínio e o aumento do tempo de traslado da onda de cheia em relação aos tempos verificados em situações de cotas médias e baixas.

Situação semelhante ocorre nos trechos seguintes, em especial entre Ponte do Licínio e Santo Hipólito. Nesse trecho, além das extensas várzeas, foram contabilizadas pelo menos vinte ilhas, que em cotas altas ficam submersas; essas áreas inundáveis geram um incremento significativo na acumulação de água em situações de grandes cheias o que, além de amortecer o pico, aumenta também o tempo de traslado da onda de cheia. Neste caso, contudo, o rio Paraúna, afluente do rio das Velhas cuja confluência ocorre entre as estações Ponte do Licínio e Santo Hipólito, exerce também uma influência significativa nas vazões da estação de Santo Hipólito, podendo, conforme o regime de chuvas na sua bacia, apresentar picos bastante acentuados, mais do que os observados em Ponte do Licínio, que sofre amortecimento devido às planícies inundáveis. O rio Paraúna se estiver com cota alta, pode represar o rio das Velhas, ou ser represado por ele caso o rio das Velhas estiver mais cheio. Essa dinâmica fluvial pode influenciar o pico da cheia em Santo Hipólito.

A Figura 17 mostra os hidrogramas de vazões horárias da cheia de janeiro de 2020, nas estações de Jequitibá, Ponte do Licínio, Presidente Juscelino e Santo Hipólito.

A Figura 18 mostra um segmento do trecho do rio das Velhas entre Ponte do Licínio e Santo Hipólito, com as planícies inundáveis e as várias ilhas e bancos de areia que nas cotas altas são inundados aumentando a área de acumulação.

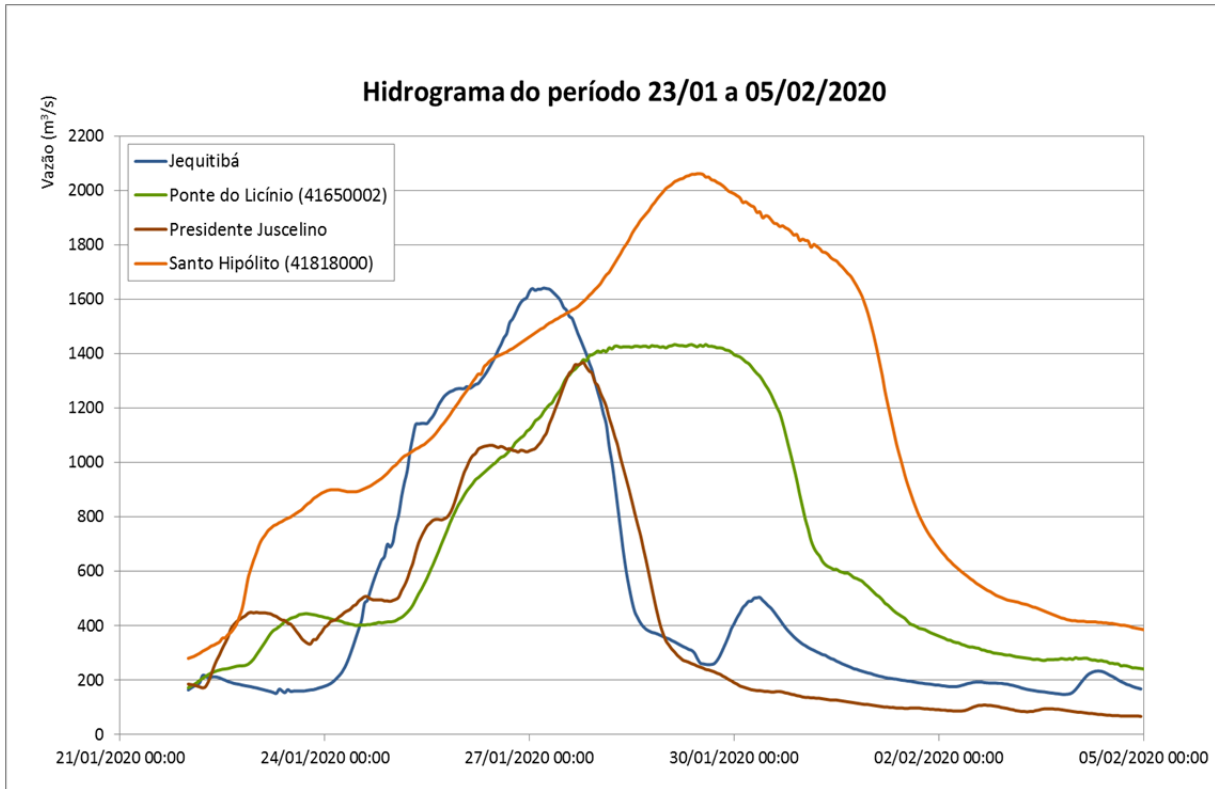


Figura 17 - Comportamento da cheia de janeiro de 2020 nas estações de Jequitibá, Ponte do Licínio, Santo Hipólito (no rio das Velhas) e Presidente Juscelino (no rio Paraúna)

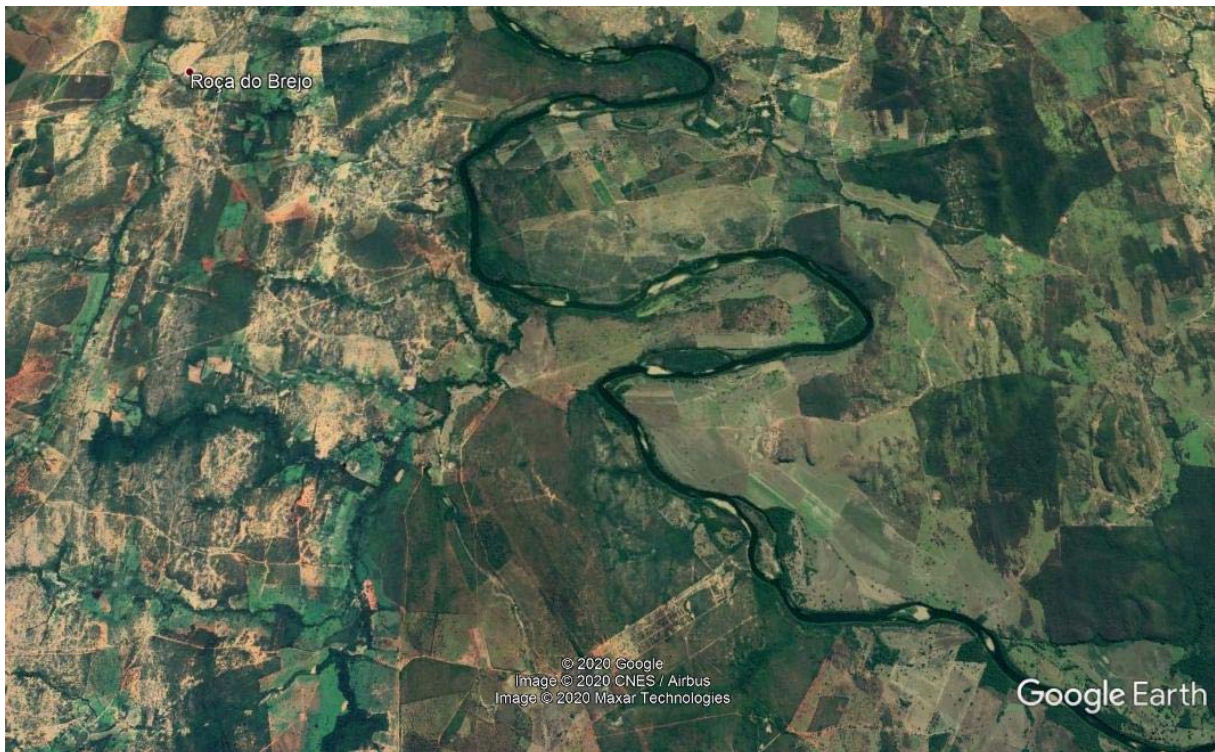


Figura 18 - Ilhas e várzeas no segmento do trecho do rio das Velhas entre Ponte do Licínio e Santo Hipólito (Fonte: Google Earth, 2020)

5. ESTRUTURAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE ALERTA

Para a estruturação e implementação do Sistema de Alerta Hidrológico, foram realizadas as seguintes atividades e efetuados os seguintes estudos preliminares:

5.1 Viagem de reconhecimento de campo

Foi realizada uma viagem de reconhecimento à bacia, tendo sido visitadas todas as cidades e localidades existentes às margens do rio das Velhas e as estações hidrométricas em operação na bacia. Foi feito um primeiro contato com as Prefeituras Municipais e com as Defesas Civas dos municípios, de forma se obter informações confiáveis sobre a ocorrência de cheias no município e conhecer “in loco” os problemas específicos de cada localidade. As informações levantadas permitiram avaliar de forma preliminar quais cidades poderiam ser atendidas pelo Sistema De Alerta e se as estações hidrometeorológicas existentes eram suficientes para a operação do Sistema.

5.2 Levantamento das cidades/localidades afetadas pelas enchentes

As cidades/localidades relacionadas a seguir situam-se às margens do rio das Velhas e são afetadas pelas suas enchentes:

- Região do Alto rio das Velhas: Rio Acima; localidade de Santa Rita e Distrito de Honório Bicalho (ambos pertencentes ao município de Nova Lima); Raposos e Sabará.
- Região do Médio rio das Velhas: Santa Luzia (centro e bairros ribeirinhos, incluindo o distrito de Pinhões) e Jequitibá.
- Região do Baixo Velhas: Santo Hipólito e Várzea da Palma.

A Figura 19 mostra registros das enchentes de 1997 a 2020 em algumas dessas localidades.

Cabe ressaltar que as cidades de Itabirito, Caeté, Raposos, Sabará, Belo Horizonte, Contagem, Santa Luzia, Pedro Leopoldo, Vespasiano e Presidente Juscelino também sofrem os efeitos de alagamentos resultantes do transbordamento de ribeirões urbanos, todos eles afluentes do rio das Velhas. São eles os ribeirões Itabirito, Caeté, da Prata, Sabará, Arrudas, Onça, Vilarinho, da Mata e rio Paraúna, dentre outros. Entretanto, esses cursos d’água apresentam um tempo de resposta

muito rápido às precipitações incidentes em suas áreas de influência, o que impede que o sistema de alerta seja aplicado nessas condições. Nesses casos deverão ser tomadas outras medidas, estruturais ou não, de forma a mitigar os efeitos das cheias urbanas.



Honório Bicalho - 1997



Raposos - 2020



Sabará - bairro Paciência - 1997



Santa Luzia - 2020



Jequitibá - 1997



Santo Hipólito - 2020

Figura 19 - Registros de enchentes nas cidades às margens do rio das Velhas

Portanto, a concepção do Sistema de Alerta do rio das Velhas tem como premissas básicas:

- I. Atendimento às cidades e localidades situadas às margens do próprio rio e somente nos casos de **enchentes e transbordamento exclusivamente na calha do rio das Velhas.**
- II. O tempo de previsão hidrológica deve ser minimamente o suficiente para que os órgãos gestores municipais, estaduais e a Defesa Civil possam atuar em prol das populações a serem atingidas.

5.3 Definição das cidades a serem atendidas pelo Sistema de Alerta

O Sistema de Alerta do Rio das Velhas está sendo implementado em etapas, sendo que na primeira etapa o sistema foi estruturado para atender as cidades de Jequitibá e Santo Hipólito, localizadas no médio e baixo rio das Velhas, respectivamente.

A adoção dessas duas cidades para essa primeira etapa do sistema deve-se a três fatores: o primeiro deles é que tanto em Jequitibá quanto em Santo Hipólito existem estações telemétricas já instaladas e em operação pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

O segundo fator é que também existem estações telemétricas a montante dessas cidades, tanto na calha do rio das Velhas como no rio Paraúna, o que permite o desenvolvimento e a utilização de modelos de previsão hidrológica.

O terceiro fator, não menos importante, é que o tempo de traslado da onda de cheia entre as estações de montante e essas cidades é maior, para ambas, do que aqueles tempos verificados nas localidades às margens do Alto Velhas. Como só se dispõe de séries diárias, com leitura do observador às 07h e às 17h para todo o período anterior a 2012 e as séries telemétricas horárias disponíveis entre 2012 e 2018 apresentam muitas falhas e algumas inconsistências, o desenvolvimento de modelos vazão x vazão com os dados disponíveis apresentam melhores resultados para as localidades em que os tempos de traslado são maiores do que 12 horas. À medida que se disponha de dados telemétricos que descrevam de forma mais detalhada o comportamento dos hidrogramas dos eventos de cheias de maior escala, esses modelos deverão ser atualizados e otimizados.

Numa segunda etapa o sistema será estendido para a cidade de Várzea da Palma; posteriormente para a Santa Luzia e, caso se certifique que o tempo de

previsão dos modelos vazão x vazão tenha antecedência adequada à tomada de medidas mitigadoras para os efeitos das enchentes, também para as cidades de Sabará e Raposos.

No caso da cidade de Rio Acima e das localidades de Santa Rita e Honório Bicalho, essas áreas urbanas estão localizadas no Alto Velhas, bastante próximas às cabeceiras da bacia, o que inviabiliza a utilização de modelos vazão x vazão para a previsão hidrológica, uma vez que o tempo de deslocamento da onda de cheia é muito curto nesses casos. Contudo, posteriormente, poderá ser avaliada a utilização de modelos chuva x vazão para a realização das previsões, caso se verifique que os tempos de previsão tenham uma antecedência mínima necessária para que os órgãos gestores e Defesa Civil possam tomar medidas protetivas nessas localidades.

De qualquer forma, as estações telemétricas de Rio Acima e Honório Bicalho são fundamentais para o acompanhamento das ondas de cheia e para a previsão hidrológica nas diversas localidades mais a jusante.

5.4 Avaliação da rede hidrometeorológica existente e da necessidade de sua adequação ao sistema de alerta

A rede de monitoramento existente na bacia do rio das Velhas à época do início do projeto já era bastante densa, apresentando várias estações telemétricas com transmissão de dados de chuva e nível, o que facilitou bastante os trabalhos de planejamento da rede necessária para o sistema de alerta.

As estações telemétricas existentes no ano de 2015 e os tipos de transmissão eram os apresentados na Tabela 03.

As estações pluviométricas com equipamentos de registro do tipo Agsolve não transmitem dados, apenas armazenam os registros que são coletados quando das visitas de manutenção da estação.

Tabela 03: PCDs existentes na bacia à época do início da implementação do Sistema de Alerta

| PCDs existentes na bacia do rio das Velhas no ano de 2015 | | | | | |
|---|-----------|--------------------------------|----------|----------|--|
| CodigoFLU | CodigoPLU | NOME | Lat | Long | PCDs ANA instaladas – tipo transmissão |
| 41199998 | - | Honório Bicalho - Montante | -20,0239 | -43,8228 | HIDROMECC (chuva, nível_GPRS) |
| 41260000 | - | Pinhões | -19,7050 | -43,8147 | HIDROMECC (chuva, nível_GPRS) |
| 41340000 | 1943049 | Ponte Raul Soares | -19,5597 | -43,9111 | HIDROMECC (chuva, nível_GPRS) |
| 41410000 | - | Jequitibá | -19,2311 | -44,0247 | HIDROMECC (chuva, nível_GPRS) |
| 41600000 | 1944020 | Pirapama | -19,0111 | -44,0383 | HIDROMECC (chuva, nível_GPRS) |
| 41650002 | 1844010 | Ponte do Licínio - jusante | -18,6725 | -44,1936 | HIDROMECC (chuva, nível_GPRS) |
| 41780002 | 1844009 | Presidente Juscelino - Jusante | -18,6450 | -44,0506 | HIDROMECC (chuva, nível_GPRS) |
| 41818000 | 1844001 | Santo Hipólito (ANEEL/CEMIG) | -18,3061 | -44,2258 | HIDROMECC (chuva, nível_GPRS) |
| - | 1844019 | Morro da Garça | -18,5431 | -44,6008 | AGSOLVE (chuva, temperatura, umidade) |
| - | 1843002 | Gouveia | -18,4656 | -43,7431 | AGSOLVE (chuva, temperatura, umidade) |
| - | 2043002 | Lagoa Grande (MMV) | -20,1792 | -43,9428 | AGSOLVE (chuva, temperatura, umidade) |

Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2020)

Ressalta-se que todas as PCDs de nível existentes utilizavam sensores de pressão para a leitura dos níveis e sistema de transmissão do tipo GPRS, via telefonia celular. Essas estações, já no decorrer do ano de 2017, pararam de transmitir os dados de nível, em função da incompatibilidade dos modems fornecidos pelo fabricante com os planos de telefonia celular. Os sensores de pressão também vinham apresentando problemas recorrentes, necessitando de manutenção e substituição; dessa forma, já em 2018, nenhuma das estações telemétricas na bacia estava registrando nem transmitindo os dados de níveis.

Portanto, verificou-se a necessidade de uma reestruturação da rede telemétrica na bacia, incluindo não somente a substituição de PCDs em algumas estações, em especial nos locais para os quais seria realizada previsão de níveis e também onde os dados seriam utilizados para a realização das previsões, como também a instalação de outras em locais que não contavam com rede telemétrica, principalmente na região do Alto Velhas.

5.5 Instalação de estações telemétricas

Para atender a primeira etapa de operação do Sistema de Alerta, as PCDs de Ponte Raul Soares, Jequitibá e Ponte do Licínio foram substituídas por outras PCDs adquiridas pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM para integrar o Sistema de Alerta. Nas estações de Santo Hipólito e Presidente Juscelino, foram instaladas PCDs fornecidas pela ANA. Essas substituições ocorreram no decorrer do ano de 2018.

Além dessas, o Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM, por meio do convênio tripartite ANA – CPRM – IGAM, firmado para a estruturação da Sala de Situação do Estado de Minas Gerais, instalou, ao longo do ano de 2017, PCDs nas estações de Fazenda Água Limpa (estação mais a montante da bacia, localizada próximo às cabeceiras do rio das Velhas), Itabirito Linígrafo, localizada no rio Itabirito, a montante da cidade de Itabirito e Lassance (entre Santo Hipólito e Várzea da Palma).

Considerando que praticamente todas as cidades localizadas no Alto Velhas são atingidas por eventos de cheias e não contavam até então com estações telemétricas voltadas especificamente para o atendimento do Sistema de Alerta, foram instaladas PCDs nas cidades de Rio Acima e Raposos, com vistas a aquisição de dados de níveis que poderão ser utilizados tanto na previsão das localidades a

jusante, quanto no desenvolvimento de modelos para essas cidades em etapas futuras do projeto.

A Figura 20 mostra as estações fluviométricas/telemétricas instaladas nas cidades de Rio Acima e Raposos.



Figura 20 - Réguas e PCD instaladas em Rio Acima (à esquerda) e Raposos (à direita)

Está prevista também a instalação de uma nova PCD com sensor de radar numa das pontes sobre o rio das Velhas existentes na cidade de Santa Luzia e na Estação de Ponte Preta, no rio Jaboticatubas.

5.6 Levantamento em campo das cotas de alerta e inundação

Essa atividade foi realizada em duas etapas. Na primeira etapa, a equipe técnica em campo realizou a marcação física dos pontos que seriam utilizados como referência para o levantamento das cotas de alerta e inundação. Em todas as cidades visitadas, foram identificadas as edificações com ocupação (residências, estabelecimentos comerciais ou escritórios), que pudessem ser atingidos e sofrer danos materiais quando da ocorrência de cheias no rio das Velhas. Normalmente as marcações foram efetuadas com tinta em soleiras das portas de entrada ou nos

acessos para as áreas de serviço das casas ou estabelecimentos, (ou em paredes, muros próximos, mantendo-se a mesma cota das soleiras), sempre objetivando a identificação e o levantamento dos níveis a partir dos quais a ocupação dos espaços edificados trariam prejuízos aos moradores/ocupantes.

Esses pontos foram todos fotografados, foram levantadas suas coordenadas e anotados os locais de referência para que a equipe de nivelamento pudesse identificá-los posteriormente, com precisão. Todos eles foram lançados num formulário que foi entregue para a equipe de nivelamento.

Essa marcação foi realizada nas cidades de Rio Acima, na localidade de Santa Rita, em Honório Bicalho, Raposos, no Bairro da Paciência em Sabará, em diversos bairros de Santa Luzia localizados às margens do rio das Velhas, no distrito de Pinhões e na cidade de Santo Hipólito.


No caso da cidade de Jequitibá, como há alguns anos atrás, após os prejuízos causados pela enchente de 1979, foi construído um extenso dique de proteção contra inundações margeando a cidade ao longo do rio das Velhas, o ponto de referência para a definição da cota de inundação foi o topo do dique.

A Tabela 04 apresenta como exemplo do formulário preenchido, os pontos levantados na localidade de Honório Bicalho.

A Figura 21 mostra as fotos de algumas das marcações efetuadas junto a algumas casas da cidade de Santo Hipólito e do topo e base do dique de Jequitibá.

Na segunda etapa do trabalho, a equipe de campo realizou, no ano de 2017, o levantamento das cotas dos pontos predeterminados, considerando-se como referência a cota do zero da régua da estação. Como na primeira etapa de operação do sistema apenas as cidades de Jequitibá e Santo Hipólito seriam atendidas, esse levantamento foi realizado priorizando nessas cidades. Assim sendo, foram inicialmente definidas as cotas de alerta e inundação para as cidades de Jequitibá e Santo Hipólito, apresentadas na Tabela 05.

Tabela 04 – Formulário de marcação dos pontos verificados “in loco” para o levantamento das cotas de inundação

|  SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM | | LEVANTAMENTO DAS COTAS DE INUNDAÇÃO | | | | |
|---|---------------------------------|--|-------------------------|--------------------------|--|--|
| | | Estação: HONÓRIO BICALHO | | | Código: 41199998 | |
| | | Município: NOVA LIMA | | | Roteiro: 2 | |
| | | Rio: DAS VELHAS | | | Data do levantamento: 13/05/2016 – COTA NO DIA: 1,96m | |
| | | Equipe: Frederico, Letícia e Oscar Martinelli | | | | |
| PONTO | COORDENADAS (DATUM WGS84) | Nº FOTO | IDENT. PINTURA (S/N) | TIPO DO PONTO MARCADO | ALTURA ATINGIDA DO SOLO(m) | OBSERVAÇÕES |
| P1 | 20°01,504' | 65, 66 | Tinta vermelha | Cota de inundação | - | Entrada da residência da Sra. Adriana, em frente ao rio e à direita da estação de réguas. Rua General Andrade, número 23 |
| | 43°49,408' | | | | | |
| P2 | 20°01,415' | 67, 68 | Tinta vermelha | Cota de inundação | - | Coluna de madeira da casa situada à rua Braga, 143 (rua que margeia o rio das Velhas, margem direita) |
| | 43°49,622' | | | | | |
| P3 | 20° 01,331' | 69, 70 | Tinta vermelha | Cota de inundação | - | Muro externo da casa situada na Avenida Natalício de Jesus Carsalarde, 580B (margem direita) |
| | 43°49,790' | | | | | |
| - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - |



Marcação próximo a residências da cidade de Santo Hipólito



Topo e dreno de pé do dique da cidade de Jequitibá

Figura 21 - Pontos marcados para levantamento das cotas de inundação

Tabela 05: Cotas de alerta e inundação das cidades de Jequitibá e Santo Hipólito até 2020

| Primeiro levantamento das cotas de referência realizado em 2017 | | | | | |
|---|----------------------|---------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Cidade | Cota de Atenção (cm) | Cota de Alerta (cm) | Cota de inundação (cm) | Referência | Observação |
| Jequitibá | 890 | 990 | 1190 | Topo do dique | Cota do topo do dique |
| Santo Hipólito | 700 | 800 | 900 | Entrada da residência | Cota da soleira da porta de entrada |

Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2020)

Em outubro de 2020, as equipes de campo fizeram um novo levantamento nas cidades de Jequitibá e Santo Hipólito de forma a verificar se ocorreram alterações nas cotas de referência, em função tanto da cheia de janeiro de 2020 quanto devido à construção de novas edificações nas margens do rio.

A partir desse novo levantamento, verificou-se uma alteração na cota do topo do dique de Jequitibá em relação ao levantamento anterior, talvez devido à cheia de 2020 que gerou a transposição do dique pelas águas. Verificou-se também a existência de uma edificação localizada próximo às margens do rio das Velhas em

Santo Hipólito cuja cota da soleira de entrada é mais baixa que a cota de inundação definida anteriormente. Desta forma, foram adotadas as cotas de referência para as cidades de Jequitibá e Santo Hipólito mostradas na Tabela 06, válidas a partir da operação do sistema de alerta 2020/2021.

Tabela 06: Novas cotas de referência em Jequitibá e Santo Hipólito levantadas em outubro de 2020

| Cotas de referência atualizadas em 2020 | | | | | |
|---|----------------------|---------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Cidade | Cota de Atenção (cm) | Cota de Alerta (cm) | Cota de inundação (cm) | Referência | Observação |
| Jequitibá | 900 | 1000 | 1180 | Topo do dique | Cota do topo do dique |
| Santo Hipólito | 540 | 640 | 745 | Entrada da residência | Cota da soleira da porta de entrada |

Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2020)

6. MODELOS DE PREVISÃO HIDROLÓGICA

Os modelos hidrológicos utilizados para a previsão de vazão nas cidades de Jequitibá e Santo Hipólito são modelos empíricos baseados na propagação do escoamento ao longo da calha do rio das Velhas.

Tais modelos utilizam relações matemáticas estabelecidas a partir dos dados de vazão de estações telemétricas localizadas a montante das cidades onde se farão as previsões e das próprias estações existentes nessas mesmas localidades, de forma a estimar as vazões com uma antecedência pré-definida, determinada a partir do tempo de viagem da onda de cheia entre essas estações, que por sua vez é obtido dos eventos de cheia já ocorridos na bacia. Não são utilizadas quaisquer outras variáveis hidrológicas ou processos físicos nessa estimativa, além dos dados de vazão e do tempo de viagem da onda de cheia.

Esses modelos empíricos geralmente apresentam erros de previsão menores que os modelos conceituais que utilizam outras variáveis hidrológicas intervenientes, como os modelos chuva-vazão.

Ao longo do desenvolvimento dos modelos, foram avaliados modelos lineares com parcela auto regressiva e modelos empíricos estabelecidos pelo método das diferenças, também com parcela auto regressiva.

Os modelos lineares de propagação são estabelecidos por correlação entre os dados de vazão e utilizam a seguinte equação:

$$Q_{(t+\tau)} = a.I_t + b.Q_t + c, \text{ onde:}$$

- $Q_{(t+\tau)}$ é a vazão de saída no trecho no tempo $t + \tau$;
- Q_t é vazão de saída no trecho no tempo t ;
- I_t é vazão de entrada no trecho no tempo t .
- Os parâmetros a , b , c são estabelecidos utilizando-se o método dos mínimos quadrados.

Com relação ao método das diferenças, ele também é um modelo empírico que efetua a previsão de vazão por propagação do escoamento e utiliza uma equação linear múltipla considerando as diferenças das variáveis envolvidas, no caso, as vazões.

Ou seja, o termo dependente é a diferença entre a vazão na antecedência desejada ($t + \tau$) e a observada no tempo t onde se quer fazer a previsão, enquanto os termos independentes são as diferenças das vazões entre o tempo t e o tempo $(t - \tau)$ em seções a montante.

A equação apresenta a seguinte forma:

$$\Delta Q_{(t+\tau)} = a_1 \Delta I_t^1 + a_2 \Delta I_t^2 + a_3 \Delta I_t^3 + \dots + b \Delta Q_t, \text{ onde:}$$

- $\Delta Q_{(t+\tau)}$ é a variação de vazão entre os tempos t e $t + \tau$ da saída;
- ΔQ_t é a variação de vazão entre os tempos $(t - \tau)$ e t da saída;
- ΔI_t^i é a variação de vazão entre os tempos $(t - \tau)$ e t da entrada de montante i

Para a previsão de Jequitibá foram utilizados inicialmente os dados das estações Ponte Raul Soares e Jequitibá. Como os modelos iniciais de previsão considerando apenas essas duas estações não apresentaram resultados muito satisfatórios, mais recentemente optou-se por introduzir os dados da estação de Ponte Preta, localizada no rio Jaboticatubas, afluente do rio das Velhas pela margem direita, cuja confluência ocorre cerca de 30 km a jusante da estação Ponte Raul Soares. Essa estação não é telemétrica e os dados de cota das 07:00 e 17:00h serão informados diariamente, por telefone ou aplicativo de mensagens, pela observadora da estação. Caso não seja possível o envio dos dados por algum motivo, será utilizado um modelo de previsão alternativo, menos preciso, considerando apenas as demais estações.

Para a previsão em Santo Hipólito foram usadas as estações de Ponte do Licínio, situada no rio das Velhas a montante de Santo Hipólito; Presidente Juscelino, no rio Paraúna e da própria estação de Santo Hipólito.

6.1 Eventos utilizados para a modelagem hidrológica

Para o desenvolvimento dos modelos, foram analisados os hidrogramas das estações acima relacionadas para toda a série histórica disponível, identificando todos os eventos de cheia mais significativos que apresentavam dados de vazão sem nenhuma falha durante toda a ascensão do hidrograma.

Os maiores eventos verificados na bacia ao longo de todo o período de dados históricos foram os ocorridos nos anos de 1979 e 1997 e 2020; infelizmente, não se dispõe de dados para toda a duração dos eventos e 1979 e 1997, uma vez que as régua linimétrica foram arrancadas pela enchente, o que impediu a utilização dos dados para a calibração dos modelos vazão x vazão. Desta forma, foram utilizados os demais eventos disponíveis, todos eles de magnitude muito menor quando comparados com os eventos de 1979 e 1997. O evento de janeiro de 2020 é o de maior magnitude com dados horários disponíveis.

Para a previsão em Jequitibá foram considerados os eventos relacionados na Tabela 07. Ressalta-se que, a menos dos eventos mais recentes, a partir de 2016, que possuem registros de cotas das PCDs de 01 em 01 hora para Ponte Raul Soares e Jequitibá, todos os demais eventos contam apenas com os dados de dupla leitura, ou seja, as cotas das 07:00 e 17:00hs lidas pelo observador. Dessa forma, para os eventos anteriores a 2016, e todos os relativos à estação de Ponte Preta, que é convencional, os dados de dupla leitura foram interpolados e discretizados em intervalos de uma em uma hora, de forma a permitir a calibração do modelo de previsão a partir dos dados disponíveis.

No caso de Santo Hipólito, na calibração do modelo de previsão foram considerados os eventos apresentados na Tabela 08. Os eventos de 2012, 2016 e 2020 são os registrados nas PCDs e possuem dados horários em pelo menos uma estação; os eventos anteriores a 2012 contam apenas com os dados de dupla leitura, que para serem utilizados na modelagem foram discretizados de uma em uma hora.

Tabela 07: Eventos utilizados para calibração do modelo de previsão para Jequitibá

| Evento | Período | Ponte Raul Soares | | Ponte Preta | | Jequitibá | |
|--------|----------------------------|---|-------|---|-------|---|-------|
| | | Q _{max} (m ³ /s) | Dia | Q _{max} (m ³ /s) | Dia | Q _{max} (m ³ /s) | Dia |
| 1 | 10 a 22/01/1991 | 928 | 18/01 | 177 | 18/01 | 1065 | 19/01 |
| 2 | 13 a 19/01/1992 | 947 | 15/01 | 186 | 15/01 | 1124 | 16/01 |
| 3 | 02 a 09/02/1992 | 827 | 04/02 | 106 | 04/02 | 986 | 05/02 |
| 4 | 16 a 21/01/2003 | 1177 | 17/01 | 190 | 18/01 | 1380 | 19/01 |
| 5 | 28/12/2011 a 07/01/2012 | 1066 | 03/01 | 181 | 03/01 | 1274 | 04/01 |
| 6 | 15 a 22/01/2016 | 815 | 18/01 | 218 | 18/01 | 1021 | 19/01 |
| 7 | 23 a 28/01/2020 | 1482 | 26/01 | 286 | 25/01 | 1641 | 27/01 |
| 8 | 21 a 24/03/2020 | 740 | 21/03 | 70 | 22/03 | 785 | 22/03 |

Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2020)

Tabela 08: Eventos utilizados para calibração do modelo de previsão para Santo Hipólito

| Evento | Período | Ponte do Licínio | | Pres. Juscelino | | Santo Hipólito | |
|--------|----------------------------|---|-------|---|-------|---|-------|
| | | Q _{max} (m ³ /s) | Dia | Q _{max} (m ³ /s) | Dia | Q _{max} (m ³ /s) | Dia |
| 1 | 10 a 24/01/1991 | 1039 | 21/01 | 808 | 18/01 | 1492 | 19/01 |
| 2 | 21 a 27/03/1991 | 1022 | 25/03 | 1376 | 25/03 | 1549 | 26/03 |
| 3 | 03 a 09/02/1992 | 1095 | 07/02 | 1075 | 06/02 | 1978 | 07/02 |
| 4 | 24/12/1995 a 04/01/1996 | 1357 | 31/12 | 785 | 30/12 | 1910 | 31/12 |
| 5 | 28/12/2011 a 12/01/2012 | 1129 | 07/01 | 1126 | 07/01 | 2102 | 10/01 |
| 6 | 15 a 24/01/2016 | 984 | 21/01 | 1457 | 21/01 | 1770 | 23/01 |
| 7 | 26 a 30/01/2020 | 1430 | 28/01 | 1584 | 27/01 | 2062 | 29/01 |
| 8 | 04 a 09/3/2020 | 991 | 06/03 | 519 | 06/03 | 1472 | 07/03 |
| 9 | 22 a 27/03/2020 | 902 | 24/03 | 536 | 23/03 | 1204 | 24/03 |

Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2020)

6.2 - Estimativa dos tempos de viagem

A estimativa correta dos tempos de viagem entre as diversas estações, assim como dos tempos de translado da onda de cheia nos eventos críticos, é fundamental para a definição e calibração de um bom modelo de previsão hidrológica.

Para o modelo de Jequitibá, é necessário conhecer os tempos de translado entre as estações de Ponte Raul Soares e Jequitibá e entre Ponte Preta e Jequitibá. Já para o modelo de previsão de Santo Hipólito, são necessários os tempos de translado entre Ponte do Licínio e Santo Hipólito e também Presidente Juscelino e Santo Hipólito.

Para uma primeira estimativa dos tempos de viagem ao longo do rio das Velhas, foram calculados, para cada estação fluviométrica localizada na sua calha principal e no rio Itabirito, de forma preliminar, os tempos de concentração da bacia de contribuição, obtendo-se, por diferença, os tempos de translado entre as diversas estações. Para tal, foi utilizada a fórmula empírica de Kirpich, dada por:

$$tc = 57 (L^3/H)^{0,385}, \text{ onde}$$

- tc é o tempo de concentração em minutos;
- L é o comprimento da bacia em km, medido ao longo do curso d'água a partir da exutória até o ponto mais elevado da bacia;
- H é o desnível entre a cabeceira e a exutória, em metros.

Os valores de altitude e comprimentos dos cursos d'água utilizados foram obtidos através do modelo digital de terreno estabelecido para a bacia hidrográfica do rio das Velhas.

Outra estimativa inicial dos tempos de viagem foi efetuada utilizando-se as velocidades das medições de descarga líquida realizadas em cotas altas, em cada estação, utilizando-se também os comprimentos do curso d'água. Essa estimativa resultou em valores similares aos tempos de concentração obtidos, com algumas variações em determinadas estações. Os valores obtidos por essas metodologias estão apresentados na Tabela 09.

Tabela 09: Estimativa dos tempos de concentração e de viagem das diversas estações da bacia do rio das Velhas

| Estação | Código | Cota nascente (m) | Cota estação (m) | Comprimento talvegue (Km) | Declividade média (%) | Tempo de concentração (min) | Tempo de concentração (h) | Tempo de concentração (dias) | Velocidade máxima medida (m/s) | Tempo de viagem (h) |
|---------------------|----------|-------------------|------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| Fazenda Água Limpa | 41151000 | 1562,2 | 956,2 | 22,79 | 2,66 | 179 | 3,0 | - | 1,60 | 4,0 |
| Itabirito Linógrafo | 41180000 | 1458,4 | 884,1 | 42,00 | 1,37 | 370 | 6,2 | - | 1,06 | - |
| Honório Bicalho | 41199998 | 1458,4 | 732,0 | 83,30 | 0,87 | 746 | 12,4 | - | 1,56 | 14,8 |
| Pinhões | 41260000 | 1458,4 | 665,3 | 145,40 | 0,55 | 1372 | 22,9 | - | 1,68 | 24,0 |
| Ponte Raul Soares | 41340000 | 1458,4 | 650,0 | 186,00 | 0,43 | 1810 | 30,2 | 1,3 | 1,68 | 30,8 |
| Jequitibá | 41410000 | 1458,4 | 624,1 | 267,20 | 0,31 | 2717 | 45,3 | 1,9 | 1,59 | 46,7 |
| Pirapama | 41600000 | 1458,4 | 584,2 | 335,8 | 0,26 | 3475 | 57,9 | 2,4 | 1,44 | 64,8 |
| Ponte do Licínio | 41650002 | 1458,4 | 548,8 | 445,2 | 0,20 | 4740 | 79,0 | 3,3 | 1,51 | 81,9 |
| Santo Hipólito | 41818000 | 1458,4 | 527,7 | 537,5 | 0,17 | 5841 | 97,3 | 4,1 | 1,56 | 95,7 |
| Várzea da Palma | 41990000 | 1458,4 | 492,3 | 680,8 | 0,14 | 7564 | 126,1 | 5,3 | 1,84 | 102,8 |

Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2020)

Foram também verificados os tempos entre picos das estações Ponte Raul Soares – Jequitibá; Ponte Preta – Jequitibá; Ponte do Licínio – Santo Hipólito e Presidente Juscelino - Santo Hipólito, a partir dos hidrogramas dos diversos eventos selecionados para modelagem. Observou-se, contudo, uma variação significativa nos tempos entre um evento e outro, o que sugere que questões como a distribuição espacial e temporal das chuvas na bacia e a magnitude do evento exercem muita influência nos tempos de viagem das ondas de cheia.

Os melhores resultados foram obtidos a partir da análise dos hidrogramas horários dos períodos chuvosos mais recentes, aplicando-se, por tentativa e erro, várias tempos de defasagem em horas entre as estações intervenientes de forma a se obter o melhor alinhamento para a maior parte dos picos no período analisado. Para esses tempos, assim como para os imediatamente anteriores e posteriores, em horas, foi feita uma análise de regressão linear entre as vazões das respectivas estações explicativas e a estação preditiva, adotando-se o tempo que apresentou o maior índice de correlação.

A Figura 22 mostra os hidrogramas horários defasados para o período de 22 de janeiro a 20 de abril de 2020, com os dados das estações Ponte Raul Soares, Ponte Preta e Jequitibá. Nesses hidrogramas foram aplicadas as defasagens de 17 horas de Ponte Raul Soares para Jequitibá e 12 horas de Ponte Preta para Jequitibá.

Da mesma forma, a Figura 23 mostra os hidrogramas horários defasados para o período de 22 de janeiro a 30 de março de 2020, com os dados das estações Ponte do Licínio, Presidente Juscelino e Santo Hipólito. Nesses hidrogramas foram aplicadas as defasagens de 18 horas de Ponte do Licínio para Santo Hipólito e 14 horas de Presidente Juscelino para Santo Hipólito.

É interessante ressaltar que, quando a maioria dos picos se apresentava alinhada, os picos relativos a eventos de maior magnitude não se alinhavam. Isso sugere um período de translado mais longo para eventos maiores, o que pode ser explicado pela dinâmica de propagação das ondas de cheia de maior magnitude, quando ocorre uma maior ocupação das várzeas e das ilhas fluviais,

áreas nas quais o número de manning é geralmente maior; além disso, essa ocupação gera fluxos de velocidades transversais além do fluxo principal, o que resulta num aumento dos tempos de translado de forma geral.

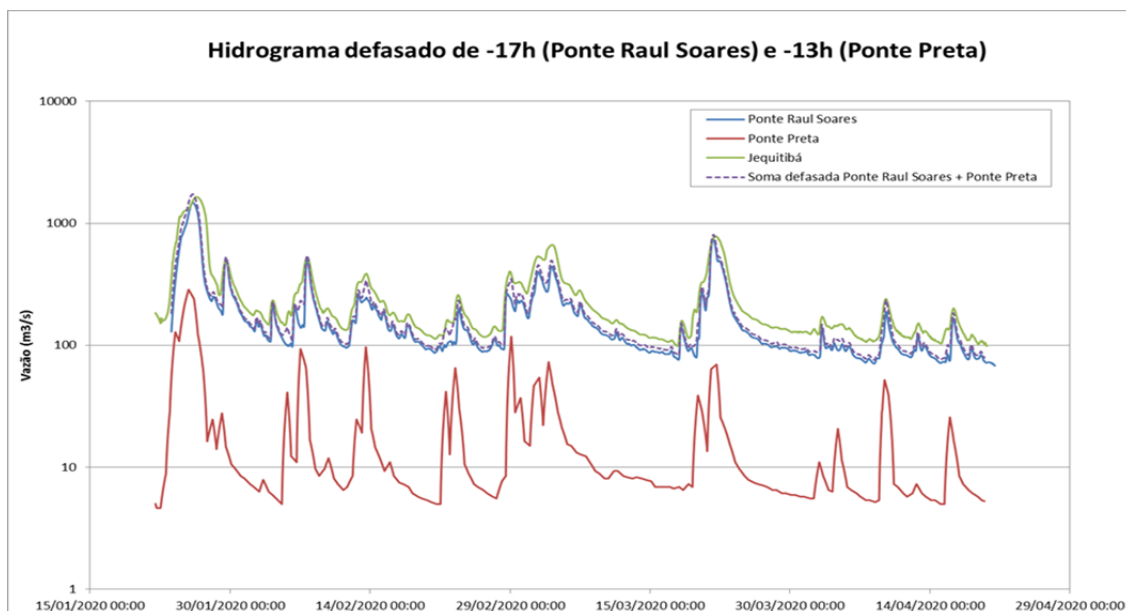


Figura 22 – Hidrograma defasado das estações Ponte Raul Soares, Ponte Preta e Jequitibá

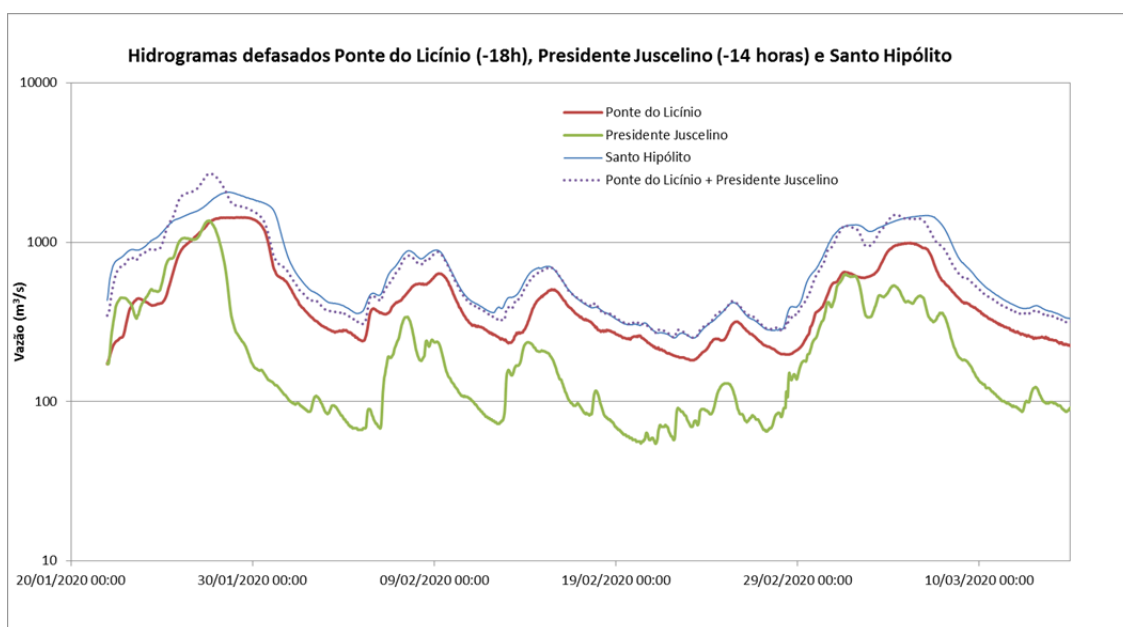


Figura 23 – Hidrograma defasado das estações de Ponte do Licínio, Presidente Juscelino e Santo Hipólito

As Figuras 24 e 25 apresentam, respectivamente, os diagramas unifilares simplificados das estações utilizadas para a previsão em Jequitibá e Santo Hipólito. Nesses diagramas estão representadas as estações utilizadas nas respectivas previsões e as estações localizadas à montante, assim como as distâncias entre as estações e os tempos médios de deslocamento que foram utilizados nos modelos de previsão. Estão também apresentados no interior dos círculos, o nome e código das estações e as respectivas áreas de drenagem.

6.3 Modelos de previsão para Jequitibá

Inicialmente foram calibrados modelos lineares para Jequitibá, utilizando-se os dados de Ponte Raul Soares com 17 horas de defasagem e da própria estação de Jequitibá, com uma antecedência de oito horas para previsão. Contudo, esses modelos não apresentaram resultados satisfatórios, gerando significativo descolamento em relação aos dados observados ao longo do período de ascensão e também na previsão do pico da cheia, tanto em nível temporal, quanto na magnitude do pico. Tentou-se então calibrar o modelo considerando apenas o período de ascensão dos eventos considerados, ou seja, desconsiderando o período de depleção do hidrograma pós-pico. Verificou-se uma melhora no modelo, mas não o suficiente para que ele pudesse ser adotado.

A Figura 26 mostra a não linearidade dos dados de vazão das estações Ponte Raul Soares e Jequitibá, ao longo da ascensão do hidrograma no evento de janeiro de 2020, considerando uma defasagem de 17h entre os dados das estações.

Foi então utilizado o método das diferenças, usando-se os dados de Ponte Raul Soares com 17 horas de defasagem e da própria estação de Jequitibá, tendo sido adotado um intervalo de tempo Δt de 8 horas em ambas as estações e uma antecedência para a previsão de também oito horas. Esse modelo apresentou melhores resultados que o modelo linear, mas ainda assim, embora possa vir a ser utilizado, não foi considerado totalmente satisfatório: embora tenha gerado resultados razoáveis para alguns eventos, em outros ocorreu defasagem temporal e na magnitude dos picos.

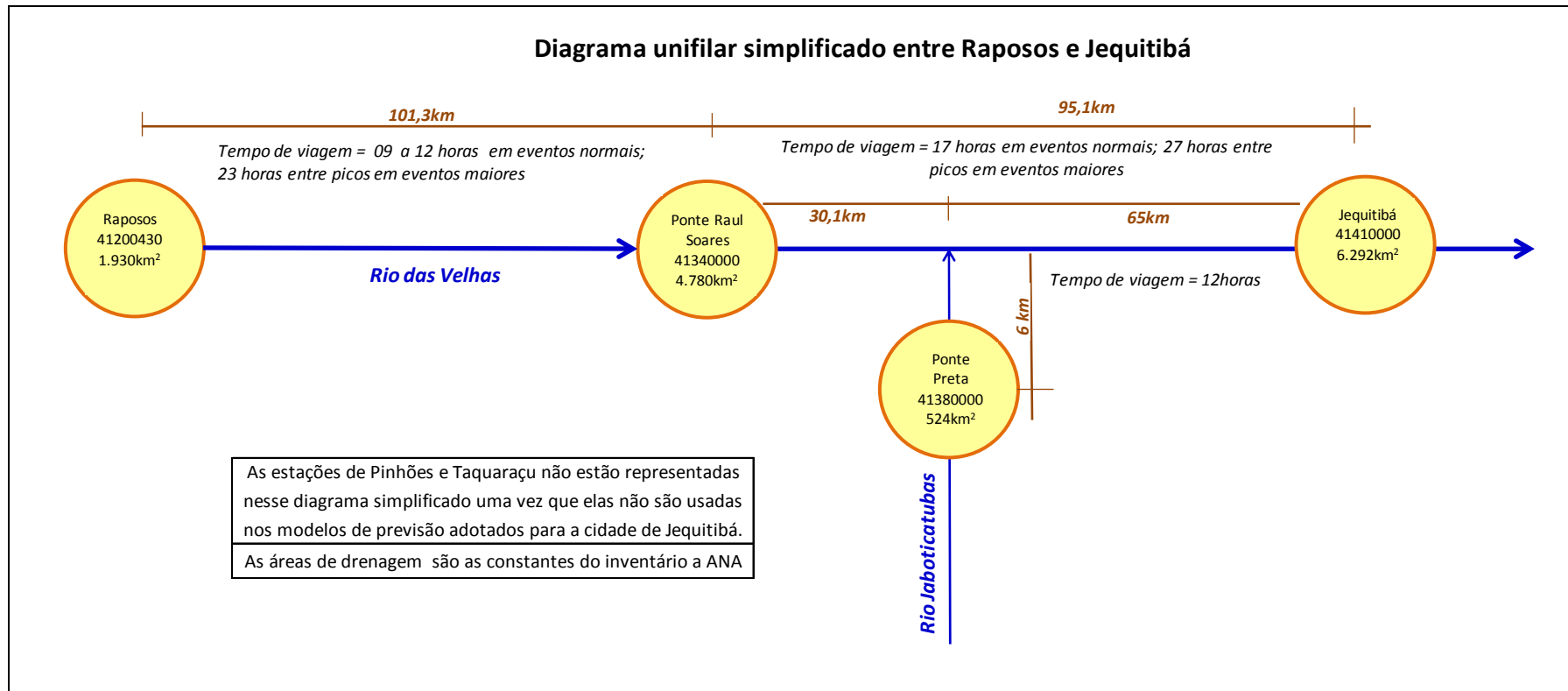


Figura 24 – Diagrama simplificado para Jequitibá

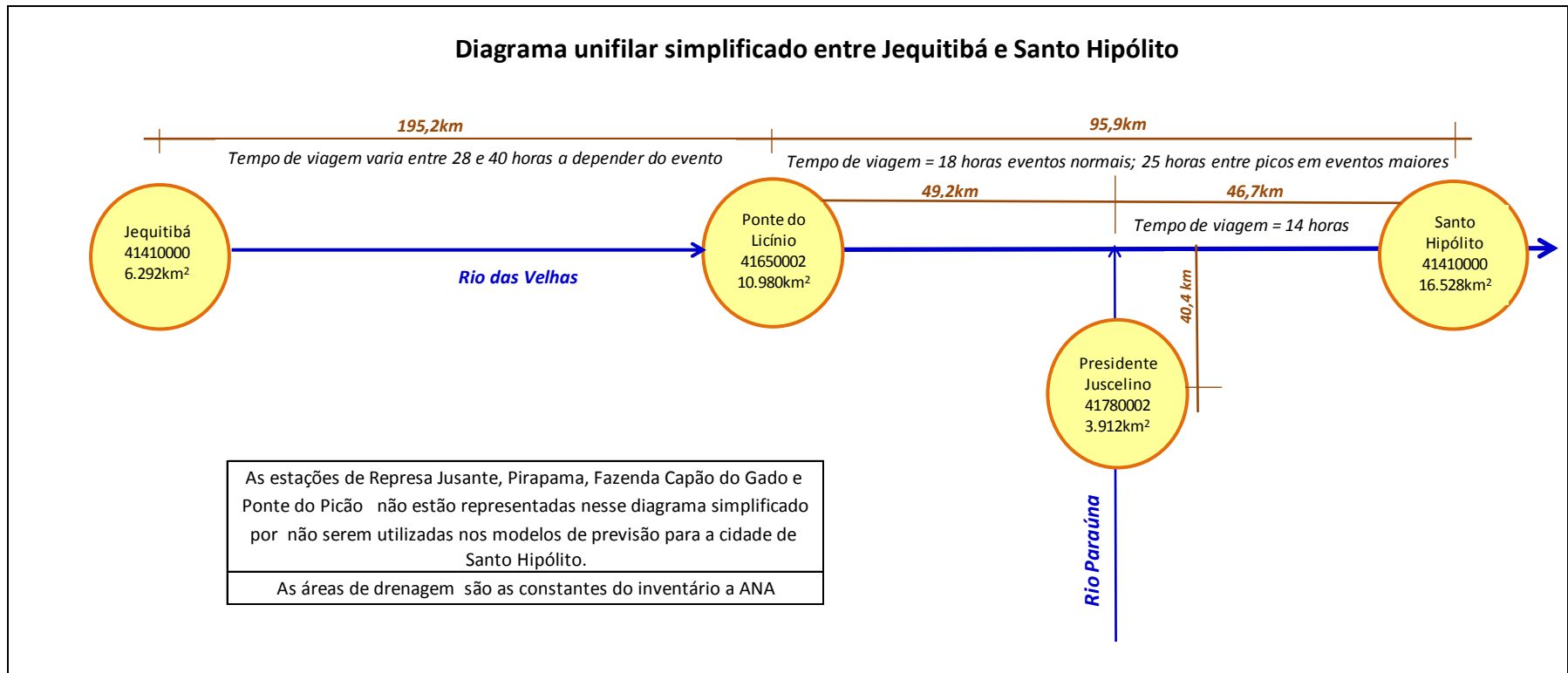


Figura 25 – Diagrama Simplificado para Santo Hipólito

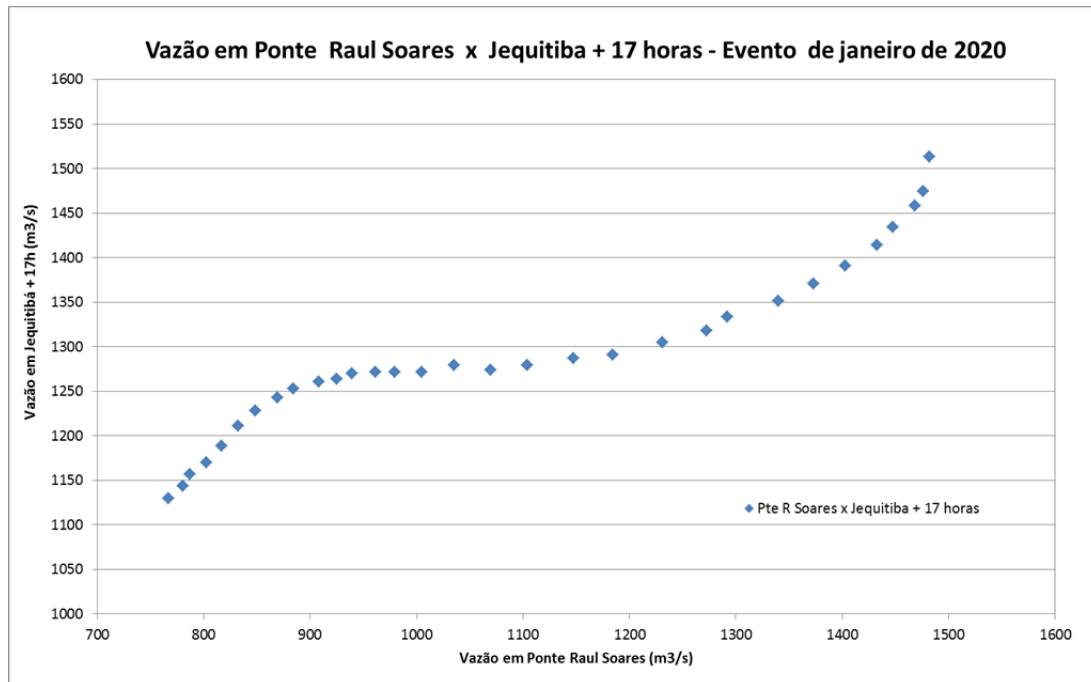


Figura 26 - Vazões de Ponte Raul Soares x Jequitibá com defasagem de 17h

Um dos possíveis motivos dos modelos estarem apresentando descolamento no tempo e na magnitude dos picos pode estar associado ao comportamento hidrológico do segmento da bacia entre as estações de Ponte Raul Soares e Jequitibá. Esse segmento possui uma área de drenagem incremental da ordem de 1.512 km², o que representa cerca de 23% da área da bacia em Jequitibá; nessa área incremental, aproximadamente 950 km² correspondem à parcela de contribuição da margem direita e 550 km² a parcela relativa à margem esquerda.

Pela margem direita, a maior contribuição incremental é a da bacia do rio Jaboticatubas, que é monitorado na estação de Ponte Preta, cuja área de drenagem é de 524 km².

Por outro lado, toda a parcela incremental que drena para a margem esquerda está localizada numa região de carste bem desenvolvido, com baixa densidade de drenagem e ocorrência de grutas, dolinas e uma rede de condutos subterrâneos pouco conhecida. Esse intrincado sistema cárstico pode, inclusive, através de sua rede de condutos subsuperficiais, receber contribuições de sub-bacias vizinhas, o que pode gerar um aumento do volume escoado no segmento do rio das Velhas entre Ponte Raul Soares e Jequitibá na ocorrência de chuvas intensas e prolongadas.

6.3.1 Aplicação do método de propagação de Muskingum-Cunge

Na tentativa de avaliar de forma quantitativa como a estação de Ponte Raul Soares pode explicar as vazões em Jequitibá em eventos de cheia, foi utilizado o método de Muskingum-Cunge (Tucci, 2005) para estimar, entre Ponte Raul Soares e Jequitibá, a propagação da onda da cheia verificada em janeiro de 2020.

Por esse método, a vazão num determinado intervalo de tempo em função das vazões no intervalo de tempo anterior e seção de montante é dada por:

$$Q_{i+1}^{t+1} = C1. Q_i^t + C2. Q_i^{t+1} + C3. Q_{i+1}^t$$

Onde:

Q é a vazão em m^3/s ;

i e $i+1$ são as seções de montante e jusante e t e $t+1$ são o início e final do intervalo de tempo.

Os parâmetros $C1$, $C2$ e $C3$ são calculados conforme abaixo:

$$C1 = \frac{\Delta t + 2KX}{2K.(1 - X) + \Delta t}$$

$$C2 = \frac{\Delta t - 2KX}{2K.(1 - X) + \Delta t}$$

$$C3 = \frac{2K.(1 - X) - \Delta t}{2K.(1 - X) + \Delta t}$$

Cunge, (1969) propôs uma estimativa dos parâmetros K e X com base em características físicas do rio, como o comprimento do trecho, a largura média da seção, a declividade e rugosidade no trecho em estudo. Segundo Cunge, esses parâmetros são definidos por:

$$K = \frac{\Delta x}{c_0}$$

$$X = 0,5 \left(1 - \frac{Q_0}{B_0 S_0 c_0 \Delta x} \right)$$

Onde:

K é o parâmetro de tempo do modelo e representa o tempo médio de deslocamento da onda de cheia;

X (adimensional) é o parâmetro que controla a atenuação da onda de cheia no trecho;

Δx (m) é o comprimento do subtrecho do rio;

c_0 é a celeridade cinemática (m/s);

Q_0 (m³/s) é a vazão de referência;

B_0 (m) é a largura estimada do rio;

S_0 é a declividade do trecho de rio.

Quanto maior o valor de K , maior será o afastamento no tempo dos picos na entrada e saída do trecho do canal (Colischonn & Dornelle, 2013).

O parâmetro X é um ponderador cujo valor deve estar entre 0 e 0,5 e reflete a magnitude do amortecimento da onda de cheia, sendo que para o valor de 0 o amortecimento é máximo e para o valor de 0,5 não ocorre amortecimento.

Quanto à vazão de referência Q_0 , Tucci (1998) sugere que uma boa estimativa de Q_0 é a representada por 70% da vazão máxima do hidrograma de entrada.

O comprimento do subtrecho do rio (Δx) deve ser escolhido de forma que o modelo represente adequadamente a atenuação da onda de cheia. Uma estimativa de Δx pode ser obtida pela equação proposta por Fread (1993), conforme mostrado a seguir:

$$\Delta x \leq \frac{c\Delta t}{2} \left[1 + \left(1 + 1,5 \cdot \frac{Q_0}{B_0 \cdot S_0 \cdot \Delta t \cdot c_0^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

Obtendo-se o valor de Δx pode se definir o número de subtrechos que serão utilizados na estimativa da propagação que é dado por:

$$N = \frac{L}{\Delta x}$$

Onde L é o comprimento total do trecho.

A largura média do rio no trecho em estudo (B_0) pode ser obtida a partir de levantamento de seção transversal ou de uma imagem de satélite. O comprimento do trecho de rio e a declividade podem ser obtidos de imagens de satélite ou do modelo digital do terreno (MDT).

A celeridade cinemática, considerando o canal com seção retangular, é dada como 5/3 da velocidade do fluxo correspondente à vazão Q_0 e pode obtida pela equação de Manning, ou seja:

$$c_0 = \frac{5 Q_0^{0,4} S_0^{0,3}}{3 n^{0,6} B_0^{0,4}}$$

Onde n é o coeficiente de rugosidade de Manning.

Para evitar distorções nos valores do hidrograma de saída, o intervalo de tempo para aplicação do método Muskingum-Cunge deve ser relativamente pequeno quando comparado ao tempo de ascensão do hidrograma e pode ser estabelecido como se segue (Fread, 1993):

$$\Delta t \leq \frac{Tr}{M}$$

Onde Tr é o tempo de ascensão do hidrograma e $M \geq 5$.

Para o trecho do rio das Velhas entre Ponte Raul Soares e Jequitibá, foram considerados e/ou obtidos os valores para as variáveis e parâmetros do modelo conforme apresentado na Tabela 10.

A partir dos parâmetros C1, C2 e C3 foi calculado o hidrograma propagado da estação de Ponte Raul Soares, conforme mostrado na Figura 27. Verifica-se pela figura que o hidrograma propagado de Ponte Raul Soares, quando comparado com o hidrograma observado em Jequitibá durante o evento de janeiro de 2020, sugere que apenas a estação de Ponte Raul Soares não é suficiente para prever adequadamente as vazões em Jequitibá, sendo necessárias mais informações, as quais em princípio seriam representadas pelo hidrograma incremental, ou seja, pela diferença das vazões observadas em Jequitibá e as propagadas a partir de Ponte Raul Soares.

Tabela 10: Variáveis e parâmetros do modelo de Muskingum-Cunge obtidos para o trecho do rio das Velhas entre Ponte Raul Soares e Jequitibá

| Variável/parâmetro | Unidade | Valor |
|---|---------------|------------|
| Tempo de pico | $t_p (h)$ | 60,00 |
| | $t_p (s)$ | 216.000,00 |
| Intervalo de tempo | $Dt (h)$ | 12,00 |
| | $Dt (s)$ | 43.200,00 |
| Comprimento do trecho | $L (km)$ | 95,10 |
| Largura média da seção | $B (m)$ | 125,00 |
| Declividade | $S (m/m)$ | 0,00027 |
| Número de manning | n | 0,040 |
| Vazão de referência | $Q_0 (m^3/s)$ | 1.037,22 |
| Profundidade hidráulica | $h(m)$ | 6,05 |
| Área molhada: | $A (m^2)$ | 755,93 |
| Velocidade | $v (m/s)$ | 1,37 |
| Celeridade | $c (m/s)$ | 2,29 |
| Comprimento estimado do subtrecho | $Dx (m)$ | 103.539,82 |
| Número de subtrechos adotado | N | 1 |
| Comprimento adotado de cada subtrecho | $Dx (m)$ | 95.100,00 |
| Parâmetro de tempo | $K (s)$ | 41.585,92 |
| Parâmetro de atenuação | X | 0,43 |
| Parâmetros do modelo de Muskingum Cunge | $C1$ | 0,0819 |
| | $C2$ | 0,8719 |
| | $C3$ | 0,0462 |
| | $C1+C2+C3$ | 1,000 |

Elaborado pelos autores (2021)

Dessa forma, conforme já abordado, a opção encontrada foi incorporar ao modelo de previsão os dados da estação de Ponte Preta, localizada no rio Jaboticatubas, afluente pela margem direita do rio das Velhas. Essa estação é convencional, apresentando apenas os dados de dupla leitura. Sendo assim, para serem utilizados no modelo de previsão, os dados de Ponte Preta foram discretizados de 01 em 01 hora.

Como essa estação possui uma bacia de contribuição pequena, com área de drenagem de apenas 524km², as variações de nível são muito rápidas e os picos são bastante íngremes. Por esse motivo, o hidrograma real e os picos de cheia podem não estar bem representados pelos dados discretizados. Mesmo assim, considera-se que a inserção da estação de Ponte Preta no modelo de previsão para Jequitibá, ainda que com os dados discretizados, produza resultados melhores do que a utilização apenas da estação de Ponte Raul Soares.

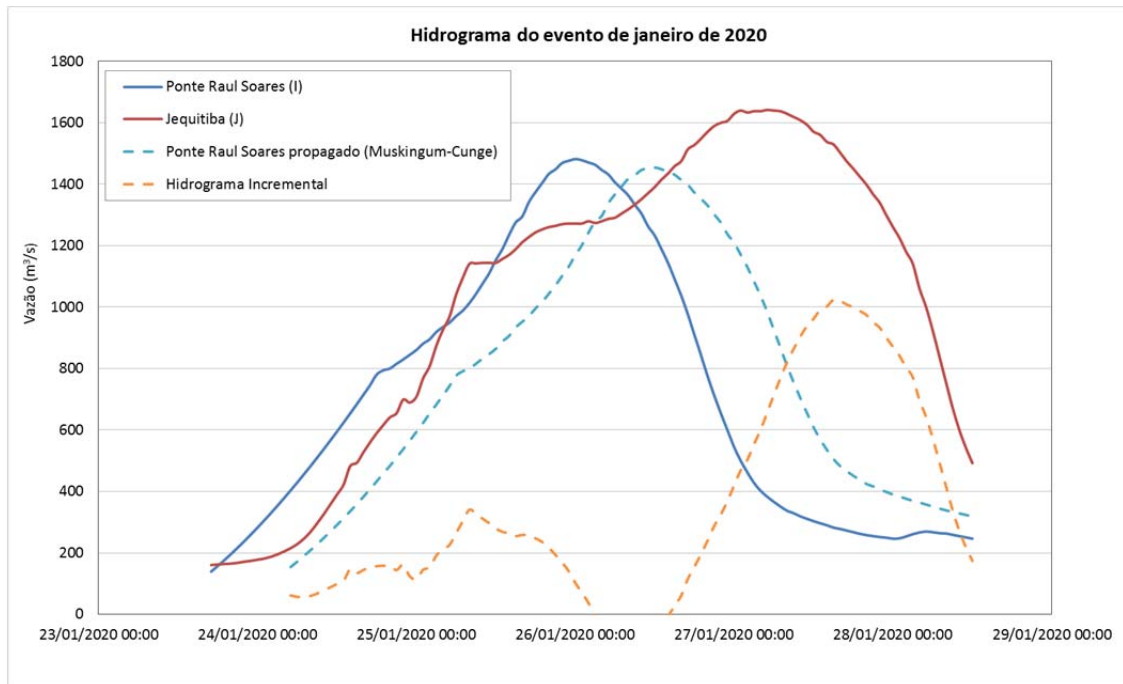


Figura 27 - Hidrogramas do evento de janeiro de 2020

Conforme já abordado anteriormente, a antecedência verificada para Ponte Preta é de 13 horas em relação à Jequitibá. A Figura 28 mostra como os picos das duas estações são coincidentes considerando-se essa defasagem de tempo, mesmo que os dados utilizados tenham sido discretizados e os picos de Ponte Preta possam apresentar certa distorção devido à interpolação.

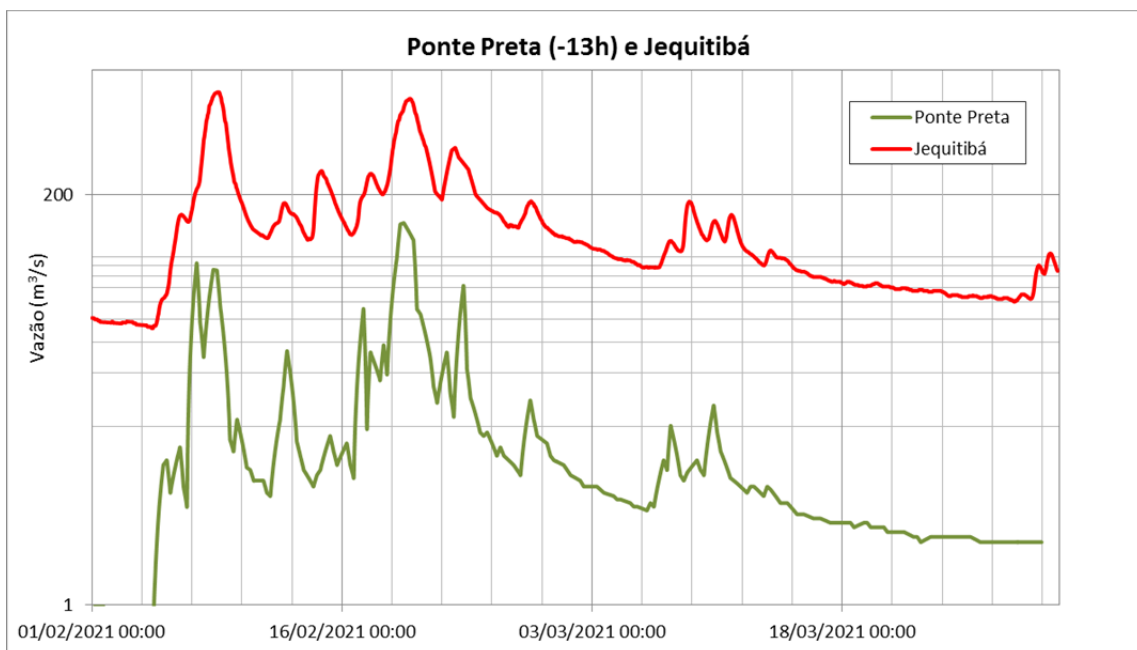


Figura 28 - Hidrograma defasado das estações Ponte Preta e Jequitibá entre 01/02 e 31/03/2021

Dessa forma, foi calibrado para Jequitibá um modelo de previsão pelo método das diferenças, com parcela auto regressiva, no qual as estações explicativas são Ponte Raul Soares e Ponte Preta, além da própria estação de Jequitibá. A previsão tem uma antecedência de 08 horas.

Se por algum motivo ou circunstância externa, os dados de Ponte Preta não estejam disponíveis durante o evento de cheia, poderá ser adotado, de forma alternativa, o modelo anteriormente definido pelo método das diferenças, considerando apenas as estações de Ponte Raul Soares e Jequitibá.

Cabe ressaltar que está prevista a instalação de uma PCD no local, ainda no decorrer do ano de 2021, o que irá permitir a obtenção de cotas e vazões a cada 15 minutos. Espera-se que o modelo de previsão, já considerando a inclusão dos dados telemétricos horários da estação de Ponte Preta, venha representar bem a ascensão e os picos dos hidrogramas de Jequitibá.

Ressalta-se que os modelos para Jequitibá serão efetivamente aplicados apenas caso a equipe técnica verifique que a cota de alerta poderá ser atingida, ou seja, a partir da cota 950cm, aproximadamente. Entretanto, a maior parte dos eventos disponíveis para calibração e validação dos modelos nem chegaram a atingir essa cota. A inclusão de novos eventos que tenham atingido cotas superiores a 950cm, utilizando-se dados horários para a calibração/validação do modelo, poderá subsidiar uma modelagem mais eficiente no futuro.

A eficiência do modelo pode ser avaliada através do coeficiente de Nash-Sutcliffe, dado por:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{Obs}^t - Q_{Prev}^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{Obs}^t - \overline{Q_{Obs}})^2}, \text{ onde:}$$

Q_{Obs}^t = vazão observada;

Q_{Prev}^t = vazão observada;

$\overline{Q_{Obs}}$ = média da série de vazões observadas considerada.

Valores de Nash entre 0,75 e 1,0 indicam que o modelo é adequado; valores entre 0,36 e 0,75 indicam que o modelo é regular e valores inferiores a 0,36 indicam que o modelo não é satisfatório.

O coeficiente de Nash relativo ao modelo principal adotado foi aplicado em alguns dos eventos utilizados para calibração e validação do modelo, tendo-se chegado aos resultados apresentados na Tabela 11:

Tabela 11: Coeficiente de Nash relativo ao modelo principal de previsão para Jequitibá aplicado em alguns dos eventos considerados

| Evento | Período | Coeficiente de Nash |
|--------|-------------------------|---------------------|
| 1 | 10 a 22/01/1991 | 0,83 |
| 5 | 28/12/2011 a 07/01/2012 | 0,93 |
| 6 | 15 a 22/01/2016 | 0,91 |
| 7 | 24 a 28/01/2020 | 0,81 |

Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2020)

Observa-se que em todos os casos o coeficiente de Nash foi maior que 0,81. Contudo, o menor coeficiente foi exatamente o relativo ao evento mais significativo, de janeiro de 2020. A Figura 29 mostra as cotas observadas e as previstas nos eventos acima citados. Ressalta-se que os modelos calibrados são do tipo Vazão x Vazão; a apresentação dos dados de cota foi feita porque a informação de previsão que se insere nos boletins de monitoramento e de alerta emitidos é a cota.

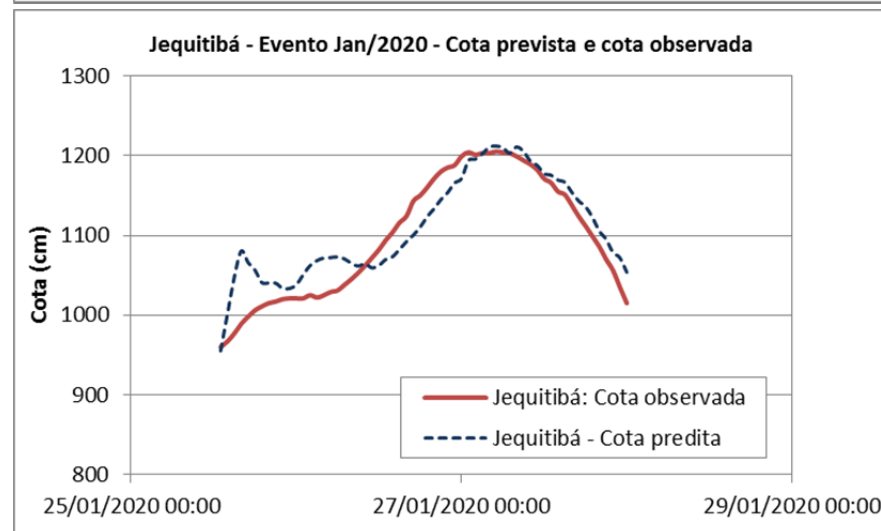
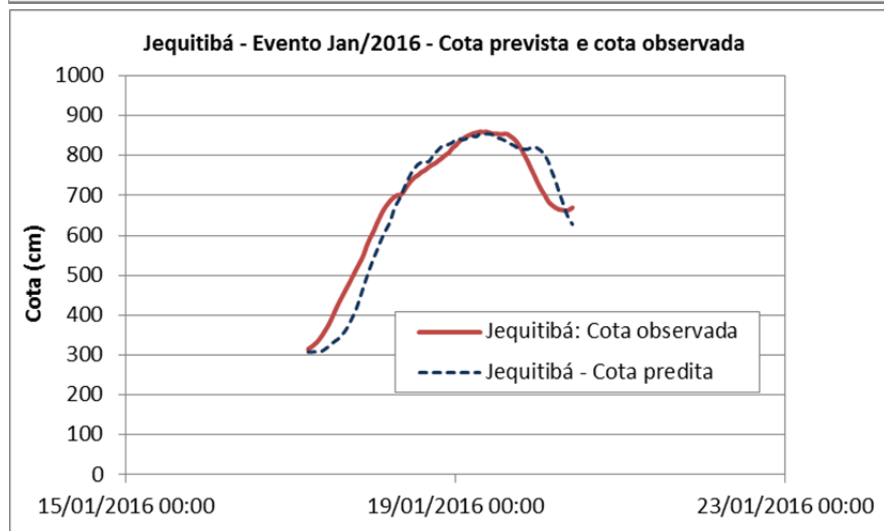
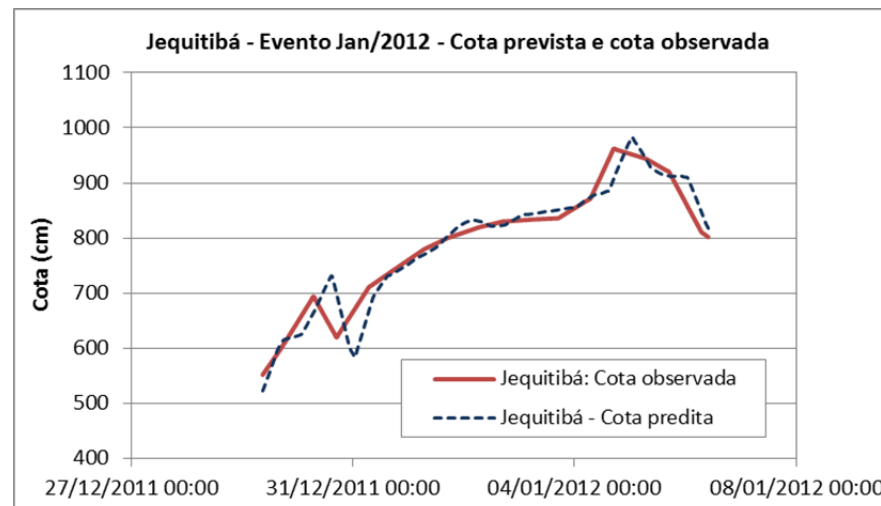
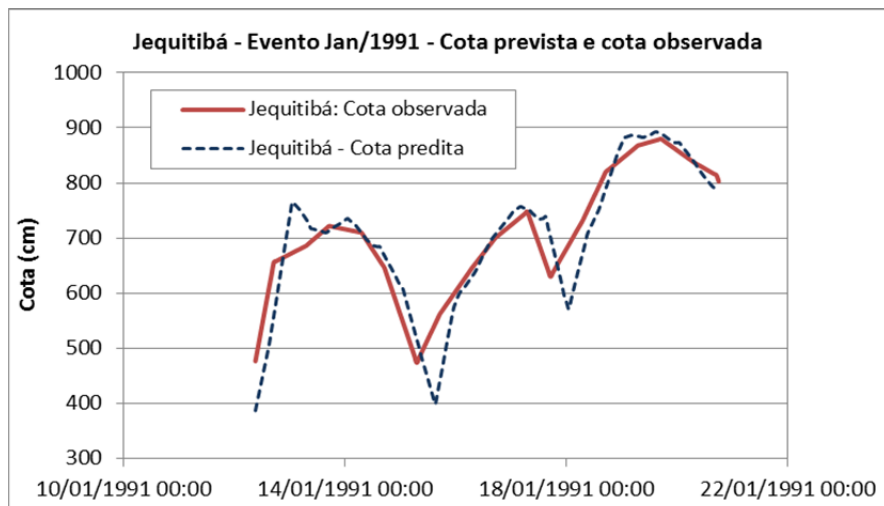


Figura 29 - Modelo de previsão para Jequitibá, aplicado nos eventos de janeiro/1991, janeiro/2012, janeiro/2016 e janeiro/2020

6.4 Modelo de previsão para Santo Hipólito

Da mesma forma como ocorreu na modelagem para a estação de Jequitibá, tentou-se inicialmente a calibração de um modelo linear para a estação de Santo Hipólito, mas esse tipo de modelo também não apresentou resultados satisfatórios para previsão, gerando descolamentos significativos com relação aos dados observados.

Dessa forma, optou-se por adotar um modelo estabelecido pelo método das diferenças, utilizando-se os dados de Ponte do Licínio, Presidente Juscelino e da própria estação de Santo Hipólito, com defasagens temporais de -18 e -14 horas para Ponte do Licínio e Presidente Juscelino, respectivamente. Foi adotado um intervalo de tempo Δt de 08 horas e uma antecedência de previsão também de 08 horas.

O modelo adotado possui significativa parcela auto regressiva, relativa aos dados de vazão com antecedências de -16 e -08 horas da própria Santo Hipólito; contudo, ele apresentou muito bom resultado quando aplicado em todos os eventos disponíveis.

Cabe ressaltar que uma previsão bem mais simplificada, com antecedência de 14 horas, poderá ser realizada através da simples soma da vazão em Ponte do Licínio no tempo - 4 horas, com a vazão da estação de Presidente Juscelino na hora atual. Essa previsão poderá ser utilizada apenas na fase de ascensão do hidrograma e exclusivamente para cotas abaixo de 5,0 metros. Para cotas acima desse valor, os efeitos de amortecimento já são sentidos e esse modelo simplificado passa a descolar do hidrograma real, majorando em muito as vazões previstas.

O coeficiente de Nash relativo ao modelo principal adotado foi calculado para alguns dos eventos utilizados para calibração e validação do modelo, tendo se chegado aos resultados apresentados na Tabela 12.

Observa-se em que todos os casos o coeficiente de Nash está acima de 96%.

Como o modelo é muito dependente dos dados de Santo Hipólito, caso ocorram problemas de transmissão da PCD durante um evento de cheia, a previsão poderá ser realizada utilizando-se as cotas que serão informadas pelo observador da estação, mediante solicitação via telefone. Essas cotas deverão ser interpoladas de 01 em 01 hora para entrada no modelo de previsão.

Tabela 12 – Coeficiente de Nash relativo ao modelo principal de previsão para Santo Hipólito aplicado em alguns dos eventos considerados

| Evento | Período | Coeficiente de Nash |
|--------|-----------------------|---------------------|
| 1 | 11 a 24/01/1991 | 0,97 |
| 3 | 04 a 09/02/1992 | 0,96 |
| 5 | 29/12/11 a 11/01/2012 | 0,98 |
| 6 | 17 a 24/01/2016 | 0,99 |
| 7 | 24 a 31/01/2020 | 0,99 |
| 8 | 26/02 a 08/03/2020 | 0,99 |

Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2020)

Na Figura 30 são apresentadas as cotas observadas e previstas relativas aos eventos acima relacionados.

7. OPERACIONALIZAÇÃO DO SISTEMA DE ALERTA

7.1 Estruturação dos dados no SACE

Para dar início à operação do sistema de alerta do rio das Velhas fez-se necessário o cadastramento das estações intervenientes ao projeto na plataforma SACE, bem como a inserção de outras informações relevantes no referido sistema, como as curvas chave das estações, as equações dos modelos de previsão, dentre outras. Uma vez cadastradas as estações da bacia do rio das Velhas, o sistema SACE passou a armazenar os dados emitidos pelas PCDs bem como os enviados pelos observadores dessas estações.

Foram também cadastradas as Pequenas Centrais Hidrelétricas localizadas na bacia, de forma que os dados de vazão defluente também fossem armazenados no sistema SACE.

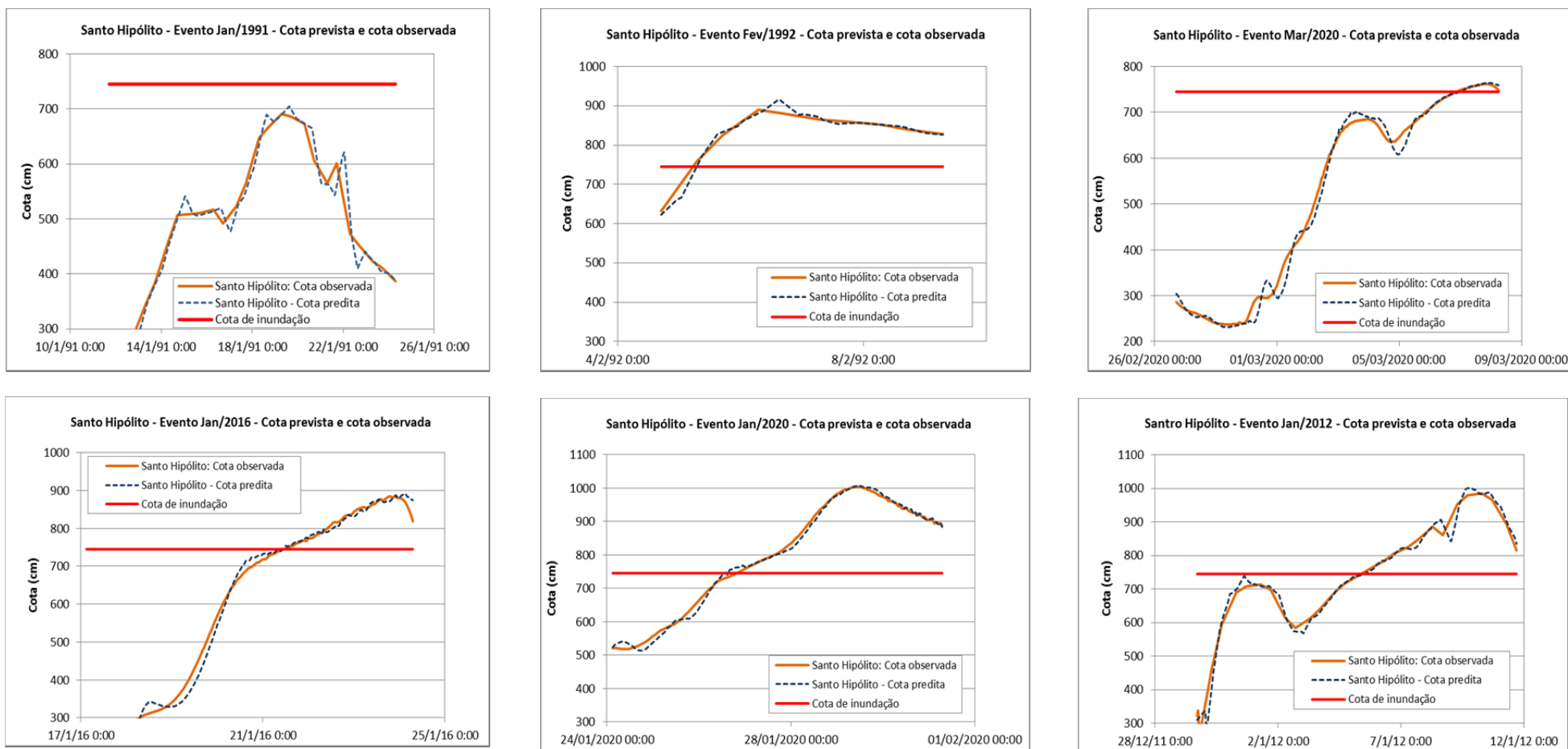


Figura 30 - Modelo de previsão para Santo Hipólito, aplicado nos eventos de janeiro de 1991, fevereiro de 1992, janeiro de 2011, janeiro de 2016, janeiro de 2020 e março de 2020.

7.2 Inserção de dados e informações relevantes no Servidor do sistema de alerta

Outras informações relevantes, tais como os contatos das Prefeituras Municipais, Defesas Civas municipais e estaduais, órgãos gestores estaduais e nacionais, a lista de e-mails para emissão dos boletins, os boletins padrão, a documentação do projeto e demais informações técnicas importantes, como as equações das curvas chave, o modelo digital do terreno da bacia, foram organizadas no Servidor do sistema de alerta, de forma a toda a equipe técnica e de apoio ao projeto tivesse acesso a essas informações sempre que necessário.

7.3 Elaboração dos boletins padrão

Foram elaborados os padrões dos boletins a serem enviados para as Prefeituras, Defesas Civas e demais órgãos intervenientes ao sistema de alerta.

Em situação de normalidade, é enviado um boletim de monitoramento hidrológico, uma vez ao dia; esse boletim contém, em forma de tabela e gráficos, as informações relativas às variações do nível do rio nas estações Ponte Raul Soares, Jequitibá, Ponte do Licínio, Presidente Juscelino e Santo Hipólito.

Caso os níveis do rio venham a se elevar acima da cota de alerta pré-estabelecida, inicia-se a emissão dos boletins de alerta hidrológico, na frequência que se julgar mais adequada, uma ou mais vezes por dia. Esses boletins contêm, além das informações apresentadas nos boletins de monitoramento hidrológico, também a previsão da cota que o rio deverá atingir, com uma antecedência pré-determinada, para as cidades de Jequitibá e Santo Hipólito. Os boletins de alerta hidrológico são emitidos ao longo de todo o período de tempo em que os níveis se encontrem acima da cota de alerta estabelecida.

7.4 Lançamento oficial do Sistema de Alerta da Bacia do rio das Velhas – SAH Velhas

O Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do rio das Velhas foi oficialmente lançado no dia 30 de novembro de 2018, em evento realizado no Auditório da Superintendência Regional de Belo Horizonte, com a presença de representantes da Defesa Civil estadual, imprensa e mídia.

Na ocasião foi realizada uma apresentação geral sobre os sistemas de alerta operados pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM em todo o Brasil e uma apresentação específica sobre a operação do Sistema de Alerta da bacia do rio das Velhas.

8. OPERAÇÃO DO SISTEMA DE ALERTA

Desde o lançamento oficial do SAH Velhas, foram realizadas três operações do Sistema de Alerta, nos períodos 2018-2019, 2019-2020 e 2020-2021.

8.1 Operação no período 2018-2019

O primeiro período de operação foi iniciado logo após o lançamento do Sistema, no dia 3 de dezembro de 2018, tendo se estendido até 25 de março de 2019.

Durante esse primeiro período, não se registrou a ocorrência de eventos de cheia significativos e nenhum outro tipo de intercorrência, como, por exemplo, a interrupção na transmissão dos dados de PCDs; a operação do sistema se restringiu ao acompanhamento diário dos níveis dos rios nas estações de monitoramento e à emissão dos boletins de monitoramento hidrológico. Foram emitidos, ao longo da operação, um total 114 boletins diários, todos de monitoramento hidrológico, uma vez que não foi necessário o envio de boletins de alerta hidrológico devido à não ocorrência de cotas acima da cota de alerta.

8.2 Operação no período 2019-2020

O segundo período de operação do SAH Velhas, relativo ao período chuvoso 2019-2020, foi iniciado em 25 de novembro de 2019 e se estendeu até 14 de abril de 2020.

O ano hidrológico 2019-2020 se mostrou muito chuvoso, após um prolongado período de estiagem que vinha ocorrendo em toda a região sudeste do Brasil desde 2014. Essa estiagem foi bastante sentida na bacia do rio das Velhas, tendo sido registradas vazões mínimas históricas na maioria das estações monitoradas, sendo que algumas delas, inclusive, tiveram as réguas

linimétricas rebaixadas em 01 metro, de forma a se evitar o registro de cotas negativas em relação ao zero da régua.

Contudo, chuvas significativas incidiram na bacia desde o início de dezembro de 2019, com valores precipitados muito superiores aos da média histórica. Devido às fortes chuvas durante todo o período chuvoso foi observada a ocorrência de três eventos significativos. O primeiro evento, de grande proporção, ocorreu no final do mês de janeiro de 2020, tendo atingido toda a bacia e gerado inundações em várias cidades. A onda de cheia gerada pelas chuvas atingiu e superou a cota do topo do dique de proteção na cidade de Jequitibá e gerou uma grande inundação na cidade de Santo Hipólito. Os demais eventos foram de magnitude menor, sendo que o segundo evento ocorreu entre a última semana de fevereiro e a primeira semana de março, e o terceiro evento na terceira semana de março.

A Figura 31 mostra o hidrograma do período entre 20 de janeiro e 20 de abril de 2020 para as estações da calha do rio das Velhas.

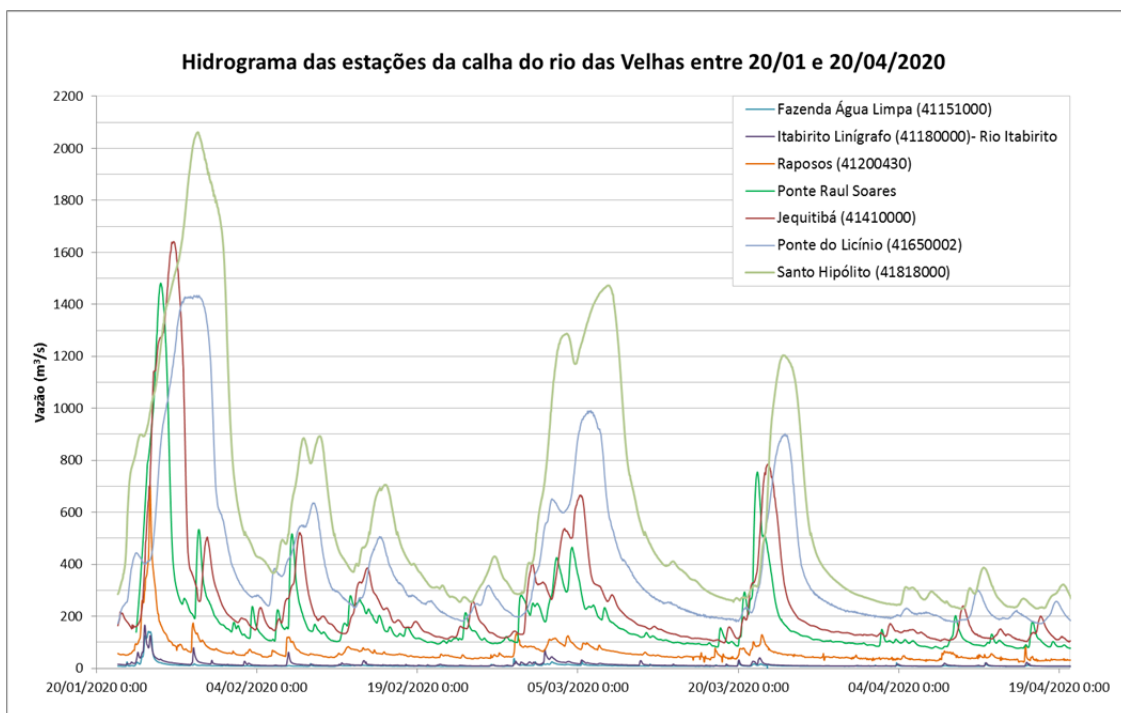


Figura 31 - Hidrograma das estações da calha do rio das Velhas entre 20/01 e 20/04/2021

A operação do Sistema de Alerta da bacia do rio das Velhas no período 2019-2020 foi bastante complexa e, em função das chuvas constantes e prolongadas, foi estendida até meados de abril, quando as previsões meteorológicas indicaram a diminuição das precipitações.

É importante salientar que nenhum dos eventos até então disponíveis, tanto para a previsão em Jequitibá quanto para Santo Hipólito e que foram utilizados para a calibração dos modelos iniciais de previsão, apresentava a magnitude do evento de janeiro de 2020. Dessa forma, os dados daquela cheia foram fundamentais para a melhoria dos modelos existentes até então, o que, por esse aspecto, foi muito positivo. Outro aspecto positivo decorrente do evento de janeiro de 2020 foi a experiência adquirida pela equipe técnica com relação às diversas particularidades da bacia e à sua dinâmica fluvial durante a cheia, inclusive o conhecimento adquirido com relação à região do alto Velhas, próximo às cabeceiras.

Durante o período de operação do sistema de alerta 2019-2020, foram emitidos 143 boletins, sendo 122 de monitoramento e 21 de alerta hidrológico, contendo previsões de nível para as cidades de Jequitibá e Santo Hipólito.

8.3 Operação no período 2020-2021

A operação do Sistema de Alerta 2020-2021 iniciou-se em 23 de novembro de 2020 e se estendeu até 31 de março de 2021.

No período compreendido entre 23 de novembro de 2020 (início da operação do sistema de alerta) e 04 de fevereiro de 2021, não ocorreram chuvas significativas na bacia que causassem elevações expressivas nos níveis dos rios monitorados, sendo que durante todo esse período as cotas observadas nas estações dos rios das Velhas, Jaboticatubas e Paraúna mantiveram-se sempre abaixo de 4,60 metros.

Chuvas mais consideráveis ocorreram entre os dias 05 e 08 de fevereiro. No dia 05/02 choveu na região do Alto Velhas, tendo as chuvas se deslocado para as regiões do Médio e Baixo Velhas no dia 06/02. No dia 07 voltou a chover nas regiões do Alto e Médio Velhas, sendo que no dia 08/02 as chuvas se deslocaram para a região do Baixo Velhas. Essas precipitações causaram uma elevação dos níveis do rio das Velhas, mas ainda longe de atingir as cotas de alerta nas cidades de Jequitibá e Santo Hipólito. A Figura 32 mostra a distribuição diária da chuva na bacia nos dias citados.

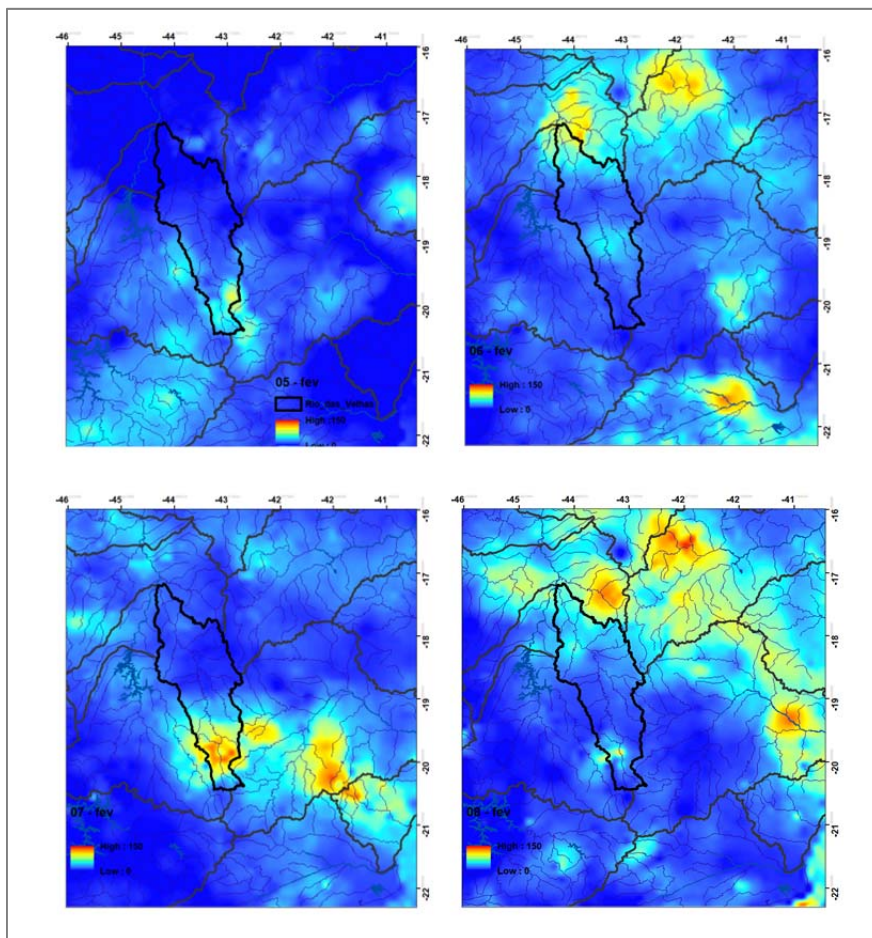


Figura 32 – Chuva incidente na bacia do rio das Velhas nos dias 05 a 08/02/2021

Em Raposos e Ponte Raul Soares, os níveis começaram a subir na manhã do dia 07/02, sendo que as cotas máximas, de 555 e 800 cm, ocorreram às 19:00h do dia 07/02 e às 12:00h do dia 08/02, respectivamente. Já em Jequitibá, a elevação dos níveis se iniciou na tarde do dia 07 e a máxima, de 725 cm, aconteceu às 06:00 h do dia 09/02. Em Ponte do Licínio, a cota máxima foi de 633 cm, tendo ocorrido às 15:00h do dia 10/02. Finalmente, em Santo Hipólito, a cota máxima de 508 cm foi alcançada entre 01:00h e 03:00h da madrugada do dia 11/02.

Vale ressaltar que, como não ocorreram chuvas significativas na bacia do rio Paraúna, não se verificou uma elevação mais expressiva das cotas na estação de Presidente Juscelino e, por esse motivo, tendo em vista que os níveis em Santo Hipólito são muito sensíveis às contribuições do rio Paraúna, também não ocorreu uma elevação mais acentuada dos níveis na estação de Santo Hipólito. As Figuras 33 e 34 mostram respectivamente os cotogramas e hidrogramas das estações monitoradas no período entre 05 e 14/02/2021.

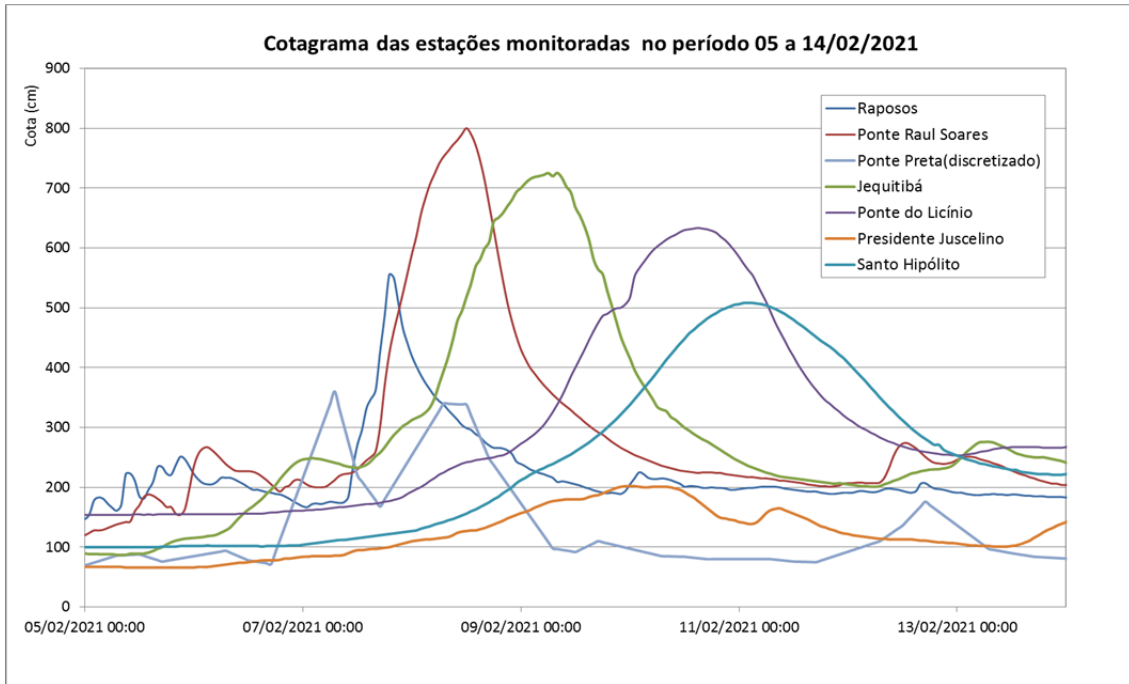


Figura 33 – Cotagrama das estações monitoradas no período de 05 a 14/02/2021

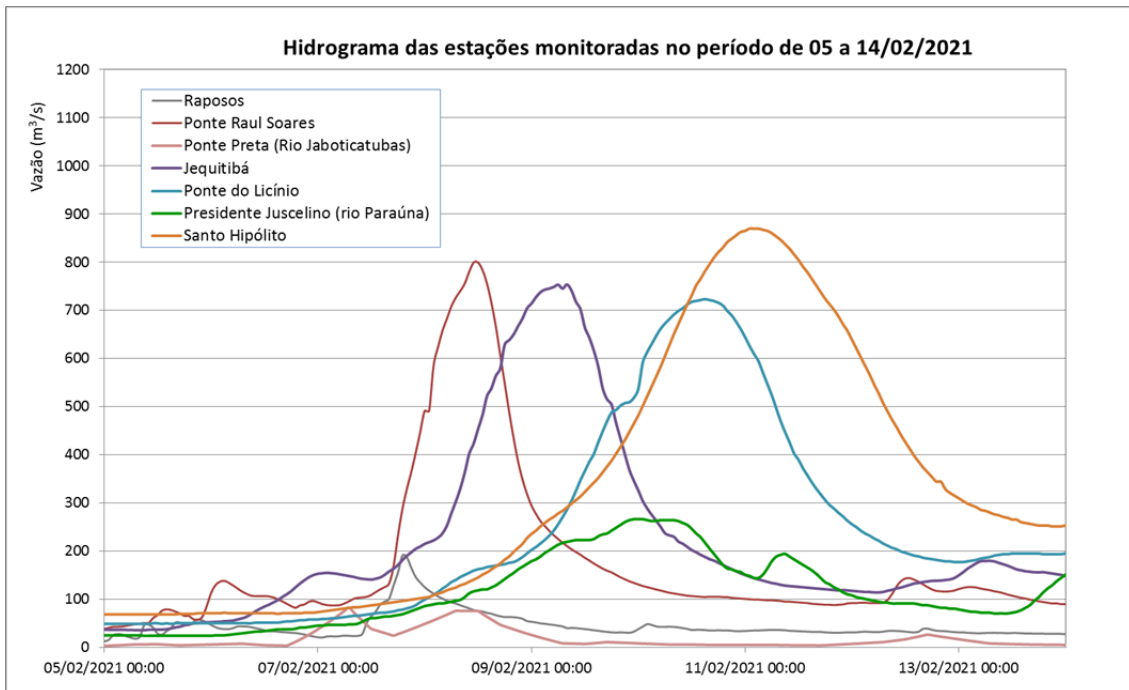


Figura 34 – Hidrograma das estações monitoradas no período de 05 a 14/02/2021

A Figura 35 mostra a variação das cotas em Jequitibá entre os dias 07 e 11 de fevereiro.

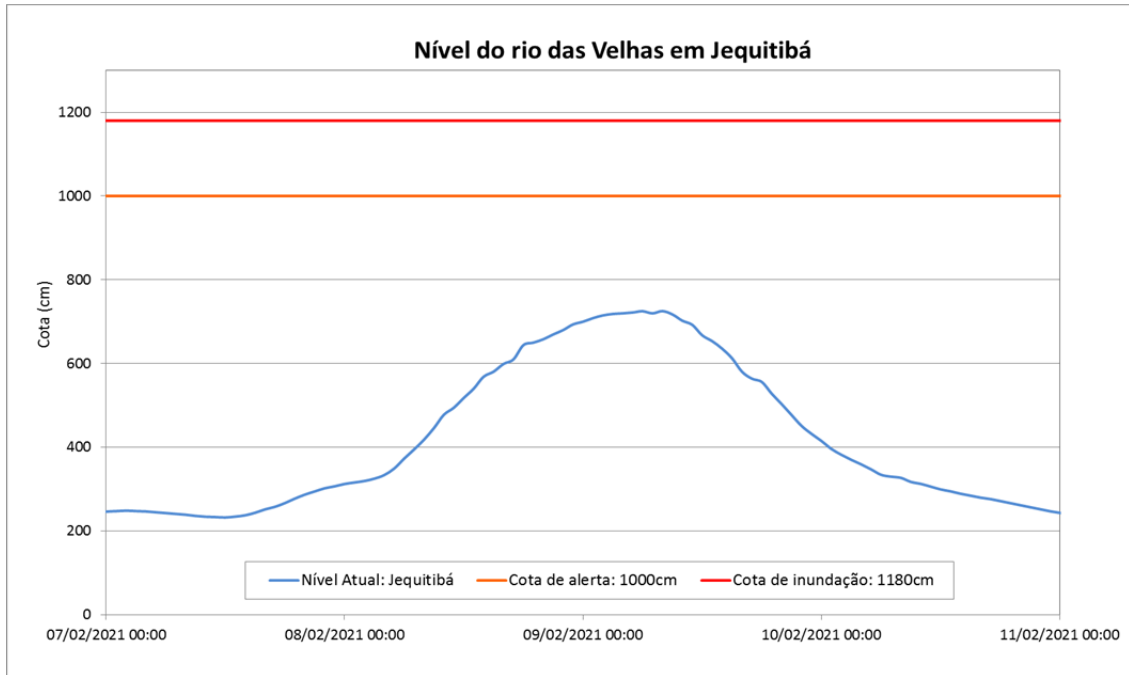


Figura 35 – Variação das cotas em Jequitibá entre 07 e 11/02/2021

Após alguns dias, novas chuvas ocorreram na bacia, de forma intermitente, entre os dias 17 e 22 de fevereiro, conforme pode ser observado na Figura 36.

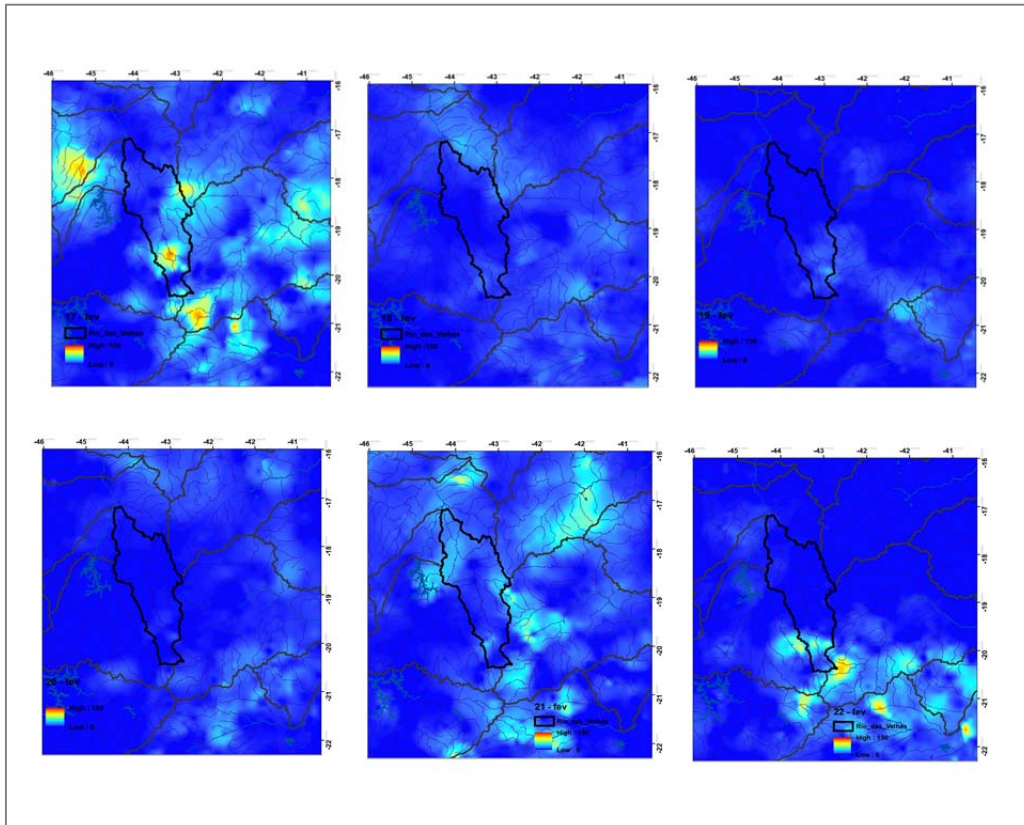


Figura 36 – Chuva incidente na bacia do rio das Velhas entre os dias 17 e 22/02/2021

No dia 17, choveu bastante na região do Médio Velhas e na bacia do rio Paraúna. No dia 18, as chuvas se dissiparam, voltando a ocorrer no dia 19/02, com menor intensidade, na região do Alto Velhas. Novas precipitações também ocorreram no dia 21/02, desta vez na região das cabeceiras do rio Paraúna e na região do Baixo Velhas. No dia 22/02, por sua vez, voltou a chover nas cabeceiras da bacia.

As chuvas dos dias 17 a 19/02, embora de menor magnitude do que as que ocorreram na semana anterior, encontraram solos muito mais úmidos, o que causou a elevação dos níveis do rio das Velhas nas estações monitoradas. As cotas em Ponte Preta e Ponte Raul Soares alcançaram as máximas às 17:00h do dia 19 e às 01:00h do dia 20/02, com valores de 518 e 634 cm, respectivamente. Em Jequitibá, a cota máxima, de 686 cm, ocorreu às 19:00h do dia 20/02. Essa onda se propagou para jusante, sendo que em Ponte do Licínio a cota máxima alcançou 657 cm, às 03:00h do dia 22/02.

As chuvas incidentes sobre as cabeceiras da bacia do rio Paraúna no dia 21/02, também causaram uma elevação dos níveis na estação de Presidente Juscelino, que atingiu a máxima de 373 cm às 16:00h do dia 22/02. Essa elevação dos níveis do rio Paraúna, juntamente com os níveis relativamente altos do rio das Velhas em Ponte do Licínio, se refletiu a jusante, na estação de Santo Hipólito, que atingiu a cota de alerta, estabelecida em 640 cm, às 02:00h da madrugada do dia 23/02 e a cota máxima, de 647 cm, entre às 05:00 e 07:00 da manhã daquele mesmo dia. Essa foi a ocorrência mais significativa verificada durante toda a operação do sistema de alerta no período 2020-2021.

As Figuras 37 e 38 mostram, respectivamente, os cotogramas e hidrogramas do período de 15 a 28/02/2021 nas estações monitoradas.

A Figura 39 mostra a variação das cotas na estação de Santo Hipólito entre 20 e 26/02/2021.

Após os eventos de chuva do mês de fevereiro, não ocorreram mais eventos relevantes na bacia até o final da operação do Sistema de Alerta.

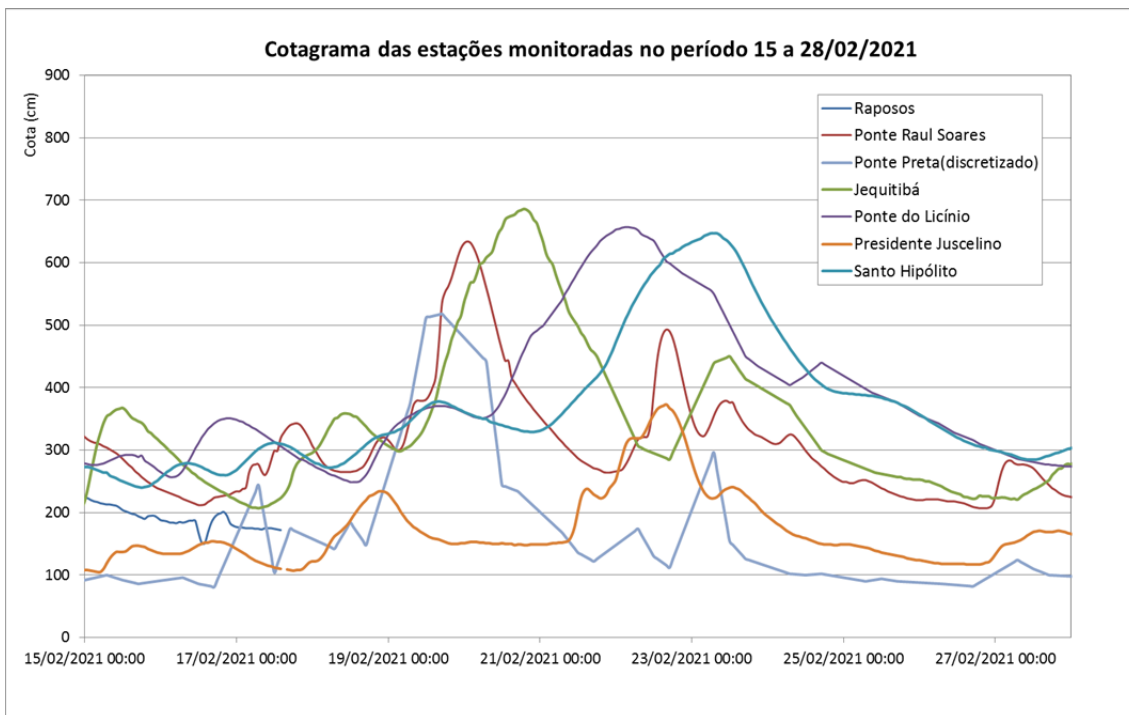


Figura 37 - Cotagrama das estações monitoradas no período de 15 a 28/02/2020

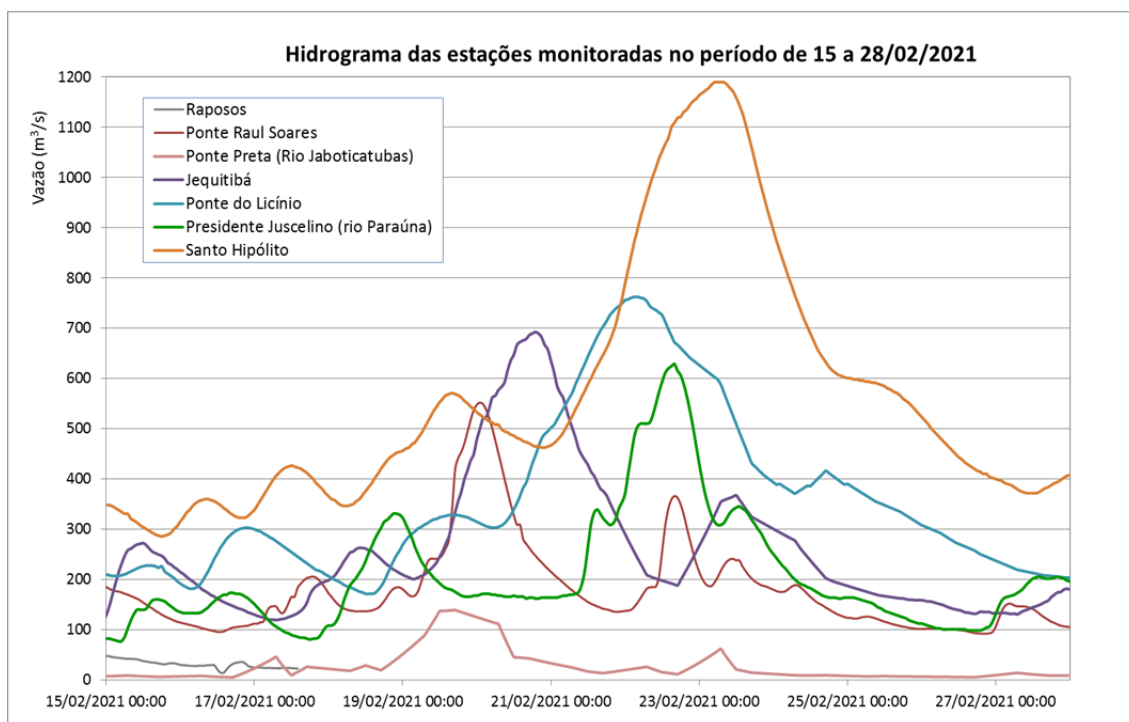


Figura 38 - Hidrograma das estações monitoradas no período de 15 a 28/02/2020

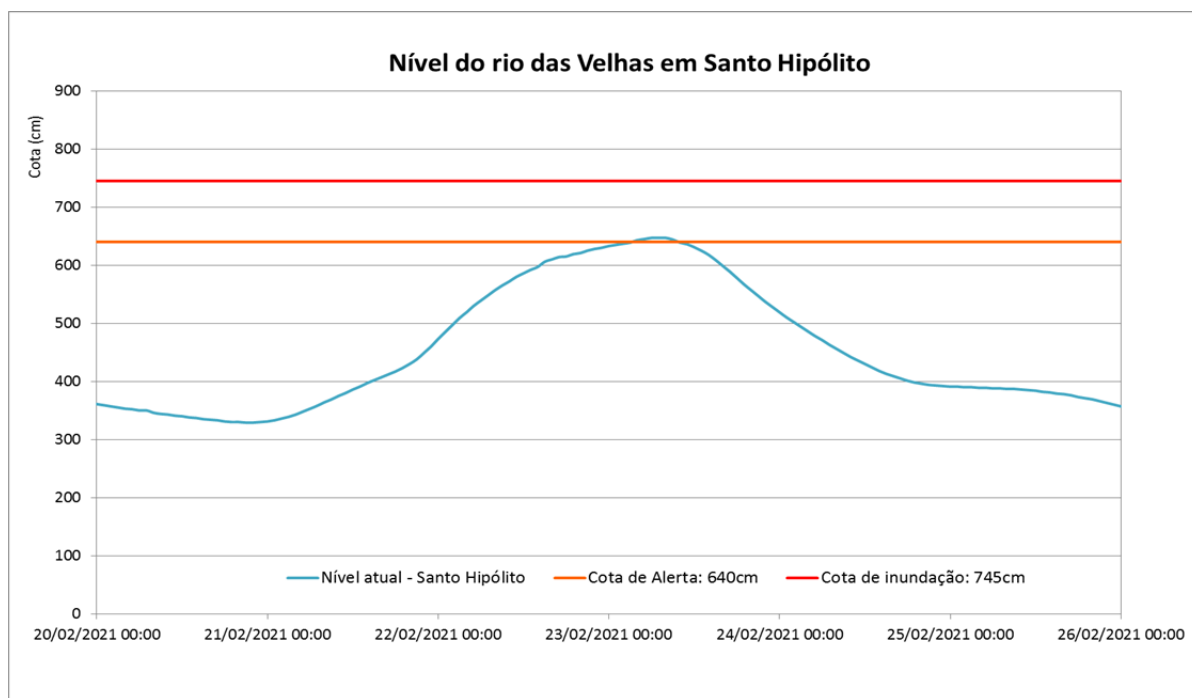


Figura 39 - Variação das cotas em Santo Hipólito entre 20 e 26/02/2021

Nas Figuras 40 e 41 estão apresentados os cotagramas e hidrogramas das estações monitoradas, relativos a todo o período de operação do Sistema de Alerta. Esses gráficos permitem uma visualização comparativa dos eventos ocorridos entre 23 de novembro e 31 de março de 2021.

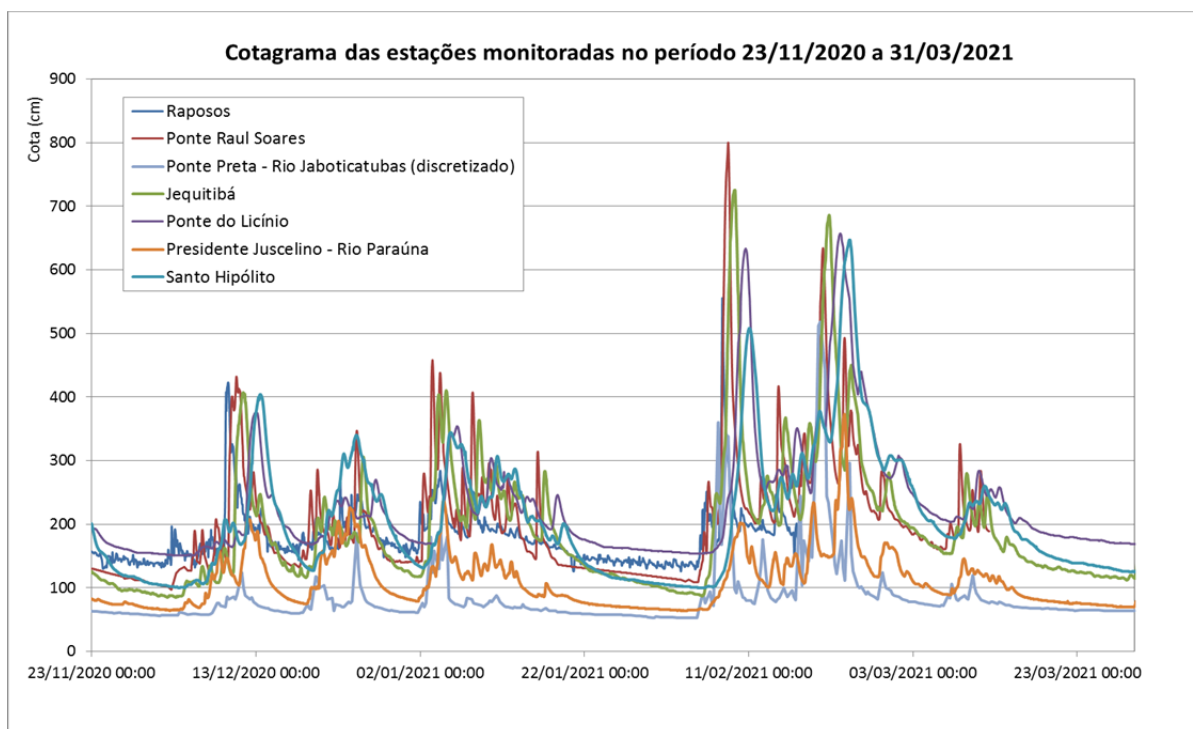


Figura 40 - Cotograma do período de 23/11/2020 a 31/03/2021

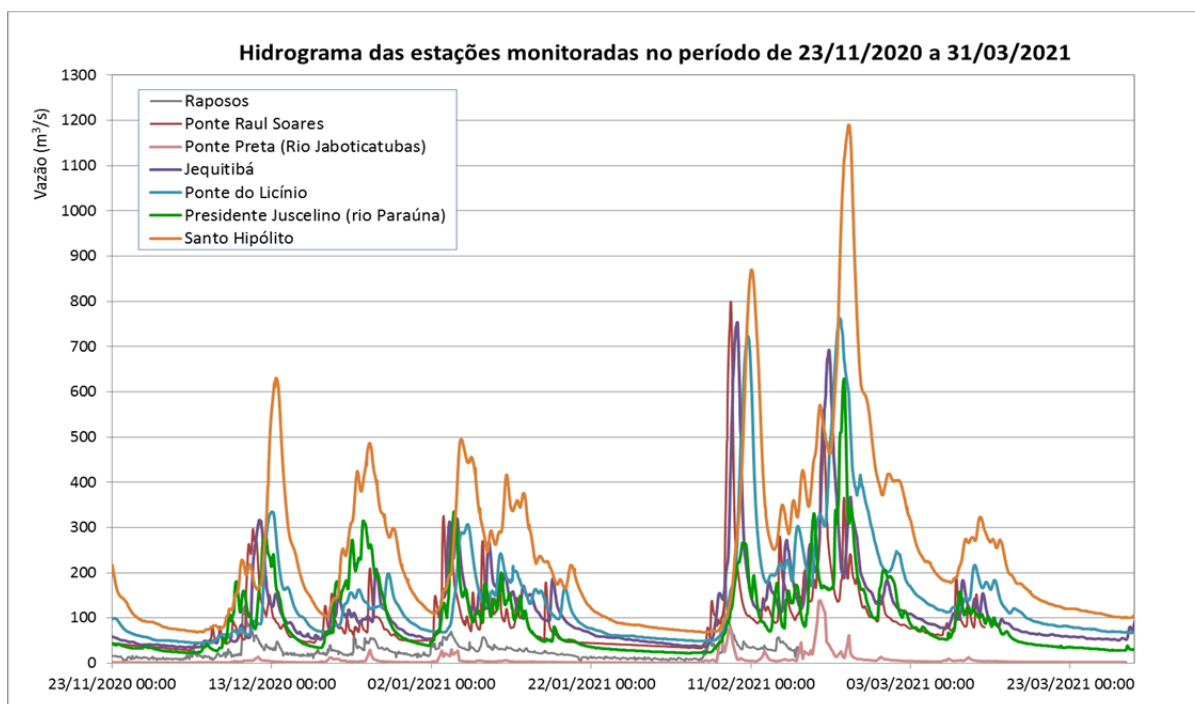


Figura 41 - Hidrograma do período de 23/11/2020 a 31/03/2021

Durante o período de operação 2020-2021, de 23/11/2021 a 31/03/2021 foram emitidos 125 boletins de monitoramento e 01 boletim de alerta hidrológico, esse último no dia 23 de fevereiro de 2021, quando foi atingida a cota de alerta na cidade de Santo Hipólito. A Tabela 13 apresenta o número mensal de boletins emitidos.

Tabela 13: Número de boletins emitidos durante a operação do SAH Velhas 2020-2021

| Tipo de boletim | 2020 | | 2021 | | | Total |
|--------------------------------------|----------|----------|---------|-----------|-------|-------|
| | Novembro | Dezembro | Janeiro | Fevereiro | Março | |
| Boletim de monitoramento hidrológico | 8 | 28 | 31 | 28 | 29 | 124 |
| Boletim de alerta hidrológico | - | - | - | 1 | - | 1 |

Elaborado pelos autores (2021)

9. CONCLUSÕES

A operação do sistema de alerta no período 2020-2021 foi realizada com sucesso. A inclusão dos dados discretizados da estação de Ponte Preta no modelo de previsão para Jequitibá foi considerada muito satisfatória, tendo em vista a melhora de desempenho do modelo.

Cabe ressaltar que, embora toda a operação do sistema de alerta 2020-2021 tenha sido efetuada durante a pandemia do coronavírus, as atividades de campo e de escritório foram realizadas satisfatoriamente, viabilizando a plena operação do Sistema de Alerta. Nesse contexto, o Serviço Geológico do Brasil – CPRM manteve suas atribuições institucionais, levantando e disponibilizando à sociedade brasileira as informações geradas pelo monitoramento hidrológico na bacia do rio das Velhas. Essas informações subsidiam as autoridades públicas, equipes da Defesa Civil e demais usuários e gestores de recursos hídricos, no processo de tomada de decisão para prevenir/mitigar efeitos causados por eventos de cheias.

A equipe da CPRM encontra-se à disposição para esclarecimentos e informações adicionais. O contato com o Sistema de Alerta Hidrológico da bacia do rio das Velhas pode ser realizado através do e-mail alerta.velhas@cprm.gov.br.

10. BIBLIOGRAFIA

A Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas. **CBH Rio das Velhas**. Disponível em: <<https://cbhvelhas.org.br/a-bacia-hidrografica-do-rio-das-velhas/>>. Acesso em: jun. 2020.

CASTILHO, A. S.; DAVIS, E. G. SACE. **Serviço Geológico do Brasil - CPRM**. Disponível em:

<https://www.cprm.gov.br/sace/conteudo/doce_artigos/artigo2003.pdf>.

Acesso em: jun. 2020.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre. ABRH. 2013.

CPRM. **Sistema de alerta hidrológico da bacia do rio das Velhas: relatório técnico de implementação e operação do sistema até o período de 2019-2020 inclusive**. Serviço Geológico do Brasil - CPRM. Belo Horizonte. 2020.

CPRM. **Sistema de Alerta contra Enchentes da Bacia do rio Doce - Relatório Técnico da Operação do Sistema de Alerta Período de Dezembro de 2004 a Março de 2005**. Serviço Geológico do Brasil - CPRM. Belo Horizonte. 2005.

CUNGE, J. A. On the subject of flood propagation computation method (Muskingun method). **Journal of Hydraulics Research**. Delft, v.7, n.2 p205-30. 1969.

TUCCI, C. E. M.; **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. ABRH; EDUSP. 1993.

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. 2ª ed. Editora UFRGS. 2005.

FREAD, D.L. Flow Routing in: MAIDMENT, D. R. **Handbook of Hydrology**. McGraw-Hill. [S.I.]. 1993.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. CPRM. [S.I.]. 2007.

SISTEMA de Alerta de Eventos Críticos - SACE. **Serviço Geológico do Brasil - CPRM**. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/sace/>>. Acesso em: abr. 2020.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1998.