

RELATÓRIO DE ATIVIDADES

DEPARTAMENTO DE HIDROLOGIA



SISTEMA DE ALERTA HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO BRANCO

Relatório Anual de operação 2021

Serviço Geológico do Brasil - CPRM
Dezembro de 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 BRANCO

Relatório Anual de operação 2021

REALIZAÇÃO

Divisão de Hidrologia Aplicada

AUTORES

Marcus Suassuna Santos

Luna Gripp Simões Alves

Mathieu Dias Girard

Artur José Soares Matos



SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL
CPRM

Brasília, dezembro de 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 DO SISTEMA DE ALERTA HIDROLÓGICO DO RIO BRANCO

Marcus Suassuna Santos

Luna Gripp Simões Alves

Jean Ricardo da Silva Nascimento

Artur José Soares Matos

ESTÁGIARIO

Mathieu Dias Girard

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

PROJETO DOS SISTEMAS DE ALERTAS HIDROLÓGICOS

SISTEMA DE ALERTA HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO BRANCO

Relatório Anual de operação 2021

REALIZAÇÃO

Divisão de Hidrologia Aplicada

AUTORES

Marcus Suassuna Santos

Luna Gripp Simões Alves

Mathieu Dias Girard

Artur José Soares Matos

FOTOS DA CAPA: Resgate de cachorros pela equipe do Núcleo de Apoio de Roraima da CPRM/MA com apoio de pescadores da região – Boa Vista, 11 de junho de 2021.

S237r Santos, Marcus Suassuna.

Relatório de atividades: Departamento de Hidrologia: sistema de alerta hidrológico da Bacia do Rio Branco: relatório anual de operação 2021 / Marcus Suassuna Santos ; Luna Gripp Simões Alves; Mathieu Dias Girard; Artur José Soares Matos . – Brasília: CPRM, 2021.

1 recurso eletrônico : PDF ; il. color.

ISBN 978-65-5664-196-6

1.Hidrologia. 2.Bacias hidrográficas. 3. Inundações. I. Alves, Luna Gripp Simões. II. Girard, Mathieu Dias. III. Matos, Artur José Soares. IV. Título.

CDD 551.48

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Gabriela Vieira Leitão CRB 1/1995

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 Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do Rio Branco (SAH Rio Branco) apresenta seu Relatório Anual de Operação de 2021. Neste relatório será apresentada uma descrição geral do monitoramento feito na bacia e um histórico da operação do SAH Branco. Será feita ainda uma caracterização da bacia em seus aspectos hidroclimatológicos, incluindo caracterização do clima, chuvas e hidrologia, com foco na caracterização das cheias. Será descrita também a cheia de 2021 no rio Branco, considerando as chuvas, vazões e níveis observados na bacia. Por fim, serão tratados aspectos relevantes da operação deste ano e a repercussão nos meios de comunicação.

RESUMO

A cheia de 2021 no rio Branco foi uma cheia com uma probabilidade de ocorrência anual de 16%. Ela foi causada por chuvas acima da média ao longo de vários meses, que fizeram com que o rio mantivesse níveis elevados ao longo de todo ano e uma umidade antecedente também alta. No início de junho, após chuvas não muito intensas porém contínuas, o rio alcançou níveis máximos anuais em quase todos os pontos de monitoramento. Esse período é relativamente cedo para ocorrência dos máximos anuais, que normalmente ocorrem em julho. Desde 2020, o SAH Branco iniciou a operação com horizontes de previsão de 15 dias, utilizando modelagem hidrológica chuva-vazão tendo como parâmetro de entrada um conjunto (*Ensemble*) de previsões. Isso fez com que, com maior antecedência, a equipe da CPRM tenha podido se comunicar com as autoridades locais acerca da possibilidade de inundação moderada que ocorreu. Essa atuação representa importante contribuição por parte da CPRM para um melhor gerenciamento das cheias no Estado. Tal fato só foi possível com a implantação de modelos de previsão chuva vazão, capazes de incorporar previsões de chuvas aos modelos hidrológicos operacionais na região.

ABSTRACT

The 2021 flood on the Branco river had an estimated probability of occurrence of 16%. It was caused by above-average rainfall over several months, which caused the river to maintain high levels throughout the year and an antecedent humidity that was also high. After not very heavy but continuous rains in early June, the river reached maximum levels at almost all monitoring points. This period is relatively early compared to its hydroclimatology, as floods usually occur in July in the Branco river catchment. Since 2020, SAH Branco has started an operation with a forecast horizon of 15 days, using hydrological rain-flow modelling and Ensemble precipitation forecasts as an input variable. This procedure meant that the CPRM team could communicate with the local authorities with a more significant lead time. This action represents an essential contribution to better flood management in the state. It was only possible with the implementation of rainfall forecast models, capable of incorporating the rainfall output to the hydrological models operating in the region.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. BACIA DO RIO BRANCO E MONIOTORAMENTO HIDROLÓGICO.....	13
3. HISTÓRICO DE OPERAÇÃO DO SAH BRANCO	16
4. HIDROCLIMATOLOGIA DA BACIA DO RIO BRANCO	17
4.1 Clima e pluviometria.....	17
4.2 Regime hidrológico	21
4.3 Análise de frequência de cheias	24
5. DESCRIÇÃO DA CHEIA DE 2021	26
5.1 Chuvas.....	27
5.2 Níveis e vazões dos rios	29
5.3 Impactos da cheia na bacia	33
6. OPERAÇÃO REALIZADA EM 2021.....	35
7. AGRADECIMENTOS AOS PARCEIROS	36
9. CONCLUSÕES	37
10. REFERÊNCIAS.....	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa da bacia do rio Branco, apresentando as estações de monitoramento e os limites da bacia hidrográfica.	14
Figura 2: Diagrama unifilar da bacia do rio Branco, com destaque para as estações de monitoramento, sedes municipais, os principais afluentes do rio, áreas de drenagem e distância entre as estações.	15
Figura 3: Mapa de climas de acordo com classificação de Koppen-Geiger na América do Sul (Fonte: Peel <i>et al.</i> , 2007).	18
Figura 4: Atlas pluviométrico do Brasil – Isoietas de totais anuais médios (1977 a 2006).	19
Figura 5: Atlas pluviométrico do Brasil com o recorte para a bacia do rio Branco – Chuva média de 235 milímetros.	19
Figura 6: Chuva média mensal – dados CHIRPS – período de 1981 a 2021.	20
Figura 7: Variação sazonal dos níveis nas estações do SAH Branco.	22
Figura 8: Frequência com que a máxima anual é observada em cada mês nas estações da bacia do rio Branco – em cada gráfico são indicados os meses, em coordenadas polares conforme o título e as cores de cada eixo; e o número de vezes em que a máxima anual é indicada na legenda.	23
Figura 9: Relação entre períodos de recorrência e vazões máximas anuais em Caracaraí.	25
Figura 10: Anomalias de precipitação na bacia do rio Branco ao longo do ano hidrológico 2020/2021 (Fonte do dado: https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_daily/tifs/p05/ , créditos ao analista em geociências pela CPRM Daniel Medeiros Moreira pela geração da figura).	28
Figura 11: Variação sazonal dos níveis e cotograma da cheia de 2021 na estação de Boa Vista.	29
Figura 12: Variação sazonal dos níveis e cotograma da cheia de 2021 na estação de Caracaraí.	30

Figura 13: Variação sazonal dos níveis e cotograma da cheia de 2021 na estação de Fazenda Passarão.	30
Figura 14: Variação sazonal dos níveis e cotograma da cheia de 2021 na estação de Ponte do Tacutu.	31
Figura 15: Variação sazonal dos níveis e cotograma da cheia de 2021 na estação de Vila Surumu.....	31
Figura 16: Variação sazonal dos níveis e cotograma da cheia de 2021 na estação de Vila Surumu.....	32
Figura 17: Variação sazonal dos níveis e cotograma da cheia de 2021 na estação de Fé e Esperança.	32
Figura 18: Fotos do monitoramento efetuado na bacia do rio Branco. (Fonte: Arquivos Núcleo de Apoio de Roraima da CPRM/MA).	34
Figura 19: Previsão de níveis em Caracaraí utilizando o modelo SMAP, previsão de precipitação por ensemble a partir do modelo GEFS, evapotranspiração do SSEBOP e chuvas do MERGE/INPE.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estações de Monitoramento Fluviométrico de interesse na bacia do rio Branco.....	14
Tabela 2: Municípios atendidos com previsão hidrológica e dados gerais dos municípios.....	16
Tabela 3: Altura de chuvas na estação de Boa Vista em 24 horas para diferentes períodos de retorno.....	20
Tabela 4: Vazões e Cotas máximas anuais (em m ³ /s e cm, respectivamente) em Caracaraí.....	24
Tabela 5: Parâmetros ajustados da distribuição GEV, utilizando o método da máxima verossimilhança aos dados de Caracaraí.....	26
Tabela 6: Vazão e nível máximo observado em 2021 nas estações de monitoramento e estimativa do seu período de retorno e probabilidade de ocorrência da cheia observada em 2021 em Caracaraí.	33
Tabela 7: Danos humanos, materiais e econômicos informados na bacia do rio Branco pelo Relatório Gerencial da defesa civil nacional (Fonte: Brazil, 2021, disponível em s2id.mi.gov.br)	34

1. INTRODUÇÃO

O Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do Rio Branco (SAH Rio Branco) apresenta seu Relatório Anual de Operação de 2021. Neste relatório será apresentada uma descrição geral do monitoramento feito na bacia e um histórico da operação do SAH Branco. Será feita ainda uma caracterização da bacia em seus aspectos hidroclimatológicos, incluindo caracterização do clima, chuvas e hidrologia, com foco na caracterização das cheias. Será descrita também a cheia de 2021 no rio Branco, considerando as chuvas, vazões e níveis observados na bacia, além dos impactos das cheias sobre a população. Por fim, serão tratados aspectos relevantes da operação deste ano e a repercussão nos meios de comunicação.

2. BACIA DO RIO BRANCO E MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

O rio Branco é formado pela junção dos rios Tacutu e Urariquera e tem sua foz na margem esquerda do rio Negro na divisa entre os estados de Roraima e Amazonas. Ao longo de seu trajeto, ele banha os municípios de Boa Vista, Bonfim, Cantá, Mucajaí, Iracema, Caracará e Rorainópolis. Na Figura 1 é exibido um mapa da bacia do rio Branco. Nele, são apresentadas as estações que compõem a rede de monitoramento da região. Dados dessas estações são detalhados na Tabela 1. Os principais afluentes do rio Branco por sua margem direita são os rios Mucajaí, Cauamé, Ajarani, Água Boa do Univini, Catrimâni, Xeriuini. Já pela margem esquerda, os principais afluentes são os rios Sucuriju, Igarapé Quitauaú, Anauá, e Itapará. Vale mencionar também o rio Surumu, que é afluente do do rio Tacutu por sua margem direita.

Como o principal recurso hídrico do estado de Roraima, recebe importante impacto da ação antrópica, estando em sua margem direita a capital Boa Vista (com 284.313 habitantes), onde vive mais da metade da população do estado, que possui 450.479 habitantes (IBGE, 2010).

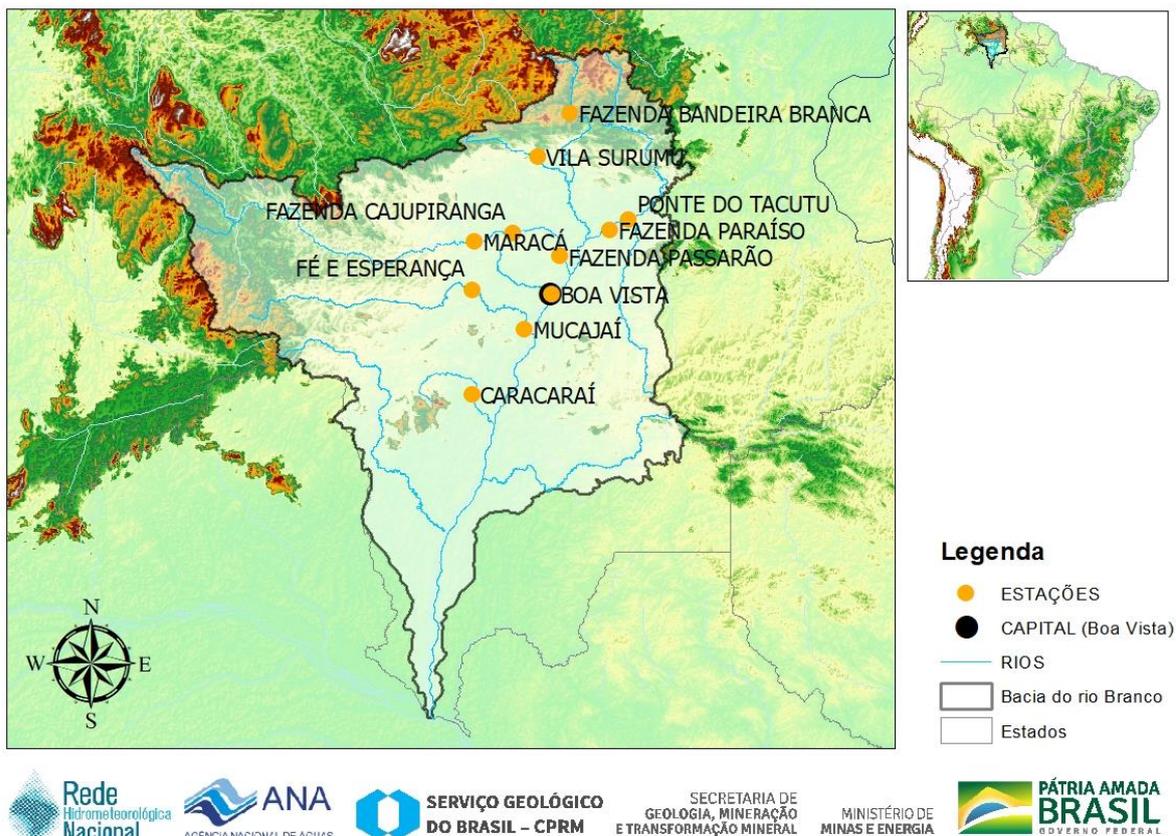


Figura 1: Mapa da bacia do rio Branco, apresentando as estações de monitoramento e os limites da bacia hidrográfica.

Tabela 1: Estações de Monitoramento Fluviométrico de interesse na bacia do rio Branco.

Nome	Código	Rio	Município	Área (km ²)
BOA VISTA	14620000	BRANCO	BOA VISTA	97.200
CARACARAÍ	14710000	BRANCO	CARACARAÍ	126.000
VILA SURUMU	14530000	SURUMU	PACARAIMA	2.280
PONTE DO TACUTU	14527000	TACUTU	NORMÂNDIA	24.300
MARACÁ	14489000	URARICOERA	ALTO ALEGRE	26.700
FAZENDA CAJUPIRANGA	14495000	URARICOERA	ALTO ALEGRE	36.900
FAZENDA PASSARÃO	14515000	URARICOERA	BOA VISTA	50.200
FÉ E ESPERANÇA	14680001	MUCAJAÍ	MUCAJAÍ	12.200
MUCAJAÍ	14690000	MUCAJAÍ	MUCAJAÍ	19.800

Elaborado pelo Autor (2021)

Na Figura 2 a bacia é representada por meio do diagrama unifilar. Esse diagrama é uma representação cartográfica, sintética e esquemática da organização estrutural da rede fluvial. Nessa representação, os rios são representados por linhas conectados por nós, que representam as confluências. No diagrama unifilar do rio Branco, também são indicadas informações das estações de

monitoramento da bacia, incluindo seu nome, código e área de drenagem, os nomes dos rios e as distâncias entre as estações. Além disso, as sedes municipais são indicadas por círculos.

A distância de aproximadamente 135 km que separa as estações de Caracará e Brasília, em média é percorrida em 36 horas pelas águas do rio Branco, enquanto os 130 km que separam Ponte do Tacutu e Boa Vista, em 17 horas. Essas defasagens de tempo são utilizadas para prever os níveis do rio Branco em Caracará e Rio Branco.

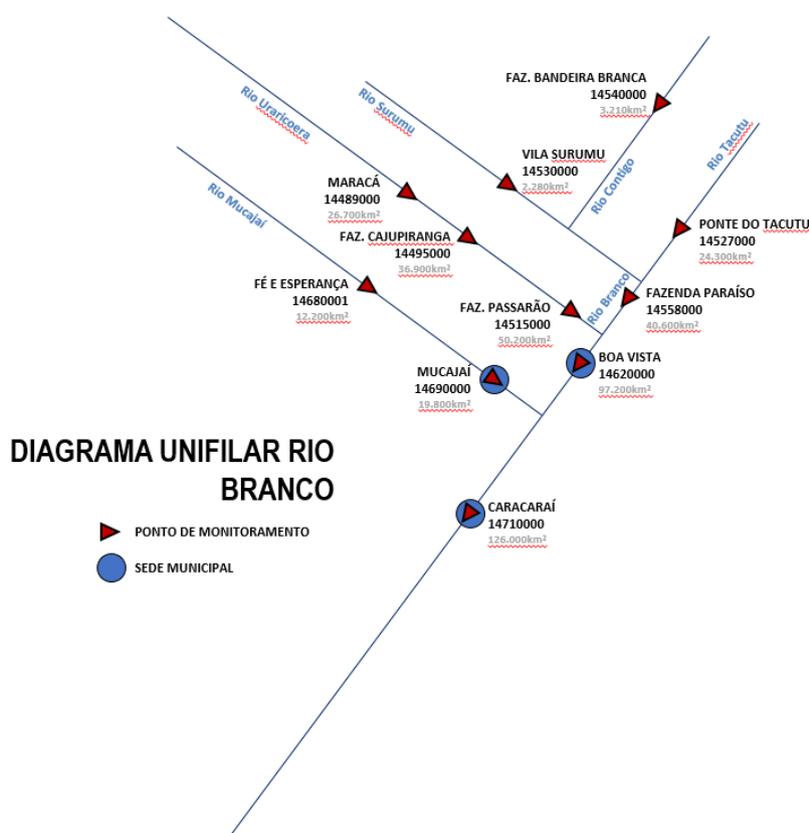


Figura 2: Diagrama unifilar da bacia do rio Branco, com destaque para as estações de monitoramento, sedes municipais, os principais afluentes do rio, áreas de drenagem e distância entre as estações.

Em termos de vulnerabilidade a inundações, as localidades onde há maior risco na bacia são as sedes municipais de Boa Vista e Caracará. Na Tabela 2 são indicadas as populações desses municípios e os níveis de referência utilizados para o monitoramento da bacia ao longo do período de cheias. Vale resgatar que, pelas definições hoje adotadas pela CPRM: a cota de inundação é aquela em que o primeiro dano é observado no município; a cota de alerta indica que há

possibilidade elevada de ocorrência de inundação; e a cota de atenção indica que há possibilidade moderada de ocorrência de inundação.

Tabela 2: Municípios atendidos com previsão hidrológica e dados gerais dos municípios.

Municípios	População (IBGE, 2010)	Cota de referência (m)		
		Atenção	Alerta	Inundação
Boa vista	284.313	7,5	8	8,5
Caracaráí	18.398	8	8,5	9

Elaborado pelo Autor (2021)

3. HISTÓRICO DE OPERAÇÃO DO SAH BRANCO

Em 2011, o estado de Roraima enfrentou a sua pior enchente desde a cheia histórica anterior, ocorrida em 1976. Praticamente todos os municípios entraram em situação de emergência, e comunidades ficaram em isolamento total em razão das fortes chuvas que ocorreram no mês de junho. O Estado de Roraima chegou a ter estado de calamidade pública decretado.

A região sul do estado foi a mais afetada em razão da cheia. Das 15 comunidades do baixo rio Branco, pelo menos a metade ficou inundada e apenas Boa Vista e Pacaraima não decretaram situação de emergência. Na capital, 113 pessoas que perderam suas casas ficaram desabrigadas e 238 desalojadas. A BR-174, principal rodovia do estado, ficou com o tráfego interrompido, e houve risco de rompimento da principal ponte sobre o rio Branco, na altura da cidade de Caracaráí.

A partir daí, observou-se a necessidade de implantação do Sistema de Alerta Hidrológico do rio Branco. O sistema de previsão e alerta de cheias implantado na bacia em 2015 objetiva colaborar para a redução do risco de perda de vidas e prejuízos materiais, dotando as comunidades e os serviços de emergência de tempo para se prepararem para a inundação e proteger os bens materiais. Além disso, a partir do monitoramento contínuo das principais estações da bacia, representa uma fonte de informação detalhada para futuros estudos hidrológicos e o aprimoramento de técnicas relacionadas.

Desde então, os modelos de previsão foram aperfeiçoados e novas abordagens também foram incorporadas ao monitoramento. A principal dessas novas abordagens, incorporada operacionalmente ao boletim em 2020, foi a utilização do modelo hidrológico SMAP. Nessa abordagem, são utilizados: dados de evapotranspiração do produto SSEBOP (SENAY *et al.*, 2013, 2007), disponibilizado

pelo o USGS; estimativas de chuvas utilizando-se o produto MERGE/INPE (ROZANTE *et al.*, 2010); e previsão de chuvas por *Ensemble* com modelo meteorológico GEFS (ZHU *et al.*, 2018).

Desde 2015, primeiro ano da operação do SAH, o rio Branco ultrapassou a cota de inundação de 8,50 metros em Boa Vista em 2017, quando atingiu a cota máxima anual de 8,64 m, e neste ano de 2021, quando o rio atingiu a cota de 8,56 m. Já em Caracaraí, o rio ultrapassou a cota de inundação de 9,0 m em 2017 e 2018, quando atingiu a cota máxima anual de 9,59 m e 9,62, respectivamente, e também neste ano de 2021, quando o rio atingiu a cota de 9,47 m.

A frequência com que inundações são observadas na bacia, com significativos danos à comunidade, justifica sua priorização como uma das bacias a serem objeto de sistemas de alertas de cheias por parte da CPRM, que desde 2015 vem avançando na melhoria de seus sistemas de coleta e transmissão de dados, modelagem hidrológica e comunicação de risco de inundação

4. HIDROCLIMATOLOGIA DA BACIA DO RIO BRANCO

Neste capítulo, será feita uma breve descrição das principais características hidroclimatológicas da bacia do rio Branco. Características gerais do clima da região serão apresentados, incluindo-se: os principais elementos geradores de chuvas na região; regime pluviométrico; e regime hidrológico, com foco na ocorrência de cheias.

4.1 CLIMA E PLUVIOMETRIA

A bacia do rio Branco, ocupa praticamente toda extensão do Estado de Roraima, e encontra-se em uma região de clima Tropical de três sub-tipos, conforme a classificação de Koppen-Geiger (Figura 3). Em uma área de aproximadamente 190.000 km² são observadas características típicas de Floresta Tropical (clima do tipo Af, onde no mês mais seco chove ao menos 60 mm), Savana (Aw, onde no mês mais seco não ocorre praticamente nenhuma chuva) e clima Tropical de Monção (Am – que é um clima intermediário entre a Floresta Tropical e a Savana) (PEEL *et al.*, 2007).

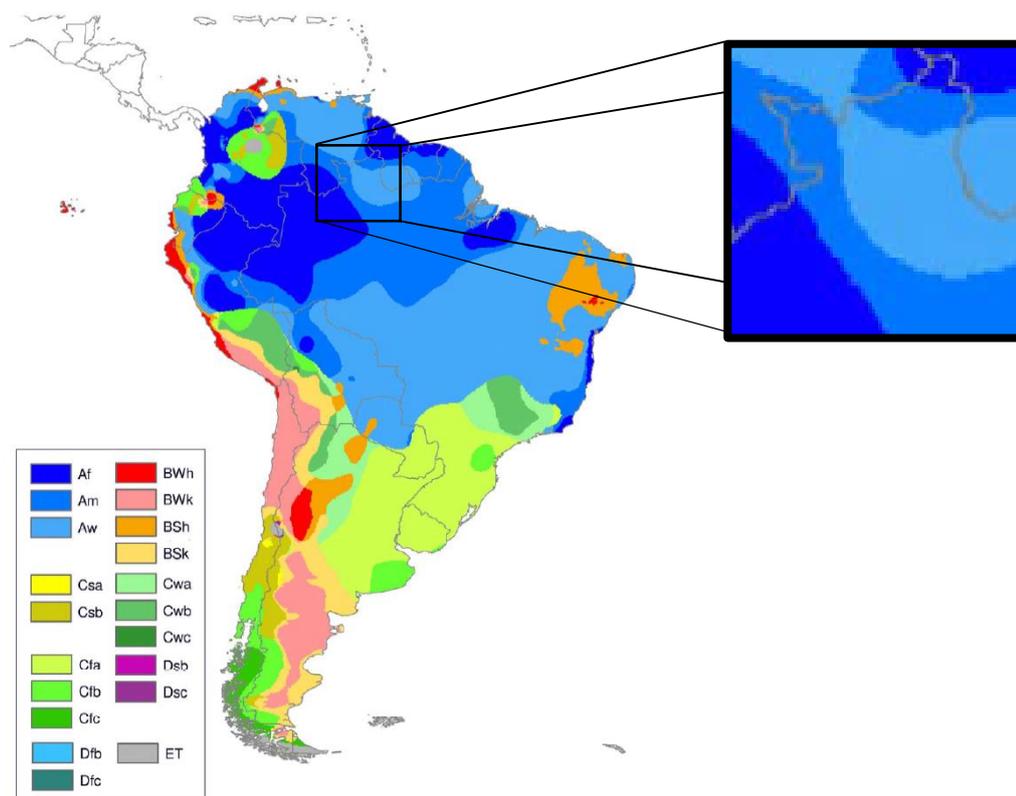


Figura 3: Mapa de climas de acordo com classificação de Köppen-Geiger na América do Sul (Fonte: PEEL *et al.*, 2007).

Dados do Atlas Pluviométricos do Brasil (CPRM, 2011), indicam acumulados na bacia da ordem de 1.980 mm ao ano (Figura 4). Em alguns pontos, essa precipitação pode chegar a 2.500 mm ao ano, principalmente nas nascentes dos rios Uraricoera e Surumu. Já nas proximidades de Boa Vista esse valor se reduz a cerca de 1.700 mm ao ano e em alguns pontos da bacia chega a valores próximos de 1.500 mm/ano. As médias de precipitações indicadas pelo Atlas são referentes ao período de 1977 a 2006.

Dados do estimador de chuvas CHIRPS (FUNK *et al.*, 2015) também foram utilizados para caracterizar a chuva na região (Figura 5). De acordo com esse produto, cerca de 1810 mm são estimados por ano na bacia. Essas diferenças entre as estimativas anuais do ATLAS e do CHIRPS podem decorrer tanto das diferentes formas de estimativa das cheias, quanto do período de observação das chuvas. De acordo com esse produto, o trimestre entre maio e julho é o mais chuvoso na bacia, totalizando cerca de 870 mm

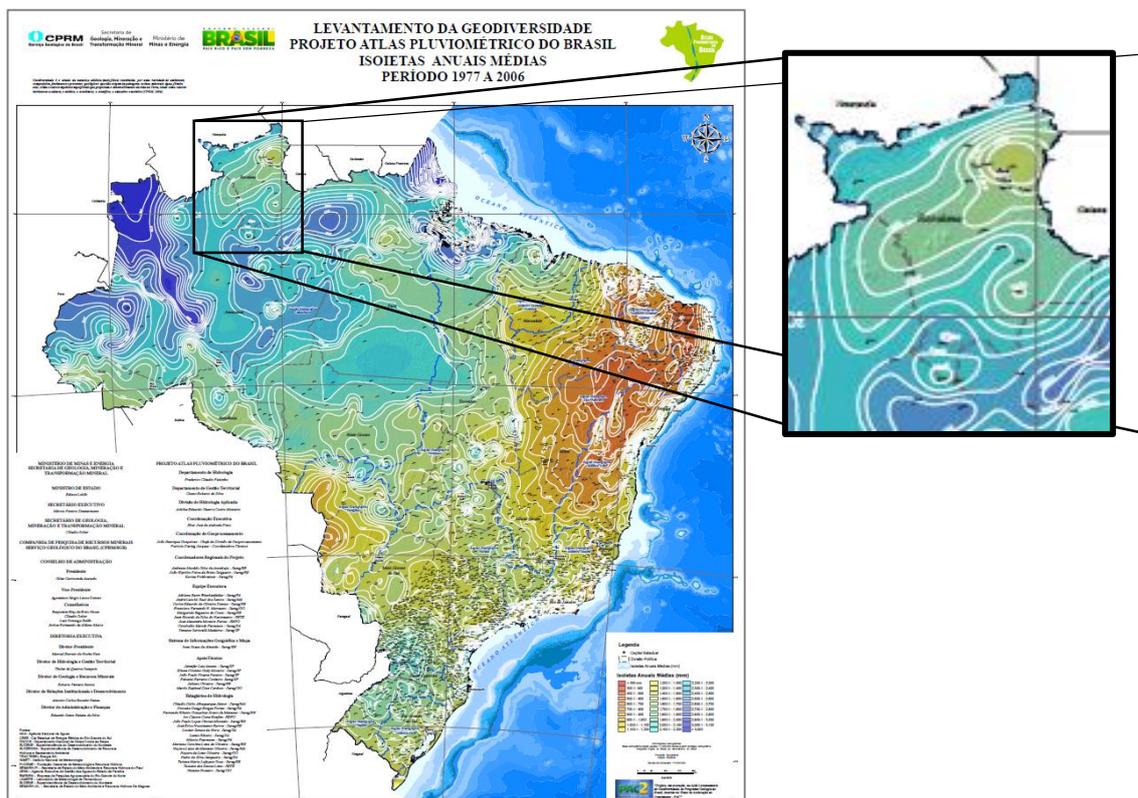


Figura 4: Atlas pluviométrico do Brasil – Isoietas de totais anuais médios (1977 a 2006).

Acumulados mensais entre JFM na bacia do rio Branco - Atlas pluviométrico CPRM

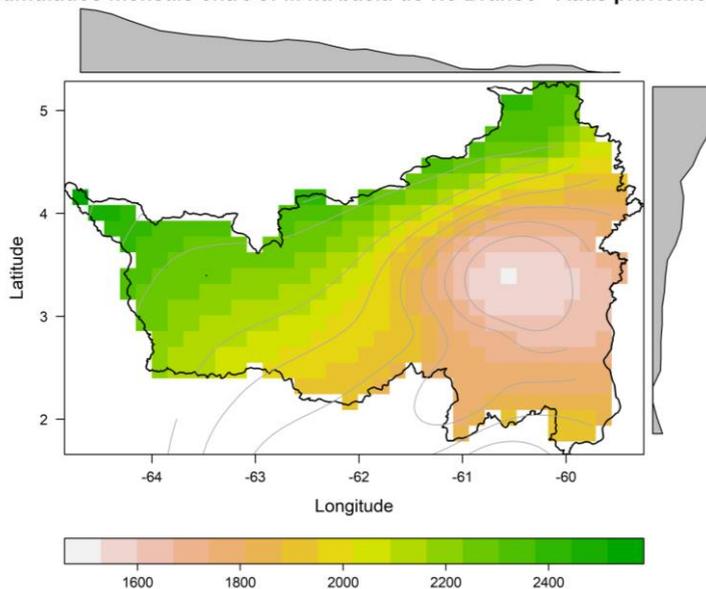


Figura 5: Atlas pluviométrico do Brasil com o recorte para a bacia do rio Branco – Chuva média de 235 milímetros.

Com base nos dados de chuvas apresentados na Figura 5, na média, a bacia tem características limites entre um clima de *floresta tropical* e de clima de *monção*,

pelos critérios definidos por Peel *et al.* (2007). Esses autores estipulam que em um clima de *floresta tropical*, o mês mais seco do ano apresenta chuvas superiores a 60 mm. Como na bacia do rio Branco, o mês de fevereiro apresenta esse valor como o valor climatológico da chuva acumulada mensal, a bacia estaria em um ponto de transição. Além disso, como a chuva do mês mais seco (60 mm) é maior do que o valor da expressão $100\text{ mm} - \text{ChuvaAnual}/25 = 27\text{ mm}$, o clima não se enquadraria como clima de *savana*, sendo mais próximo de climas típicos de *monção*.

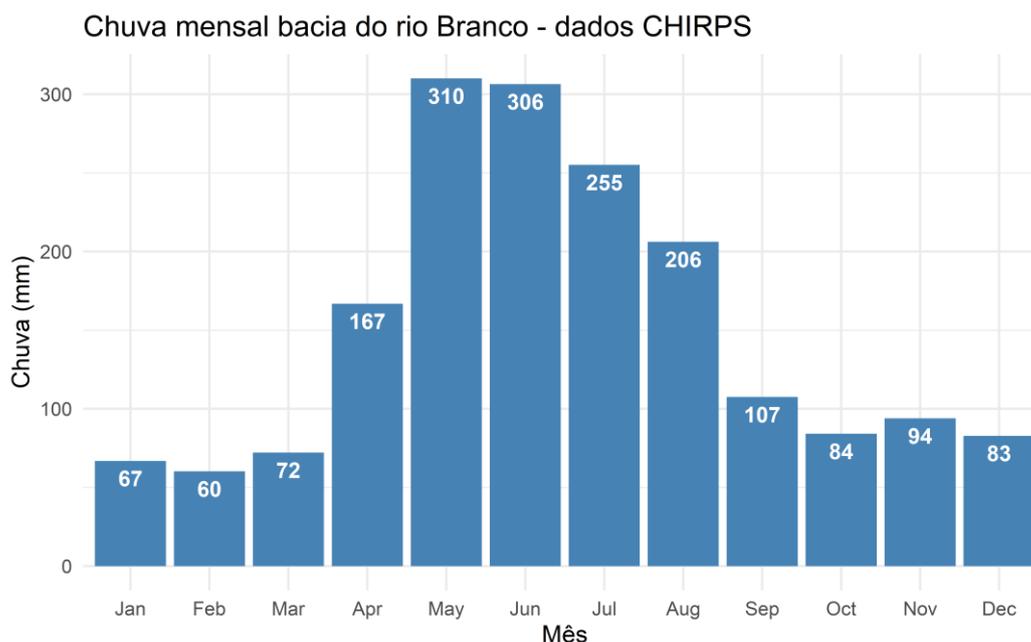


Figura 6: Chuva média mensal – dados CHIRPS – período de 1981 a 2021.

No que diz respeito às chuvas intensas na área de estudo recorreu-se também aos resultados do Atlas Pluviométrico (CPRM, 2011). No Atlas, as chuvas intensas são caracterizadas por meio das equações intensidade-duração-frequência (Equações – IDF). No Estado de Roraima as curvas IDF estão disponíveis em Boa Vista. Tabela 3 são apresentadas as saídas das curvas IDF para a duração de 24 horas. Por essa tabela, observa-se, por exemplo, que a chuva de Tempo de Recorrência de 2 anos (à qual corresponde a uma chance de 50% de ocorrer anualmente) é de 92,4 mm em 24 horas.

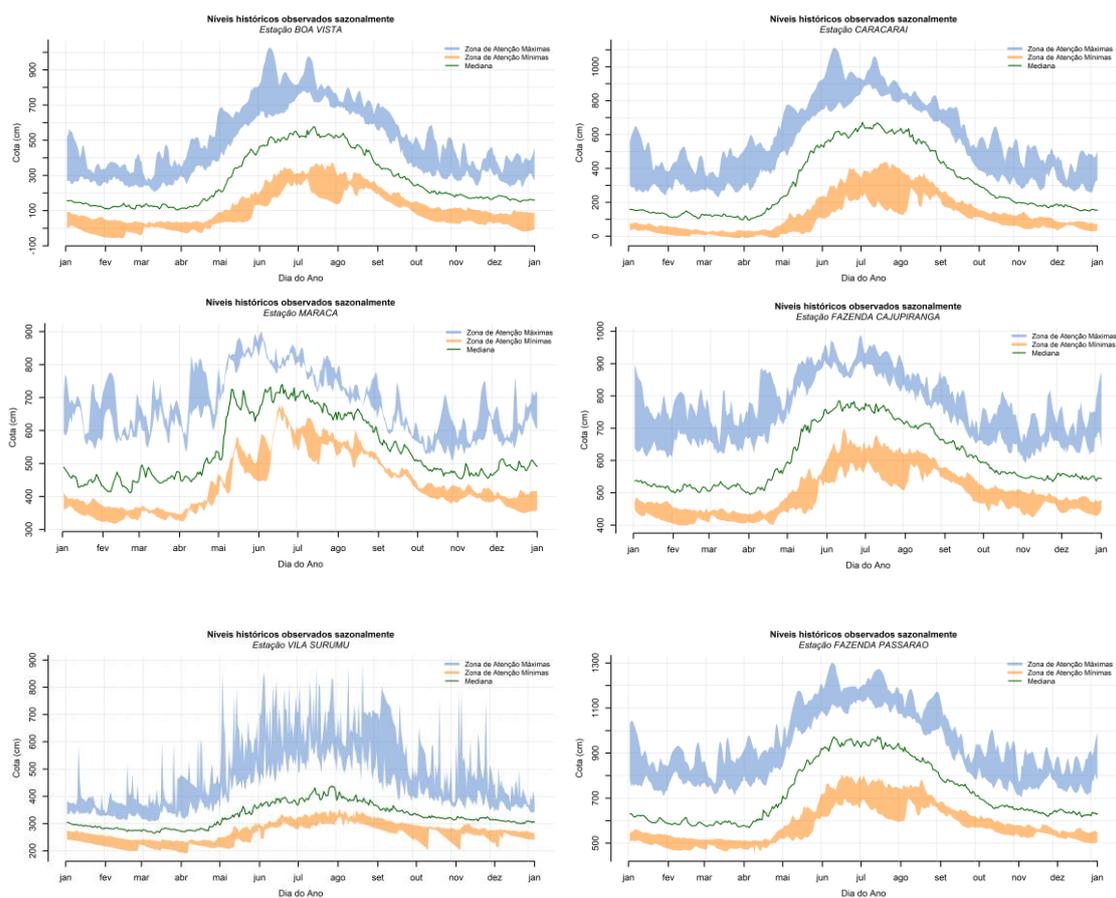
Tabela 3: Altura de chuvas na estação de Boa Vista em 24 horas para diferentes períodos de retorno.

Tempo de Retorno (anos)	Altura de chuva em mm											
	2	5	10	15	20	25	40	50	60	75	90	100
BOA VISTA	92,4	107	120	128	135	140	144	148	156	161	167	172

Fonte: CPRM (2011).

4.2 REGIME HIDROLÓGICO

Como foi visto no tópico anterior, a bacia tem características de transição entre um clima *Tropical de Monção e Floresta Tropical*, em que, climatologicamente, 60% das chuvas anuais se concentram em um período de 4 meses, entre maio e agosto e com 60 mm de chuva no mês mais seco do ano (Figura 6). Essa característica condiciona a hidrologia regional. Na Figura 7 são apresentadas as variações anuais de níveis nas principais estações fluviométricas instaladas ao longo da calha do rio Branco e em seus afluentes. Em todas elas, a característica de um período chuvoso bem definido, se vê refletida na oscilação dos níveis nos rios. Níveis mais baixos são observados entre outubro e abril, com um pulso anual de vazões entre maio e setembro.



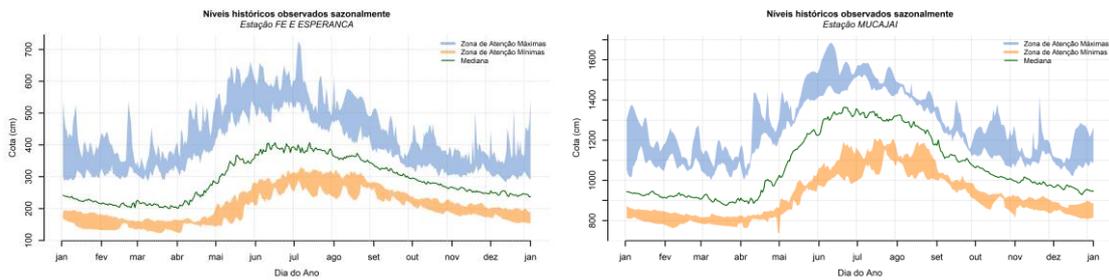
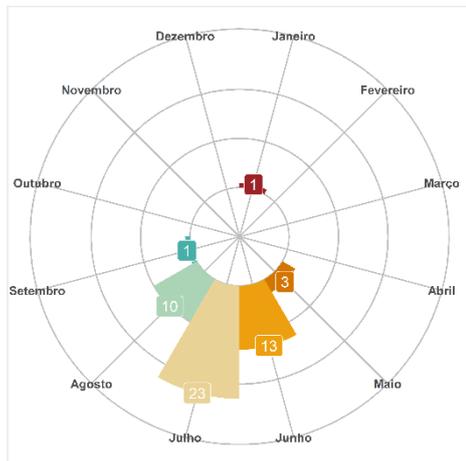


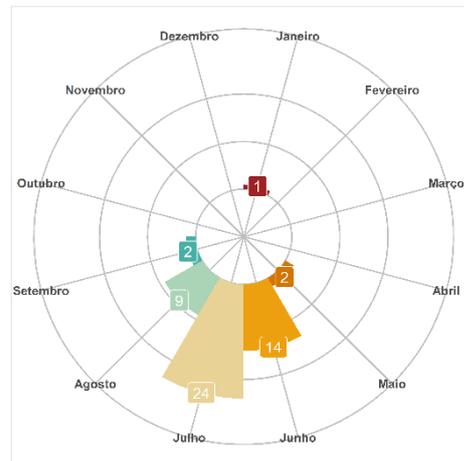
Figura 7: Variação sazonal dos níveis nas estações do SAH Branco.

Esse pulso anual resulta em níveis máximos anuais concentrados também entre junho, julho e agosto. A Figura 8 detalha esse comportamento temporal dos níveis nos rios, indicando o mês em que os níveis máximos anuais são observados. Em praticamente todas as estações, o mês em que é mais frequente se observar os níveis máximos anuais é o mês de julho, seguido pelo mês de junho. Nesses meses, as duas principais condições para formação das cheias na bacia estão presentes: umidade suficiente armazenada no solo da bacia, ao longo dos meses chuvosos de maio e junho; e chuvas intensas em períodos mais curtos no mês de julho.

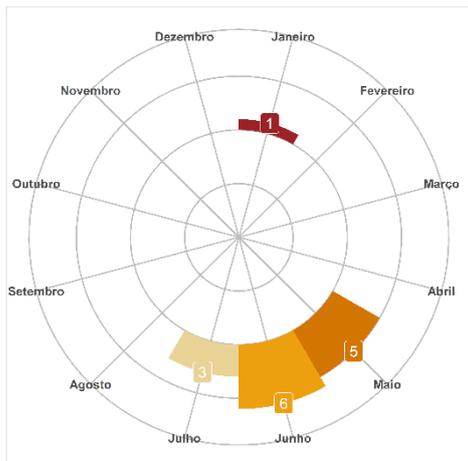
Mês das máximas cotas anuais em BOA VISTA - 14620000



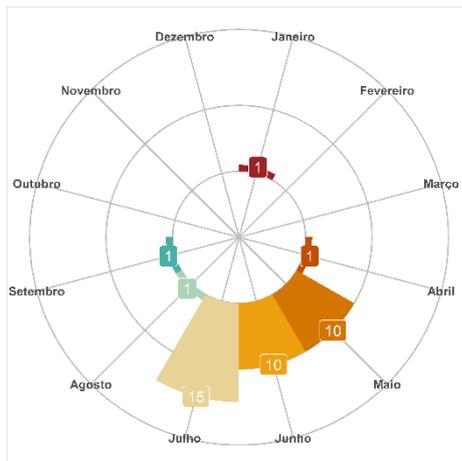
Mês das máximas cotas anuais em CARACARAI - 14710000



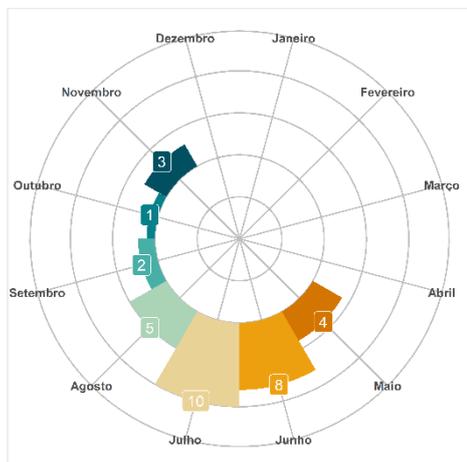
Mês das máximas cotas anuais em MARACA - 14489000



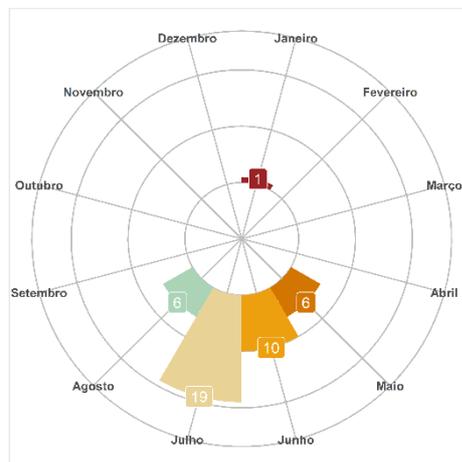
Mês das máximas cotas anuais em FAZENDA CAJUPIRAN



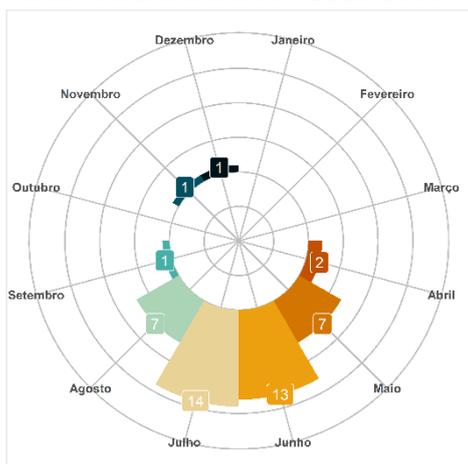
Mês das máximas cotas anuais em VILA SURUMU - 145301



Mês das máximas cotas anuais em FAZENDA PASSARAO



Mês das máximas cotas anuais em FE E ESPERANCA - 14



Mês das máximas cotas anuais em MUCAJAI - 14690000

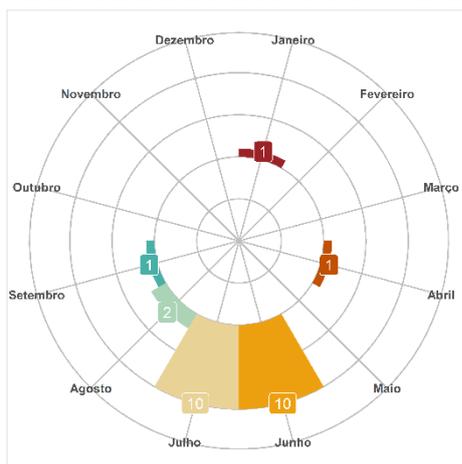


Figura 8: Frequência com que a máxima anual é observada em cada mês nas estações da bacia do rio Branco – em cada gráfico são indicados os meses, em coordenadas polares conforme o título e as cores de cada eixo; e o número de vezes em que a máxima anual é indicada na legenda.

4.3 ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE CHEIAS

Neste tópico serão apresentadas estatísticas de níveis e vazões máximos anuais e a análise de frequência de vazões extremas com foco na estação de Caracaraí. Essa análise será utilizada para que se tenha uma referência da magnitude da cheia observada em 2021. A seleção da estação de Caracaraí se justifica em razão do tamanho da série histórica de vazões. A estação de Boa Vista apresenta uma série histórica de vazões que se inicia apenas em 2015 e para análises de frequência é um período muito curto para que se possa analisar a frequência de máximas anuais. Ainda assim, a análise feita em Caracaraí é útil como indicadora do que ocorreu na bacia em 2021.

As vazões e níveis máximos anuais são apresentados na Tabela 4. Nessa tabela, são apresentados esses valores e também o ranking de cada cheia, indicando, por exemplo, a cheia de 2011, quando o rio Branco atingiu a cota de 11,13 m e aproximadamente 16.000 m³/s, como a maior cheia do histórico de Caracaraí. A partir desses valores serão feitas as análises de frequência de cheias para esses locais.

Tabela 4: Vazões e Cotas máximas anuais (em m³/s e cm, respectivamente) em Caracaraí.

Ano	Data	Vazão Máxima	Cota Máxima	Ranking	Ano	Data	Vazão Máxima	Cota Máxima	Ranking
1967	17/04/1967	12318	936	8	1994	22/04/1994	9342	780	30
1968	04/03/1968	13278	983	3	1995	01/03/1995	9163	770	32
1969	24/12/1969	8703	744	37	1996	27/12/1996	11957	918	9
1970	04/02/1970	9127	768	33	1997	29/12/1997	6552	614	50
1971	06/01/1971	11406	890	11	1998	24/03/1998	8477	731	38
1972	14/12/1972	8168	713	42	1999	02/04/1999	10334	834	22
1973	25/03/1973	7730	687	43	2000	24/03/2000	10865	862	16
1974	01/06/1974	9396	783	29	2001	13/04/2001	6646	620	49
1975	27/04/1975	10617	849	18	2002	05/03/2002	11445	892	10
1976	27/11/1976	14958	1062	2	2003	05/03/2003	8322	722	40
1977	02/04/1977	9432	785	28	2004	21/02/2004	8879	754	35
1978	08/03/1978	8897	755	34	2005	06/04/2005	10372	836	21
1979	04/03/1979	10941	866	15	2006	13/04/2006	13051	972	4
1980	17/03/1980	9687	799	26	2007	11/03/2007	11211	880	12
1981	27/03/1981	12540	947	5	2008	15/04/2008	10865	862	17
1982	27/11/1982	7269	659	47	2009	09/12/2009	7107	649	48
1983	28/02/1983	4228	452	55	2010	25/02/2010	10166	825	24
1984	20/04/1984	7630	681	45	2011	15/02/2011	16086	1113	1
1985	24/04/1985	9252	775	31	2012	29/11/2012	9559	792	27
1986	11/05/1986	10260	830	23	2013	05/02/2013	8288	720	41

Ano	Data	Vazão Máxima	Cota Máxima	Ranking	Ano	Data	Vazão Máxima	Cota Máxima	Ranking
1987	17/04/1987	7663	683	44	2014	20/03/2014	5382	536	52
1988	08/04/1988	9999	816	25	2015	28/12/2015	5953	604	51
1989	04/02/1989	11153	877	13	2016	16/02/2016	8705	774	36
1990	08/01/1990	11057	872	14	2017	22/12/2017	12388	959	7
1991	09/12/1991	10617	849	19	2018	04/04/2018	12454	962	6
1992	24/02/1992	4682	486	54	2019	06/04/2019	8342	754	39
1993	08/01/1993	7301	661	46	2020	20/03/2020	10484	868	20

Elaborado pelo Autor (2021)

Os mesmos dados de vazões apresentados na Tabela 4 são apresentados de forma gráfica na Figura 9. Na figura, também são apresentadas estimativas de períodos de frequência empírica, estimados pela expressão de Cunnane, que fornece uma forma de se estimar quantis empíricos aproximadamente não-enviesados para quase todas as distribuições de probabilidades (NAGHETTINI; PINTO, 2007; STEDINGER *et al.*, 1993). Nessa tabela são indicados ainda em cores a comparação da máxima anual com as cotas de referência (atenção, alerta e inundação). Observa-se assim que em 9 dos 54 anos do histórico o rio ultrapassou a cota de referência de inundação de 9,0 metros.

Vale mencionar que as análises de frequência de valores extremos são feitas com base nas séries de vazões máximas anuais consistidas, disponíveis no banco de dados HidroWeb (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2017). Devido a eventuais mudanças de posição das estações, bem como devido à geometria não uniforme no trecho superior das calhas dos rios, quando as vazões extravasam a calha, a análise de frequência de cotas não é recomendável.

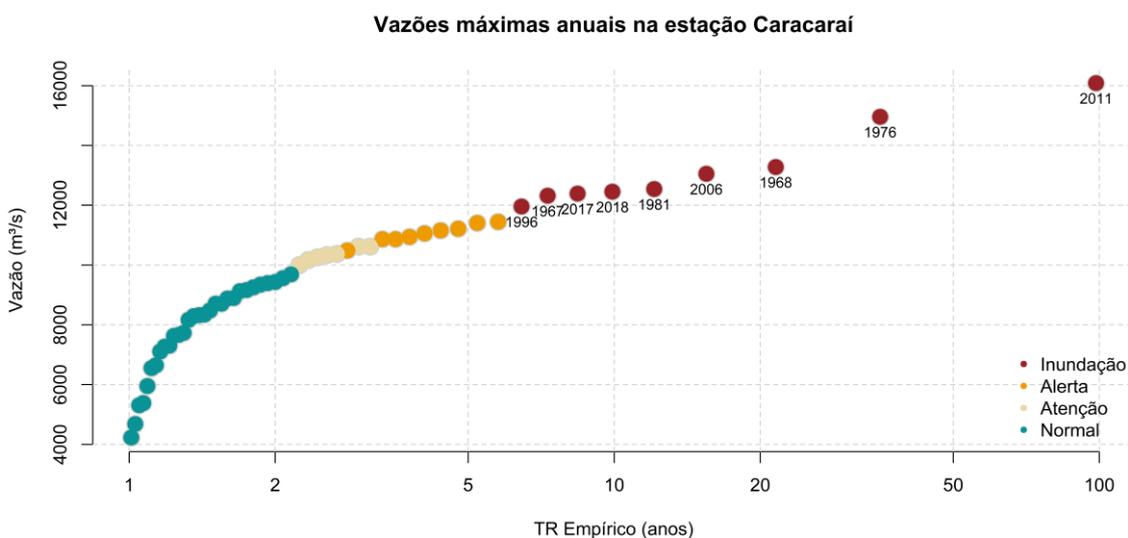


Figura 9: Relação entre períodos de recorrência e vazões máximas anuais em Caracarái.

Para a análise de frequência, utilizou-se o pacote *extRemes*, disponibilizada para o *software* livre *R* (GILLELAND; KATZ, 2016). Os parâmetros foram estimados utilizando-se o método da Máxima Verossimilhança (STEDINGER *et al.*, 1993). Em todos os casos, foi utilizada distribuição de Generalizada de Valores Eventos (GEV), uma vez que em todas as estações, testes da razão de máxima verossimilhança indicaram que ela é uma distribuição plausível quando comparada com a distribuição de Gumbel (versão simplificada da GEV, com 2 parâmetros).

Vale lembrar que a distribuição de probabilidades de Gumbel é um caso específico da distribuição GEV, em que o parâmetro de forma é igual a zero (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Sendo assim, foi feito o teste de máxima verossimilhança, testando-se a hipótese nula de se utilizar a distribuição GEV (GILLELAND; KATZ, 2016) e em todas as estações do rio Branco, o teste resultou que o uso da distribuição GEV é mais adequado. Sendo assim, na Tabela 5 são apresentados os parâmetros ajustados da distribuição, utilizando-se o método da máxima verossimilhança. Esses parâmetros serão utilizados para as estimativas de tempos de retorno das vazões observadas em 2021 mais adiante neste relatório.

Tabela 5: Parâmetros ajustados da distribuição GEV, utilizando o método da máxima verossimilhança aos dados de Caracaráí.

Estação	Parâmetro de posição	Parâmetro de escala	Parâmetro de forma
CARACARÁÍ	8714	2415	-0,24

Elaborado pelo Autor (2021)

5. DESCRIÇÃO DA CHEIA DE 2021

Neste capítulo serão descritas as principais características da cheia de 2021, com destaque a uma descrição geral das precipitações observadas e comparação da máxima chuva anual com a curva IDF; comparação da cheia de 2021 com o histórico das cheias anteriores; descrição geral dos danos observados na bacia do rio Branco.

5.1 CHUVAS

Do ponto de vistas das chuvas, o ano hidrológico de 2020-2021 foi marcado por chuvas acima da média ao longo de praticamente os 12 meses entre novembro /2020 a outubro de 2021 (Figura 10). Segundo o estimador de chuvas CHIRPS (FUNK *et al.*, 2015), entre novembro e janeiro, foi observada uma anomalia na bacia de cerca de 230 mm. Isso fez com que o rio alcançasse níveis acima da média em janeiro. Ao longo do período entre março e julho, a anomalia de chuva média na bacia foi estimada em cerca de 350 mm. Em abril, essa anomalia fez com que o rio novamente tivesse fortes repiques, alcançando os níveis mais elevados do histórico de abril. Novamente no mês de maio os acumulados de chuva alcançaram valores próximos de 400 mm, mais de 80 mm acima do total esperado para o mês mais chuvoso do ano.

Ressalte-se que, em termos de chuvas intensas, no dia 08 de abril a máxima precipitação anual foi registrada no pluviômetro de Boa Vista, quando foi registrado um evento de 94,2 mm de chuvas em 24 horas. Em junho, o evento de chuva mais intenso na bacia foi observado. Ele foi registrado em 18 de junho no pluviômetro situado em Fazenda Cajupiranga, quando 155 mm de chuva foram registrados em 24 horas.

Interessante observar que as datas da ocorrência das chuvas mais intensas na bacia do rio Branco não coincidem com os níveis máximos observados neste ano. Isso ocorre porque não só uma chuva intensa no período de 24 horas por exemplo que determina a formação das chuvas na bacia, mas também: a umidade do solo antecedente a chuva observada ao longo de uma sequência de dias; e as chuvas observadas em toda área da bacia, e não apenas pontualmente em Boa Vista ou Caracaraí ou em qualquer outra localidade. Esse comportamento é ilustrado pela chuva máxima observada em 24 horas em: Boa Vista, ocorrida em abril, meses antes do pico de cheia anual observada no início de junho; em Caracaraí, onde a chuva máxima em 24 horas foi observada em 18 de junho, depois da data da cota máxima anual, observada em 12 de junho; ou até mesmo da chuva máxima em 24 horas na bacia, observada em Fazenda Cajupiranga, também depois da ocorrência das vazões e níveis máximos anuais na bacia.

Anomalia de chuva CHIRPS nos últimos 12 meses para CARACARAÍ"-14710000

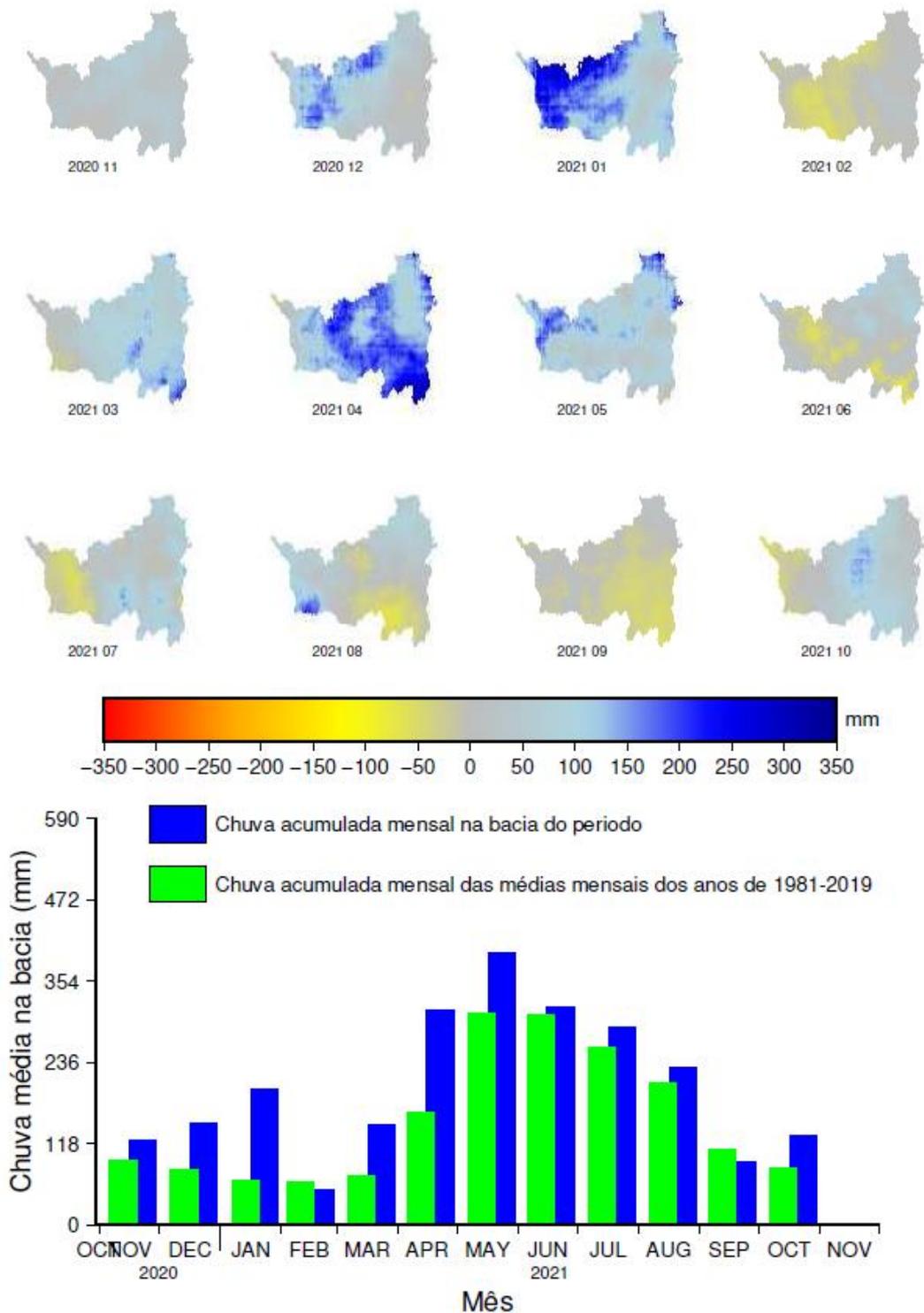


Figura 10: Anomalias de precipitação na bacia do rio Branco ao longo do ano hidrológico 2020/2021 (Fonte do dado: https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_daily/tifs/p05/, créditos ao analista em geociências pela CPRM Daniel Medeiros Moreira pela geração da figura).

5.2 NÍVEIS E VAZÕES DOS RIOS

Com relação aos níveis e vazões máximas observadas no ano de 2021, da Figura 11 até a Figura 17, são apresentados os cotagramas das cheias de 2021 com a referência histórica para a respectiva estação ao fundo. Nessas figuras, a faixa azul remete a permanências em níveis elevados, onde se situam 10% dos níveis mais elevados dos rios naquele dia, cheias mais altas e a faixa laranja remete a permanências em níveis reduzidos, onde se situam 10% dos níveis mais baixos dos rios naquele dia.

A cheia deste ano no rio Branco ultrapassou o nível de inundação em junho de 2021 em Boa Vista e Caracaraí. Ele alcançou seu nível máximo nesses dois locais nos dias 10 e 12 de junho, respectivamente (Tabela 6). Observa-se ainda por essas figuras que o rio Branco e seus afluentes mantiveram-se o ano inteiro com níveis acima dos níveis medianos e praticamente quase todos os meses do ano permaneceram na zona de atenção para máximas, que como se mencionou anteriormente é a faixa onde se situam 10% dos níveis mais altos dos rios naquele dia.

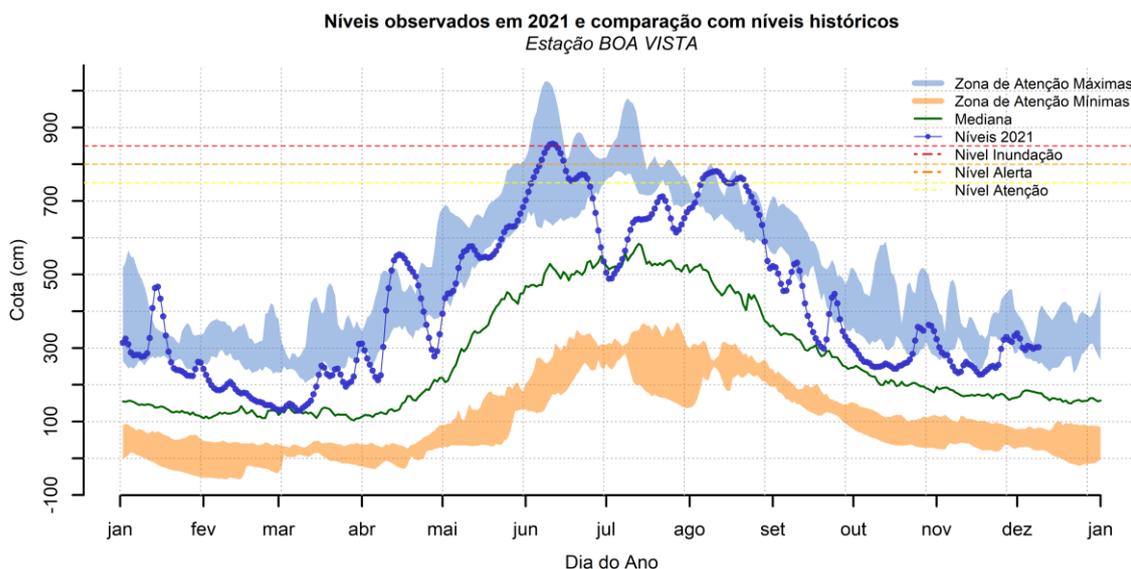


Figura 11: Variação sazonal dos níveis e cotagrama da cheia de 2021 na estação de Boa Vista.

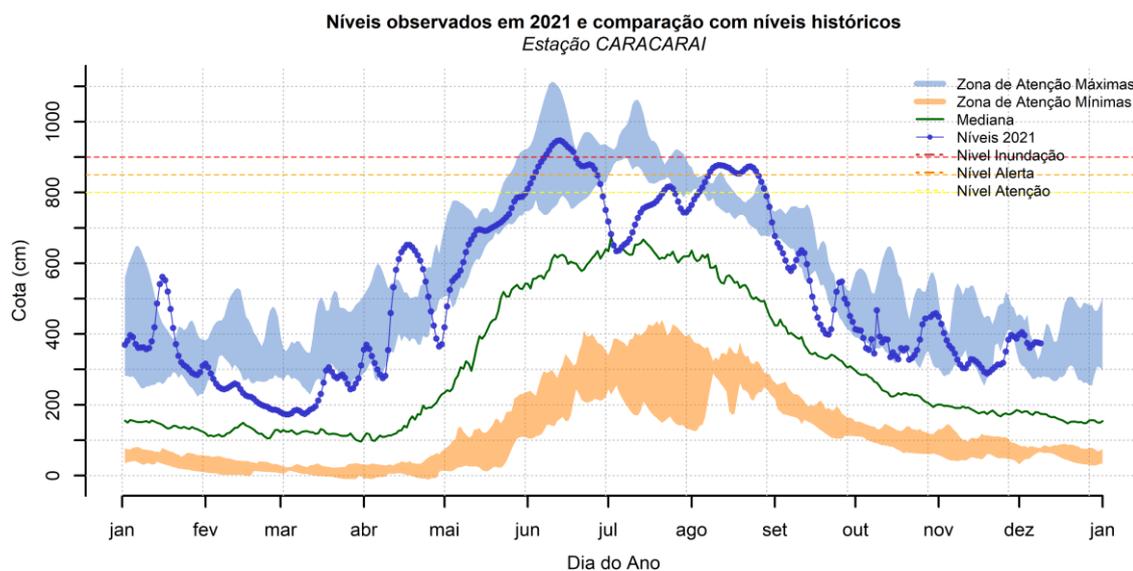


Figura 12: Variação sazonal dos níveis e cotagrama da cheia de 2021 na estação de Caracarái.

Nas referidas figuras e na Tabela 6 observa-se, além dos valores das vazões e níveis máximos anuais, a data de sua ocorrência. Como já se ressaltou anteriormente, não existe uma coincidência da chuva máxima anual em 24 horas e os níveis máximos dos rios. Nesses locais, a contribuição da umidade antecedente na formação das grandes cheias é bastante significativa, o que está relacionado a acumulados de chuvas observado ao longo de vários dias e semanas. Outro dado a ser observado é que, em geral, o nível máximo anual de 2021 foi observado no começo de junho, o que, quando comparado com o comportamento climatológico, é mais cedo do que a data esperada, que é o mês de julho em quase todos os pontos da bacia.

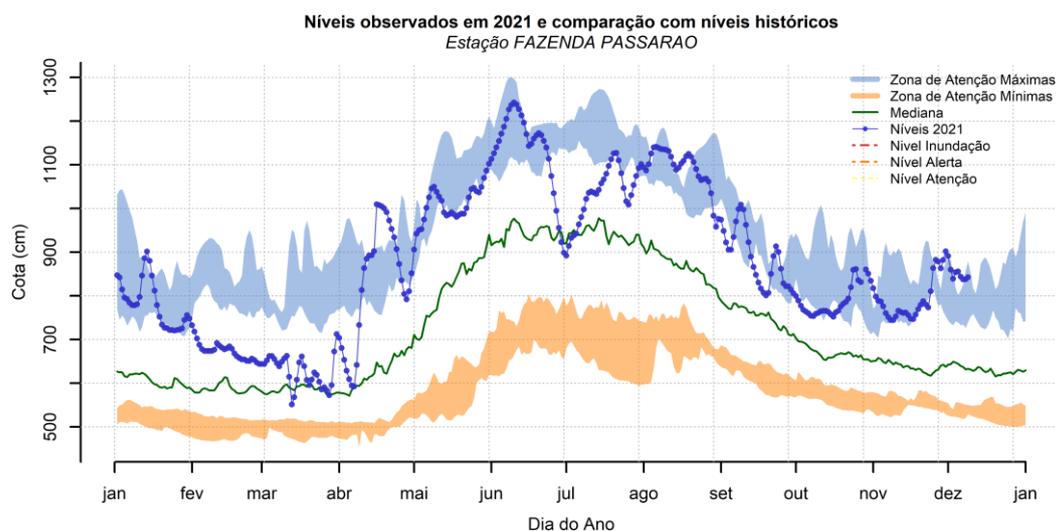


Figura 13: Variação sazonal dos níveis e cotagrama da cheia de 2021 na estação de Fazenda Passarão.

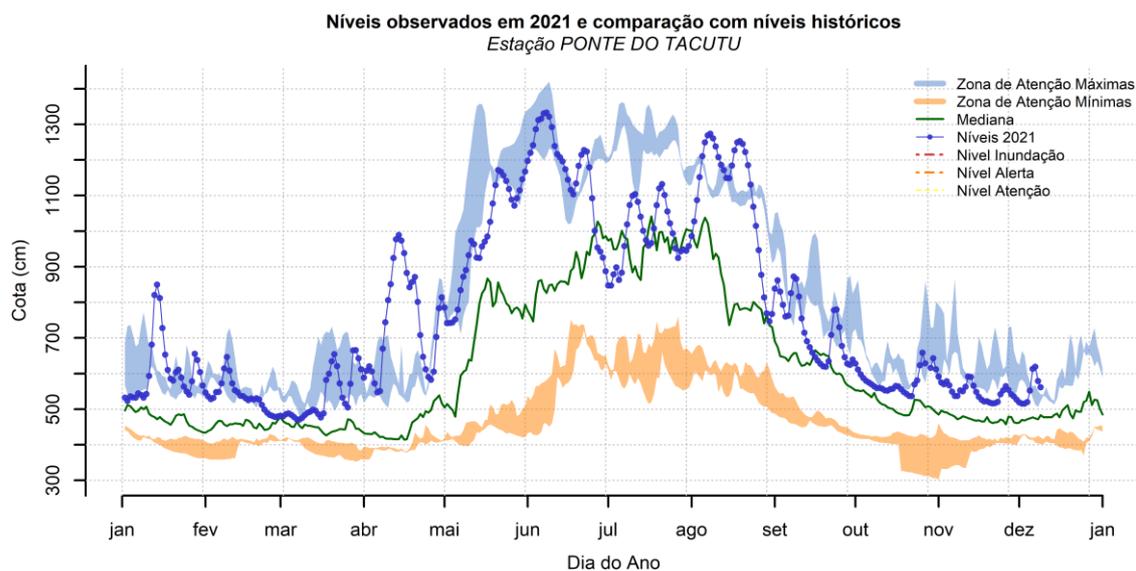


Figura 14: Variação sazonal dos níveis e cotograma da cheia de 2021 na estação de Ponte do Tacutu.

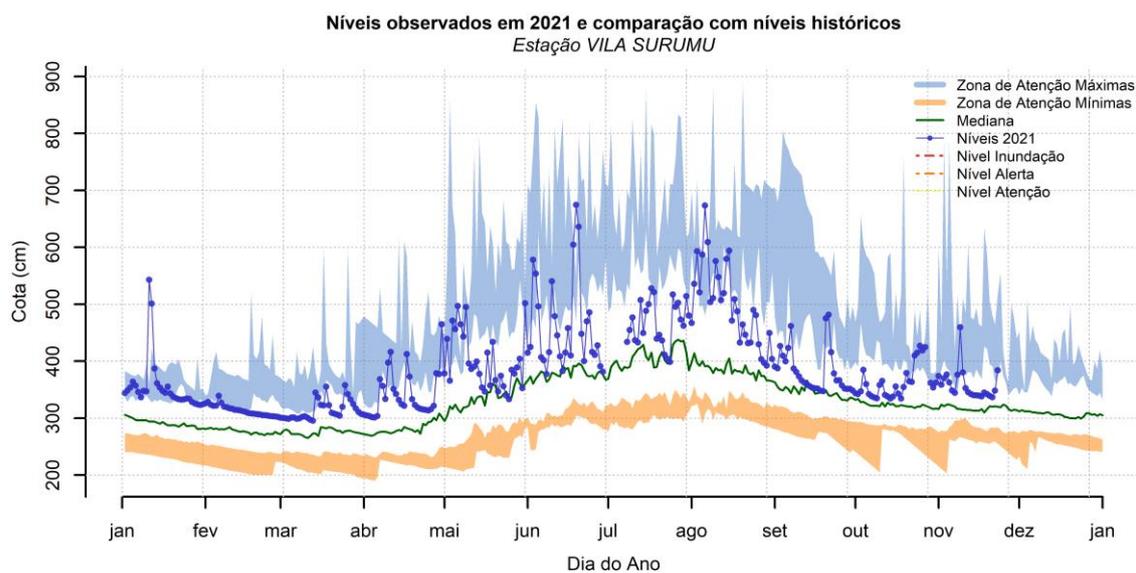


Figura 15: Variação sazonal dos níveis e cotograma da cheia de 2021 na estação de Vila Surumu.

Níveis observados em 2021 e comparação com níveis históricos
Estação MUCAJAI

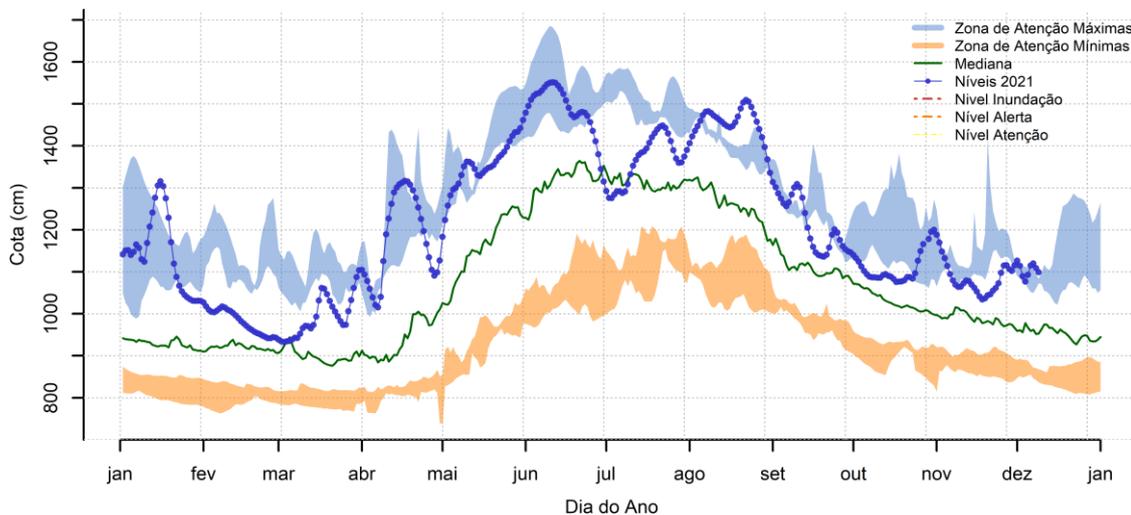


Figura 16: Variação sazonal dos níveis e cotagrama da cheia de 2021 na estação de Vila Surumu.

Níveis observados em 2021 e comparação com níveis históricos
Estação FE E ESPERANCA

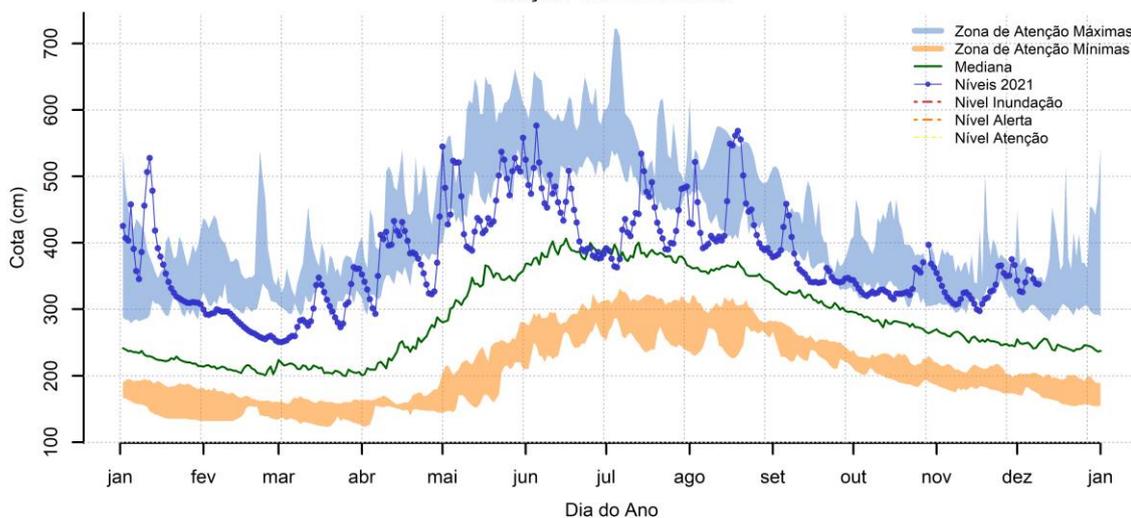


Figura 17: Variação sazonal dos níveis e cotagrama da cheia de 2021 na estação de Fé e Esperança.

Na mesma Tabela 6 é apresentado ainda o resultado da análise de frequência de cheias, aplicado às vazões máximas anuais observadas em 2021. Quando inseridos na equação da distribuição GEV (STEDINGER *et al.*, 1993), o período de retorno da cheia observada em Caracaraí neste ano, corresponde a aproximadamente 6 anos, ou seja, em 2021, ocorreu uma cheia na bacia que possuía uma probabilidade de aproximadamente 16% de ocorrência. Vale mencionar que esse período de 6 anos é um período médio, sendo que cheias dessa magnitude podem ser observadas inclusive em anos consecutivos. Porém,

na média do histórico, o período de 6 anos é o valor que separa cheias da ordem de 12.148 m³/s.

Tabela 6: Vazão e nível máximo observado em 2021 nas estações de monitoramento e estimativa do seu período de retorno e probabilidade de ocorrência da cheia observada em 2021 em Caracarái.

Estação	Cota máxima 2021 (m)	Q máxima 2021 (m ³ /s)	Data Máxima	TR (anos) / Prob (%)
BOA VISTA	8,57	11.107	09/06/2021	-
CARACARAI	9,48	12.148	11/06/2021	6 a. / 16%
VILA SURUMU	7,58	851	17/06/2021	-
PONTE DO TACUTU	13,34	3.539	07/06/2021	-
FAZ. CAJUPIRANGA	10,04	4.233	05/05/2021	-
FAZ. PASSARAO	12,44	6.037	09/06/2021	-
FE E ESPERANCA	5,92	1.136	04/06/2021	-
MUCAJAI	15,53	1.827	10/06/2021	-

Elaborado pelo Autor (2021)

5.3 IMPACTOS DA CHEIA NA BACIA

Em 2021 no estado de Roraima apresentou decretos e 13 reconhecimentos federais da Situação de Emergência. Esses 13 reconhecimentos inclui o município de Caracarái que faz parte do sistema de alerta da CPRM. Os desastres reconhecidos foram de “Tempestades locais/convectivas – chuvas intensas”. Como já se falou ao longo desse relatório, as chuvas intensas e locais com duração igual ou inferior a 24 horas não têm uma relação direta com a elevação dos níveis dos rios. Portanto, o que provocou maiores danos nos municípios de Roraima este ano foram esses eventos de chuvas mais intensas, menos relacionados à elevação dos rios da região.

A Figura 18 detalha esses danos em Roraima. No total, os desastres resultaram em cerca de 13.000 pessoas direta ou indiretamente afetados, 122 unidades habitacionais danificadas e cerca de R\$ 20.600.500,00 em prejuízos econômicos. A Figura 18 apresenta uma sequência de fotos, realizadas pela equipe do Núcleo de Apoio de Roraima da CPRM/MA relacionadas a impactos da elevação dos rios no estado e ilustrando a atuação de equipes de campo ao longo do período de cheias.

Tabela 7: Danos humanos, materiais e econômicos informados na bacia do rio Branco pelo Relatório Gerencial da defesa civil nacional (Fonte: Brazil, 2021, disponível em s2id.mi.gov.br)

Variável	Total
Mortos	0
Feridos	0
Enfermos	0
Desabrigados	10
Desalojados	1135
Desaparecidos	0
Outros afetados	12.305
Unidades habitacionais danificadas	122
Unidades habitacionais destruídas	0
Obras de infraestrutura pública danificadas	12
Obras de infraestrutura pública destruídas	9
Assistência médica, saúde pública e atendimento de emergências médicas	R\$ 64.856,00
Abastecimento de água potável	R\$ 153.453,20
Transportes locais, regionais e de longo curso	R\$ 2.600.000,00
Pecuária	R\$ 1.186.252,00
Agricultura	R\$ 10.948.994,42
Obras de infraestrutura pública	R\$ 5.697.600,00
Ensino	R\$ 10.000,00

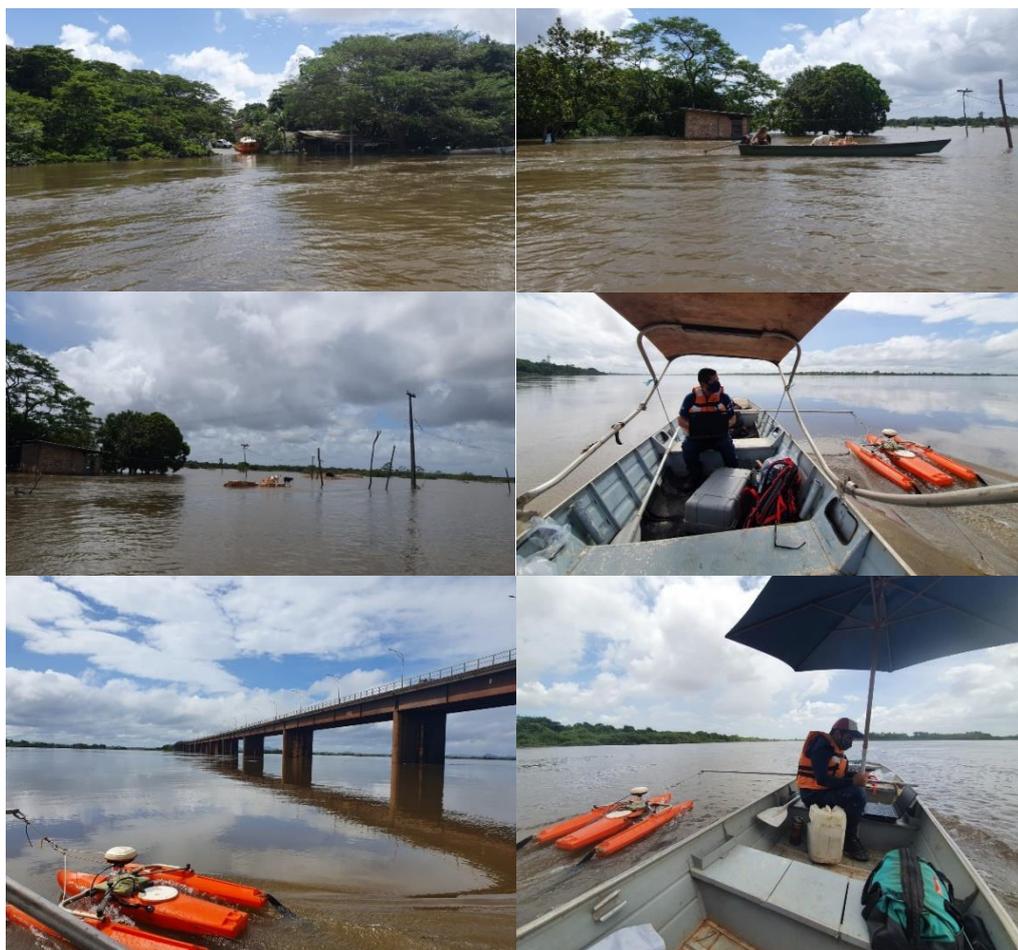


Figura 18: Fotos do monitoramento efetuado na bacia do rio Branco. (Fonte: Arquivos Núcleo de Apoio de Roraima da CPRM/MA).

6. OPERAÇÃO REALIZADA EM 2021

Ao longo da operação de 2020/2021 do SAH Rio Branco foram emitidos boletins 10 boletins semanais entre os dias 01 de abril de 2020 e 06 de julho de 2021. Além desses, foram emitidos 30 Boletins de Alerta, que apresentam previsões de curto prazo para as estações objeto do alerta.

Os modelos de previsão de curto prazo são modelos de regressão múltipla que estimam os níveis em Boa Vista e Caracaraí, baseados nas cotas observadas em Ponte do Tacutu e Boa Vista, respectivamente. Esses modelos permitem fazer previsões com horizontes de até 17 horas para Boa Vista e até 36 horas em Caracaraí.

Além do modelo de previsão cota-cota, foi utilizado também o modelo hidrológico SMAP, calibrado utilizando-se algoritmo genético MOPSO (NASCIMENTO *et al.*, 2009) na previsão de níveis com horizonte de até 15 dias. Para essa previsão, são utilizados, além dos dados hidrológicos de níveis e vazões, os dados de evapotranspiração SSEBOP (SENAY *et al.*, 2013, 2007), estimativas de chuvas utilizando-se o produto MERGE/INPE (ROZANTE *et al.*, 2010) e previsão de chuvas por *Ensemble* com modelo meteorológico GEFS (ZHU *et al.*, 2018). Importante lembrar que o modelo de previsão GEFS não fornece apenas uma única saída de previsão de chuvas, mas um conjunto (ou *Ensemble*) de 20 previsões. Esse conjunto de previsões é importante pois indica as incertezas associadas à previsão meteorológica. Um exemplo de previsão feita com o modelo SMAP em Rio Branco é apresentada na Figura 19, por meio dessa previsão, as autoridades de defesa civil foram comunicadas e se mobilizaram para atender à população que seria afetada pelas cheias no município.

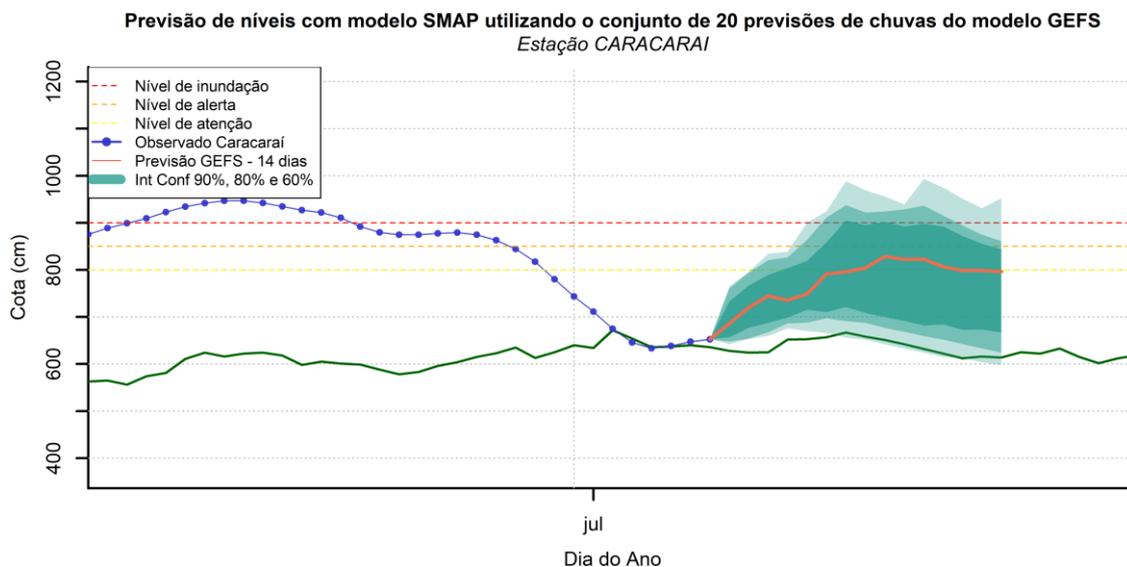


Figura 19: Previsão de níveis em Caracarái utilizando o modelo SMAP, previsão de precipitação por ensemble a partir do modelo GEFS, evapotranspiração do SSEBOP e chuvas do MERGE/INPE.

7. AGRADECIMENTOS AOS PARCEIROS

Todo o monitoramento feito na bacia do rio Branco desenvolveu-se graças ao trabalho em conjunto feito pelo Serviço Geológico do Brasil e a Agência Nacional de Águas para a gestão e operação da Rede Hidrometeorológica Nacional. Além dessa parceria, diversos outros órgãos trabalham no monitoramento hidrometeorológico da região. O Sipam é o órgão regional que fornece grande parte das análises meteorológicas que orientam as ações de monitoramento. Além do SIPAM, também o Cemaden contribui com os alertas de desastres naturais trocando dados e análises com a CPRM. Além deles, o Cenad é órgão que trabalha na articulação de instituições parceiras fomentando a troca de informação entre os órgãos especializados, em especial na região norte do Brasil. De suma importância também é a atividade desenvolvida pelo INPE, gerador de diversos produtos utilizados por todas as instituições de monitoramento da região, com destaque para o MERGE/INPE e o modelo de previsão de chuvas WRF.

Todo o monitoramento feito na bacia do rio Branco desenvolveu-se graças ao trabalho em conjunto feito pelo Serviço Geológico do Brasil e a Agência Nacional de Águas para a gestão e operação da Rede Hidrometeorológica Nacional. Além dessa parceria, diversos outros órgãos trabalham no monitoramento hidrometeorológico da região. O Sipam é o órgão regional que fornece grande

parte das análises meteorológicas que orientam as ações de monitoramento. Além do SIPAM, também o Cemaden contribui sobremaneira com os alertas de desastres naturais trocando dados e análises com a CPRM. Além deles, o Cenad é órgão que trabalha na articulação de instituições parceiras fomentando a troca de informação entre os órgãos especializados, em especial na região norte do Brasil. De suma importância também é a atividade desenvolvida pelo INPE, gerador de diversos produtos utilizados por todas as instituições de monitoramento da região, com destaque para o MERGE/INPE e o modelo de previsão de chuvas WRF. A todas as instituições a CPRM é enormemente grata. O SAH Branco agradece também aos pesquisadores Luna Gripp Simões Alves e Marcos Figueiredo Salviano pelo auxílio na geração de Boletins de Previsão ao longo da operação de cheias deste ano.,

9. CONCLUSÕES

A cheia de 2021 no rio Branco foi uma cheia com uma probabilidade de ocorrência anual de 16%. Ela foi causada por chuvas acima da média ao longo de vários meses, que fizeram com que o rio mantivesse níveis elevados ao longo de todo ano e uma umidade antecedente também alta. No início de junho, após chuvas não muito intensas porém contínuas, o rio alcançou níveis máximos anuais em quase todos os pontos de monitoramento. Esse período é relativamente cedo pra ocorrência dos máximos anuais, que normalmente ocorrem em julho.

Desde 2020, o SAH Branco iniciou a operação com horizontes de previsão de 15 dias, utilizando modelagem hidrológica chuva-vazão tendo como parâmetro de entrada um conjunto (*Ensemble*) de previsões. Isso fez com que, com maior antecedência, a equipe da CPRM tenha podido se comunicar com as autoridades locais acerca da possibilidade de inundação moderada que ocorreu. Essa atuação representa importante contribuição por parte da CPRM para um melhor gerenciamento das cheias no Estado. Tal fato só foi possível com a implantação de modelos de previsão chuva vazão, capazes de incorporar previsões de chuvas aos modelos hidrológicos operacionais na região.

10. REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Portal Hidroweb**: Sistemas de informações hidrológicas. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/%5Cnhttp://hidroweb.ana.gov.br/default.asp>. Acesso em: 27 nov. 2021.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Levantamento da geodiversidade**: projeto atlas pluviométrico do Brasil: isoietas anuais médias: período 1977 a 2006. [S. l.]: CPRM, 2011. 1 mapa, color. Escala 1:5.000.000. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22220>. Acesso em: 27 nov. 2021.
- FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations: a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, n. 2, p. 1-21, 2015. DOI <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- GILLELAND, E.; KATZ, R. W. extRemes 2.0: an extreme value analysis package in R. **Journal of Statistical Software**, v. 72, p. 1-39, 2016. DOI <https://doi.org/10.18637/jss.v072.i08>
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. de A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/454>
- NASCIMENTO, L. S. V.; REIS JÚNIOR, D. S.; MARTINS, E. S. P. R. 2009. Avaliação do algoritmo evolutivo MOPSO na calibração multiobjetivo do modelo SMAP no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 1., p. 85-97, jan./mar. 2009. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=12&SUMARIO=147>. Acesso em: 27 nov. 2021.
- PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, n. 4, p. 439-473, 2007. DOI <https://doi.org/10.5194/hessd-4-439-2007>
- ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; GONÇALVES, L. G. G. de; VILA, D. A. Combining TRMM and surface observations of precipitation: technique and validation over South America. **Weather Forecast**, v. 25, n. 3, 2010. DOI <https://doi.org/10.1175/2010WAF222325.1>
- SENAY, G. B.; BOHMS, S.; SINGH, R. K.; GOWDA, P. H.; VELPURI, N. M.; ALEMU, H.; VERDIN, J. P. Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather Datasets: a new parameterization for the SSEB approach. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 49, n. 3, p. 577-591, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/jawr.12057>
- SENAY, G. B.; BUDDE, M.; VERDIN, J. P.; MELESSE, A. M. A coupled remote sensing and simplified surface energy balance approach to estimate actual evapotranspiration from irrigated fields. **Sensors**, v. 7, n. 6, p. 979-1000, 2007. <https://doi.org/10.3390/s7060979>
- STEDINGER, J. R.; VOGEL, R. M.; FOUFOULA-GEORGIU, E. Frequency analysis of extreme events. In: TASK COMMITTEE ON HYDROLOGY HANDBOOK OF MANAGEMENT GROUP D OF ASCE. **Hydrology handbook**. New York: ASCE, 1993. <https://doi.org/10.1061/9780784401385>
- ZHU, Y.; ZHOU, X.; LI, W.; HOU, D.; MELHAUSER, C.; SINSKY, E.; PEÑA, M.; FU, B.; GUAN, H.; KOLCZYNSKI, W.; WOBUS, R.; TALLAPRAGADA, V. Toward

the improvement of subseasonal prediction in the National Centers for Environmental Prediction Global Ensemble Forecast System. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 123, n. 13, p. 6732-6745, 2018. <https://doi.org/10.1029/2018JD028506>