

AGEVAP

**ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
PARAÍBA DO SUL**

Serviço

Estudo de atualização do quadro de demandas hídricas e atualização dos balanços hídricos na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul

Relatório

Produto 6 – Avaliação do impacto econômico e social e do impacto das mudanças climáticas no balanço hídrico

Novembro, 2025

Revisão 3

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	3
LISTA DE QUADROS	1
LISTA DE SIGLAS	5
1. APRESENTAÇÃO	7
2. OBJETIVOS	9
3. ÁREA DE ABRANGÊNCIA DOS ESTUDOS E SISTEMATIZAÇÃO DA BASE ESPACIAL	10
4. CONTEXTUALIZAÇÃO E METODOLOGIA	13
5. HISTÓRICO SOBRE EVENTOS HIDROLÓGICOS CRÍTICOS	17
5.1. EVENTOS HIDROLÓGICOS CRÍTICOS DE SECA	17
5.2. EVENTOS HIDROLÓGICOS CRÍTICOS DE INUNDAÇÃO	24
6. MUDANÇAS DETECTADAS NO AMBIENTE	34
6.1. USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	34
6.1.1. Mudanças no uso e ocupação do solo observadas na BHPS	34
6.1.2. Projeções no uso e ocupação do solo para a BHPS	41
6.2. MUDANÇAS CLIMÁTICAS	43
6.2.1. Avaliação das Normais Climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) – alterações observadas na BHPS	43
6.2.2. Projeções de aumento de temperatura na BHPS	49
6.2.3. Alterações hidrológicas projetadas para a BHPS	53
7. IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BALANÇO HÍDRICO	56
7.1. METODOLOGIA E CENÁRIOS CONSIDERADOS	56
7.1.1. Balanço hídrico superficial	56
7.1.2. Balanço hídrico subterrâneo	56
7.1.3. Cenários de alteração na disponibilidade e demandas hídricas	57
7.2. DISPONIBILIDADE HÍDRICA	57
7.3. DEMANDAS HÍDRICAS	58
7.3.1. Abastecimento humano (urbano e rural)	58
7.3.2. Irrigação	64
7.3.3. Dessedentação Animal	68
7.3.4. Indústria e Termelétricas	74
7.3.5. Mineração	77

7.3.6.	Evaporação Líquida.....	78
7.3.7.	Transposições	81
7.3.8.	Consolidação das demandas hídricas em cenário de mudança climática.....	82
7.4.	BALANÇO HÍDRICO QUALITATIVO	86
7.5.	BALANÇO HÍDRICO QUANTITATIVO	87
7.5.1.	Balanço Hídrico Superficial	87
7.5.2.	Balanço Hídrico Subterrâneo	118
8.	O VALOR DA ÁGUA E OS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	122
8.1.	AS MUDANÇAS DO CLIMA NO PLANEJAMENTO SETORIAL	122
8.2.	A IMPORTÂNCIA DE SE CONHECER O VALOR DA ÁGUA.....	127
8.3.	EVENTOS DE CRISE HÍDRICA E PERDAS ECONÔMICAS.....	129
8.3.1.	A crise hídrica no Sudeste - exemplo do Sistema Cantareira.....	131
8.3.2.	A crise hídrica no Nordeste - exemplo dos rios Piancó-Piranhas-Açu.....	133
9.	IMPACTOS ECONÔMICOS E SOCIAIS NA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL	136
9.1.	IMPACTOS RELACIONADOS AO DÉFICIT HÍDRICO	136
9.1.1.	Metodologia para consideração dos impactos relacionados ao déficit hídrico	137
9.1.2.	Risco hídrico de base (sem efeito das mudanças do clima)	141
9.1.3.	Risco hídrico da mudança climática - riscos crônicos.....	157
9.1.4.	Risco hídrico da mudança climática - riscos agudos	166
9.2.	IMPACTOS RELACIONADOS A INUNDAÇÕES	174
9.2.1.	Risco hídrico de base (sem efeito das mudanças do clima)	174
9.2.2.	Risco hídrico da mudança climática - riscos agudos	179
9.3.	PROPOSIÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE PRIORIZAÇÃO DE DEMANDAS E CONSIDERAÇÃO OPERACIONAL NO BALANÇO HÍDRICO	180
10.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	186
11.	REFERÊNCIAS	189
	APÊNDICE A. DEMANDAS HÍDRICAS – CENÁRIOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA	197
	APÊNDICE B. BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL – CENA FUTURA DE MAIOR PRESSÃO (2045) EM CENÁRIOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA.....	198
	APÊNDICE C. INVENTÁRIO DE EVENTOS HIDROLÓGICOS DE SECAS / ESTIAGENS	199
	APÊNDICE D. INVENTÁRIO DE EVENTOS HIDROLÓGICOS DE CHEIAS / INUNDAÇÕES	203

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3-1 – UNIDADES DE PLANEJAMENTO E PRINCIPAIS CURSOS D'ÁGUA.	11
FIGURA 3-2 – DIVISÃO DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL EM SUB-BACIAS E UNIDADES DE PLANEJAMENTO	12
FIGURA 4-1 – FLUXOGRAMA DE PROCESSO PARA O DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO.	14
FIGURA 4-2 – FLUXOGRAMA COM AS ATIVIDADES PREVISTAS PARA SEREM EXECUTADAS NA ETAPA 7	15
FIGURA 5.1 – DISTRIBUIÇÃO E TENDÊNCIA DE SECAS POR UNIDADE DE PLANEJAMENTO E NO TRECHO MINEIRO	20
FIGURA 5.2 – DISTRIBUIÇÃO E TENDÊNCIA DE SECAS POR UNIDADE DE PLANEJAMENTO E NO TRECHO FLUMINENSE.....	21
FIGURA 5.3 – DISTRIBUIÇÃO E TENDÊNCIA DE SECAS NO TRECHO PAULISTA – ALTO PARAÍBA DO SUL.	22
FIGURA 5.4 – DISTRIBUIÇÃO E TENDÊNCIA DAS INUNDAÇÕES POR UNIDADE DE PLANEJAMENTO E NO TRECHO MINEIRO.....	27
FIGURA 5.5 – DISTRIBUIÇÃO E TENDÊNCIA DAS INUNDAÇÕES POR UNIDADE DE PLANEJAMENTO E NO TRECHO FLUMINENSE.....	28
FIGURA 5.6 – DISTRIBUIÇÃO E TENDÊNCIA DAS INUNDAÇÕES NO TRECHO PAULISTA – ALTO PARAÍBA DO SUL. ...	30
FIGURA 6-1 – USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA BHPS EM 1985	35
FIGURA 6-2 – USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA BHPS EM 2023	36
FIGURA 6-3 – TRANSIÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA BHPS ENTRE 1985 E 2023	37
FIGURA 6-4 – DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DOS TIPOS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO EM 1985, 2000 E 2023 NA BHPS	40
FIGURA 6-5 – CENAS DE EXPANSÃO URBANA DA PORÇÃO PAULISTA DA BHPS PARA OS ANOS DE 2025, 2035 E 2050 PROJETADOS POR PAIVA (2021)	41
FIGURA 6-6 – CENÁRIOS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA PORÇÃO PAULISTA DA BHPS PARA 2030 POR GAEA E IIS (2017)	42
FIGURA 6-7 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS SELECIONADAS	44
FIGURA 6-8 – NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DE TEMPERATURA MÉDIA PARA AS ESTAÇÕES DA BHPS	45
FIGURA 6-9 – NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DE TEMPERATURA MÍNIMA PARA AS ESTAÇÕES DA BHPS	46
FIGURA 6-10 – NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DE TEMPERATURA MÁXIMA PARA AS ESTAÇÕES DA BHPS	47
FIGURA 6-11 – NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DE EVAPORAÇÃO PARA AS ESTAÇÕES DA BHPS	48
FIGURA 6-12 – PROJEÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA NA BHPS (°C)	50
FIGURA 6-13 – PROJEÇÃO DE DIAS COM TEMPERATURA ACIMA DE 35°C NA REGIÃO SUDESTE DA AMÉRICA DO SUL SOB CENÁRIO DE EMISSÕES SSP2-4.5.....	52
FIGURA 7-1 – ALTERAÇÕES (AUMENTO) NA DEMANDA DE IRRIGAÇÃO EM FUNÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS ..	65
FIGURA 7-2 – SÉRIES TEMPORAIS DAS ANOMALIAS INTERANUAIS GLOBAIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO TERRESTRE (MM/DIA), PARA O HEMISFÉRIO SUL, PARA O CONJUNTO DE DADOS OBSERVADOS (PRETO) DE 1979 A 2017, O CONJUNTO DE DADOS DE REANÁLISE ERA5 (VERDE) DE 1979 A 2017 E AS MÉDIAS DOS CONJUNTOS CMIP5 (AZUL) E CMIP6 (VERMELHO) DE 1979 A 2099.....	78

FIGURA 7-3 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO, Q ₉₀ – CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045), MUDANÇA CLIMÁTICA E ONDA DE CALOR	88
FIGURA 7-4 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO, Q ₉₅ – CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045), MUDANÇA CLIMÁTICA E ONDA DE CALOR	88
FIGURA 7-5 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO, Q _{7,10} – CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045), MUDANÇA CLIMÁTICA E ONDA DE CALOR	89
FIGURA 7-6 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q ₉₀ , MUDANÇAS CLIMÁTICAS – BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL	91
FIGURA 7-7 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q ₉₅ , MUDANÇAS CLIMÁTICAS – BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL	92
FIGURA 7-8 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q _{7,10} , MUDANÇAS CLIMÁTICAS – BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL	93
FIGURA 7-9 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q ₉₅ , MUDANÇAS CLIMÁTICAS – UP ALTO PARAÍBA DO SUL	103
FIGURA 7-10 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q _{7,10} , MUDANÇAS CLIMÁTICAS – UP ALTO PARAÍBA DO SUL	104
FIGURA 7-11 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q ₉₅ , MUDANÇAS CLIMÁTICAS – UP PRETO E PARAIBUNA	105
FIGURA 7-12 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q _{7,10} , MUDANÇAS CLIMÁTICAS – UP PRETO E PARAIBUNA	106
FIGURA 7-13 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q ₉₅ , MUDANÇAS CLIMÁTICAS – UP POMBA E MURIAÉ	107
FIGURA 7-14 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q _{7,10} , MUDANÇAS CLIMÁTICAS – UP POMBA E MURIAÉ	108
FIGURA 7-15 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q ₉₅ , MUDANÇAS CLIMÁTICAS – UP MÉDIO PARAÍBA DO SUL	109
FIGURA 7-16 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL, MUDANÇAS CLIMÁTICAS – Q ₉₅ – UP PIABANHA	110
FIGURA 7-17 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q ₉₅ , MUDANÇAS CLIMÁTICAS – UP RIO DOIS RIOS ..	111
FIGURA 7-18 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q ₉₅ , MUDANÇAS CLIMÁTICAS – UP BAIXO PARAÍBA DO SUL	112
FIGURA 7-19 – BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL ANUAL – Q ₉₅ , MUDANÇAS CLIMÁTICAS – UP RIO PIRAI	113
FIGURA 9-1 – RELAÇÃO ENTRE O BALANÇO HÍDRICO E O RISCO HÍDRICO INERENTE	139
FIGURA 9-2 – CURVA DE PERDAS HISTÓRICAS ASSOCIADAS AOS TRS DE EVENTOS DE INUNDAÇÕES EM CAMPOS DOS GOYTACAZES (R\$, MILHÕES)	175

LISTA DE QUADROS

QUADRO 3-1 – ÁREAS DE ABRANGÊNCIA DAS UNIDADES DE PLANEJAMENTO.	10
QUADRO 5-1 – REGISTROS DE PERDAS ECONÔMICAS POR EVENTOS DE ESTIAGEM E SECA NOS MUNICÍPIOS DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL	23
QUADRO 5-2 – REGISTRO DOS 40 MUNICÍPIOS COM AS MAIORES PERDAS ECONÔMICAS POR EVENTOS DE INUNDAÇÃO NOS MUNICÍPIOS DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL.	31
QUADRO 6-1 – ÁREA (KM ²) POR CLASSE DE USO DO SOLO NA BHPS EM DIFERENTES ANOS A PARTIR DE 1985..	38
QUADRO 6-2 – ÁREA DE TRANSIÇÃO (KM ²) ENTRE CLASSES DE USO DO SOLO NA BHPS ENTRE OS ANOS DE 1985 E 2023	40
QUADRO 6-3 – PROJEÇÕES DE TEMPERATURA NA BHPS SOB CENÁRIO DE EMISSÕES SSP2-4.5	50
QUADRO 6-4 – PROJEÇÕES DE DIAS COM TEMPERATURAS MUITO ALTAS SOB CENÁRIO SSP2-4.5.....	52
QUADRO 6-5 – RESULTADOS MÉDIOS DAS ALTERAÇÕES NAS VAZÕES MÁXIMAS EM PERCENTUAL (%) POR SUB- BACIA DA BHPS CONSIDERANDO O HORIZONTE TEMPORAL DE CURTO PRAZO (2015 - 2045).....	54
QUADRO 6-6 – RESULTADOS DAS ALTERAÇÕES MÉDIAS, EM PERCENTUAL, NAS VAZÕES DE REFERÊNCIA PARA O HORIZONTE TEMPORAL DE CURTO PRAZO (2015 - 2045)	55
QUADRO 7-1 – CONSOLIDAÇÃO DAS DEMANDAS DE ABASTECIMENTO HUMANO URBANO (M ³ /S) SOB CENÁRIO DE EMISSÕES SSP2-4.5 E ONDA DE CALOR NO ANO DE 2045	62
QUADRO 7-2 – CONSOLIDAÇÃO DAS DEMANDAS DE ABASTECIMENTO HUMANO RURAL (M ³ /S) SOB CENÁRIO DE EMISSÕES SSP2-4.5 E ONDA DE CALOR NO ANO DE 2045	63
QUADRO 7-3 – CONSOLIDAÇÃO DAS DEMANDAS DE IRRIGAÇÃO (M ³ /S) SOB MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO ANO DE 2045.....	67
QUADRO 7-4 – COEFICIENTES TÉCNICOS DA DESSEDENTAÇÃO ANIMAL SOB CONDIÇÕES NORMAIS, SOB CENÁRIO DE EMISSÕES SSP2-4.5 NO ANO DE 2045 E SOB ONDAS DE CALOR	71
QUADRO 7-5 – CONSOLIDAÇÃO DAS DEMANDAS DE CRIAÇÃO ANIMAL (M ³ /S) SOB CENÁRIO DE EMISSÕES SSP2-4.5 E ONDAS DE CALOR NO ANO DE 2045	73
QUADRO 7-6 – COMPARAÇÃO DAS DEMANDAS DE EVAPORAÇÃO LÍQUIDA (M ³ /S), NA CENA ATUAL E NOS CENÁRIOS DE MAIOR PRESSÃO (2045) E DE MUDANÇA CLIMÁTICA POR UNIDADE DE PLANEJAMENTO	80
QUADRO 7-7 – VALORES CONSOLIDADOS DE DEMANDA HÍDRICA TOTAL NO CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO, POR UNIDADE DE PLANEJAMENTO	83
QUADRO 7-8 – VALORES CONSOLIDADOS DE DEMANDA HÍDRICA SUPERFICIAL NO CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO, POR UNIDADE DE PLANEJAMENTO.....	84
QUADRO 7-9 – VALORES CONSOLIDADOS DE DEMANDA HÍDRICA SUBTERRÂNEA NO CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO, POR UNIDADE DE PLANEJAMENTO.....	85
QUADRO 7-10 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO, Q ₉₀ - CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045), MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ONDA DE CALOR – ALTO PARAÍBA DO SUL, RIOS PRETO E PARAIBUNA, POMBA E MURIAÉ E MÉDIO PARAÍBA DO SUL	97

QUADRO 7-11 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO, Q ₉₀ - CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045), MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ONDA DE CALOR – PIABANHA, RIO DOIS RIOS, BAIXO PARAÍBA DO SUL E SUB-BACIA DO RIO PIRAI.....	98
QUADRO 7-12 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO, Q ₉₅ - CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045), MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ONDA DE CALOR – ALTO PARAÍBA DO SUL, RIOS PRETO E PARAIBUNA, POMBA E MURIAÉ E MÉDIO PARAÍBA DO SUL	99
QUADRO 7-13 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO, Q ₉₅ - CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045), MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ONDA DE CALOR – PIABANHA, RIO DOIS RIOS, BAIXO PARAÍBA DO SUL E SUB-BACIA DO RIO PIRAI.....	100
QUADRO 7-14 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO, Q _{7,10} - CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045), MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ONDA DE CALOR – ALTO PARAÍBA DO SUL, RIOS PRETO E PARAIBUNA, POMBA E MURIAÉ E MÉDIO PARAÍBA DO SUL	101
QUADRO 7-15 – PERCENTUAL DE OTTOBACIAS EM CADA FAIXA DE BALANÇO HÍDRICO, Q _{7,10} - CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045), MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ONDA DE CALOR – PIABANHA, RIO DOIS RIOS, BAIXO PARAÍBA DO SUL E SUB-BACIA DO RIO PIRAI.....	102
QUADRO 7-16 – ANÁLISE DE RESULTADOS DO BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL INTEGRADA À DISPONIBILIDADE HÍDRICA, PARA O CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (VAZÃO DE REFERÊNCIA Q ₉₅)	115
QUADRO 7-17 – ANÁLISE DE RESULTADOS DO BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL INTEGRADA À DISPONIBILIDADE HÍDRICA, PARA O CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (UPS COM VAZÃO DE REFERÊNCIA Q _{7,10}).....	117
QUADRO 7-18 – DEMANDAS SUBTERRÂNEAS EM RELAÇÃO ÀS RESERVAS EXPLOTÁVEIS NOS CENÁRIOS AVALIADOS.	121
QUADRO 9-1 – QUANTIDADE DE INTERFERÊNCIAS SOB RISCO HÍDRICO SOB VAZÃO Q _{95%} , POR FINALIDADE DE USO, NO CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) SEM MUDANÇA DO CLIMA (RISCO DE BASE).....	142
QUADRO 9-2 – QUANTIDADE DE INTERFERÊNCIAS SOB RISCO HÍDRICO SOB VAZÃO Q _{7,10} , POR FINALIDADE DE USO, NO CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) SEM MUDANÇA DO CLIMA (RISCO DE BASE).....	142
QUADRO 9-3 – RISCO HÍDRICO FÍSICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL NO CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) SEM MUDANÇA DO CLIMA (RISCO DE BASE) - TOTAL DE INTERFERÊNCIAS.....	144
QUADRO 9-4 – RISCO HÍDRICO FÍSICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL NO CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) SEM MUDANÇA DO CLIMA (RISCO DE BASE) - INDÚSTRIA E MINERAÇÃO.	145
QUADRO 9-5 – RISCO HÍDRICO FÍSICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL NO CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) SEM MUDANÇA DO CLIMA (RISCO DE BASE) - CONSUMO HUMANO.	146
QUADRO 9-6 – RISCO HÍDRICO FÍSICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL NO CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) SEM MUDANÇA DO CLIMA (RISCO DE BASE) - AGROPECUÁRIA.	146
QUADRO 9-7 – RISCO HÍDRICO FÍSICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL NO CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) SEM MUDANÇA DO CLIMA (RISCO DE BASE) - OUTROS USOS E NÃO DISCRIMINADOS.	147
QUADRO 9-8 – INDICADORES HÍBRIDOS DE EFICIÊNCIA NO CONSUMO E NO USO DE ÁGUA NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL	149
QUADRO 9-9 – CHECAGEM DE ADERÊNCIA DAS PREMISSAS DE VALORAÇÃO DO USO DA ÁGUA NA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL.....	152

QUADRO 9-10 – RISCO HÍDRICO ECONÔMICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL NO CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) SEM MUDANÇA DO CLIMA (RISCO DE BASE) - TOTAL DE INTERFERÊNCIAS	153
QUADRO 9-11 – RISCO HÍDRICO ECONÔMICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL NO CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) SEM MUDANÇA DO CLIMA (RISCO DE BASE) - INDÚSTRIA E MINERAÇÃO	154
QUADRO 9-12 – RISCO HÍDRICO ECONÔMICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL NO CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) SEM MUDANÇA DO CLIMA (RISCO DE BASE) - CONSUMO HUMANO	154
QUADRO 9-13 – RISCO HÍDRICO ECONÔMICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL NO CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) SEM MUDANÇA DO CLIMA (RISCO DE BASE) - AGROPECUÁRIA	154
QUADRO 9-14 – RISCO HÍDRICO ECONÔMICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL NO CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) SEM MUDANÇA DO CLIMA (RISCO DE BASE) - OUTROS USOS E NÃO DISCRIMINADOS	155
QUADRO 9-15 – RISCO HÍDRICO DA POPULAÇÃO HUMANA ABASTECIDA POR CAPTAÇÃO SUPERFICIAL NO CENÁRIO DE MAIOR PRESSÃO (2045) SEM MUDANÇA DO CLIMA (RISCO DE BASE)	156
QUADRO 9-16 – QUANTIDADE DE INTERFERÊNCIAS SOB RISCO HÍDRICO COM MUDANÇA DO CLIMA CRÔNICA.	158
QUADRO 9-17 – RISCO HÍDRICO FÍSICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL COM MUDANÇA DO CLIMA CRÔNICA - TOTAL DE INTERFERÊNCIAS	159
QUADRO 9-18 – RISCO HÍDRICO FÍSICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL COM MUDANÇA DO CLIMA CRÔNICA - INDÚSTRIA E MINERAÇÃO	160
QUADRO 9-19 – RISCO HÍDRICO FÍSICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL COM MUDANÇA DO CLIMA CRÔNICA - CONSUMO HUMANO	161
QUADRO 9-20 – RISCO HÍDRICO FÍSICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL COM MUDANÇA DO CLIMA CRÔNICA - AGROPECUÁRIA	161
QUADRO 9-21 – RISCO HÍDRICO FÍSICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL COM MUDANÇA DO CLIMA CRÔNICA - OUTROS USOS E NÃO DISCRIMINADOS	161
QUADRO 9-22 – RISCO HÍDRICO ECONÔMICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL COM MUDANÇA DO CLIMA CRÔNICA - TOTAL DE INTERFERÊNCIAS	162
QUADRO 9-23 – RISCO HÍDRICO ECONÔMICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL COM MUDANÇA DO CLIMA CRÔNICA - INDÚSTRIA E MINERAÇÃO	163
QUADRO 9-24 – RISCO HÍDRICO ECONÔMICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL COM MUDANÇA DO CLIMA CRÔNICA - CONSUMO HUMANO	164
QUADRO 9-25 – RISCO HÍDRICO ECONÔMICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL COM MUDANÇA DO CLIMA CRÔNICA - AGROPECUÁRIA	164
QUADRO 9-26 – RISCO HÍDRICO ECONÔMICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL COM MUDANÇA DO CLIMA CRÔNICA - OUTROS USOS E NÃO DISCRIMINADOS	164
QUADRO 9-27 – RISCO HÍDRICO DA POPULAÇÃO HUMANA ABASTECIDA POR CAPTAÇÃO SUPERFICIAL COM MUDANÇA DO CLIMA CRÔNICA	165
QUADRO 9-28 – QUANTIDADE DE INTERFERÊNCIAS SOB RISCO HÍDRICO COM MUDANÇA DO CLIMA AGUDA	167
QUADRO 9-29 – RISCO HÍDRICO FÍSICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL COM MUDANÇA DO CLIMA AGUDA - TOTAL DE INTERFERÊNCIAS	168

QUADRO 9-30 – RISCO HÍDRICO FÍSICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL COM MUDANÇA DO CLIMA AGUDA - INDÚSTRIA E MINERAÇÃO.....	169
QUADRO 9-31 – RISCO HÍDRICO FÍSICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL COM MUDANÇA DO CLIMA AGUDA - CONSUMO HUMANO	169
QUADRO 9-32 – RISCO HÍDRICO FÍSICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL COM MUDANÇA DO CLIMA AGUDA - AGROPECUÁRIA.....	169
QUADRO 9-33 – RISCO HÍDRICO FÍSICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL COM MUDANÇA DO CLIMA AGUDA - OUTROS USOS E NÃO DISCRIMINADOS.....	170
QUADRO 9-34 – RISCO HÍDRICO ECONÔMICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL COM MUDANÇA DO CLIMA AGUDA - TOTAL DE INTERFERÊNCIAS.....	171
QUADRO 9-35 – RISCO HÍDRICO ECONÔMICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL COM MUDANÇA DO CLIMA AGUDA - INDÚSTRIA E MINERAÇÃO	171
QUADRO 9-36 – RISCO HÍDRICO ECONÔMICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL COM MUDANÇA DO CLIMA AGUDA - CONSUMO HUMANO	172
QUADRO 9-37 – RISCO HÍDRICO ECONÔMICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL COM MUDANÇA DO CLIMA AGUDA - AGROPECUÁRIA.....	172
QUADRO 9-38 – RISCO HÍDRICO ECONÔMICO DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL COM MUDANÇA DO CLIMA AGUDA - OUTROS USOS E NÃO DISCRIMINADOS	173
QUADRO 9-39 – RISCO HÍDRICO DA POPULAÇÃO HUMANA ABASTECIDA POR CAPTAÇÃO SUPERFICIAL COM MUDANÇA DO CLIMA AGUDA	173
QUADRO 9-40 – EXPECTATIVA ANUALIZADA DE PERDAS ECONÔMICAS POR EVENTOS DE INUNDAÇÃO NOS MUNICÍPIOS DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL SEM MUDANÇA DO CLIMA	178
QUADRO 9-41 – EXPECTATIVA ANUALIZADA DE PERDAS ECONÔMICAS POR EVENTOS DE INUNDAÇÃO NOS MUNICÍPIOS DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL COM MUDANÇA DO CLIMA	180
QUADRO 11-1 – LISTAGEM DOS MAPAS COM RESULTADOS DE DEMANDA HÍDRICA TOTAL EM CENÁRIOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA	197
QUADRO 11-2 – LISTAGEM DOS MAPAS COM RESULTADOS DO BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL EM CENÁRIOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA	198
QUADRO 11.3 – EVENTOS DE SECAS E ESTIAGENS INVENTARIADOS NO PGR: CONSISTÊNCIA COM DADOS RECENTES DO S2ID E DO ATLAS DE DESASTRES NA PORÇÃO MINEIRA DA BACIA.....	199
QUADRO 11.4 – EVENTOS DE SECAS E ESTIAGENS INVENTARIADOS NO PGR: CONSISTÊNCIA COM DADOS RECENTES DO S2ID E DO ATLAS DE DESASTRES NA PORÇÃO FLUMINENSE DA BACIA.	200
QUADRO 11.5 – EVENTOS DE SECAS E ESTIAGENS INVENTARIADOS NO PGR NA PORÇÃO PAULISTA DA BACIA.	201
QUADRO 11.6 – EVENTOS DE INUNDAÇÃO INVENTARIADOS NO PGR: CONSISTÊNCIA COM DADOS RECENTES DO S2ID E DO ATLAS DE DESASTRES NA PORÇÃO MINEIRA DA BACIA.	203
QUADRO 11.7 – EVENTOS DE INUNDAÇÃO INVENTARIADOS NO PGR: CONSISTÊNCIA COM DADOS RECENTES DO S2ID E DO ATLAS DE DESASTRES NA PORÇÃO FLUMINENSE DA BACIA.....	206
QUADRO 11.8 – EVENTOS DE INUNDAÇÕES INVENTARIADOS NO PGR NA PORÇÃO PAULISTA DA BACIA.	209

LISTA DE SIGLAS

AGEVAP – Associação Pró-Gestão das Águas do Rio Paraíba do Sul

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

BAU – *Business as Usual*

BHPS – Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul

BHO – Base Hidrográfica Ottocodificada

CCKP – *Climate Change Knowledge Portal*

CEAA – Comtas Econômicas Ambientais da Água

CEIVAP – Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul

CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

CL – Conformidade Legal

CNI – Confederação Nacional das Indústrias

CRH-SP – Conselho Estadual de Recursos Hídricos de São Paulo

EDBH-PS – Estudo de Demandas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul

EDH-PS – Estudo das Disponibilidades Hídricas da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul

FBN – Fixação Biológica de Nitrogênio

FIESP – Federação das Indústrias de São Paulo

GTEE – Grupo de Trabalho dos Estudos Estratégicos

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

IC – Intervalo de Confiança

ILPF – Integração Lavoura-Pecuária-Floresta

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCA – Índice de Preços ao Consumidor Amplo

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

MCa – Mudança do Clima Aguda

MCc – Mudança do Clima Crônica

MDIC – Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços

MGB – Modelo de Grandes Bacias

MME – Ministério de Minas e Energia

MSP – Manejo Sustentável da Paisagem

ONU – Organização das Nações Unidas

PERH-SP – Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo

PGR – Plano de Gerenciamento de Riscos

PIB – Produto Interno Bruto

PIRH-PS – Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul

PNSH – Plano Nacional de Segurança Hídrica

RPD – Recuperação de Pastagens Degradadas

S2ID – Sistema Integrado de Informações sobre Desastres

SAFs – Sistemas Agroflorestais

SbN – Soluções Baseadas na Natureza

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SPD – Sistema de Plantio Direto

SPDH – Sistema de Plantio Direto para Hortaliças

TNC – *The Nature Conservancy*

TR – Tempo de Retorno

UP – Unidade de Planejamento

VAB – Valor Adicionado Bruto

VAL – Valor Adicionado Líquido

1. APRESENTAÇÃO

Este documento técnico consiste no Produto 6 do estudo em desenvolvimento para a Associação Pró-Gestão das Águas do Rio Paraíba do Sul – AGEVAP com vistas à atualização do quadro de demandas hídricas e atualização dos balanços hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul.

O estudo vem sendo elaborado no contexto do contrato nº 071/2023 assinado entre a AGEVAP e o Consórcio NIPPON KOEI LAC – REGEA – RHAMA. Nesse sentido, este produto apresenta a avaliação do impacto econômico e social e das mudanças climáticas no balanço hídrico. Para isso, o presente documento é estruturado em 11 capítulos, incluindo este de apresentação, como exposto a seguir:

- ✓ Capítulo 1 – Apresentação: apresenta a estrutura do documento;
- ✓ Capítulo 2 – Objetivos: apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos a serem atingidos com o desenvolvimento do estudo;
- ✓ Capítulo 3 – Área de abrangência dos estudos: apresenta a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, como área de abrangência do trabalho em desenvolvimento;
- ✓ Capítulo 4 – Metodologia de processo: apresenta o caminho previsto para a execução do trabalho, envolvendo todas as etapas de estudo, bem como contextualiza os resultados obtidos nas etapas anteriores e em outros estudos utilizados como base para este produto;
- ✓ Capítulo 5 – Histórico de eventos hidrológicos críticos: apresenta um histórico sobre eventos críticos hidrológicos ocorridos na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul;
- ✓ Capítulo 6 – Mudanças detectadas no ambiente: explora as causas de eventuais mudanças detectadas no ambiente, principalmente se estão relacionadas à mudança no uso e ocupação do solo e/ou climática;
- ✓ Capítulo 7 – Impacto das mudanças climáticas no balanço hídrico: avalia o impacto das mudanças climáticas no balanço hídrico a partir de cenários de disponibilidade hídrica e demandas impactadas pelas alterações climáticas;
- ✓ Capítulo 8 – O valor da água e os impactos das mudanças climáticas: apresenta aspectos relacionados ao uso da água para cada setor usuário e a importância de se conhecer seu valor;
- ✓ Capítulo 9 – Impactos econômicos e sociais na bacia do rio Paraíba do Sul: apresenta os impactos propriamente ditos das mudanças climáticas para cada setor usuário e aspectos voltados à priorização de usos e proposição de estratégias voltadas a questões operacionais;

-
- ✓ Capítulo 10: Considerações finais: apresenta alguns comentários sobre os resultados do presente produto;
 - ✓ Capítulo 11 – Referências.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do presente estudo trata da atualização do quadro de demandas e do balanço hídrico na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. Para isso, várias atividades vêm sendo desenvolvidas, como será apresentado mais adiante no capítulo de metodologia.

Este produto trata especificamente da avaliação do impacto econômico e social e do impacto das mudanças climáticas no balanço hídrico, realizado a partir dos resultados das estimativas de demandas do presente estudo, em cotejo com a base de disponibilidade hídrica e em cenários de mudança climática advinda do Estudo das Disponibilidades Hídricas na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul – EDH-PS.

Podem ser destacados, na sequência, alguns objetivos específicos e que são atendidos no contexto desse produto:

- Avaliar o impacto das mudanças climáticas no balanço hídrico a partir de cenários de disponibilidade hídrica e demandas impactadas pelas alterações climáticas;
- Apresentar um histórico sobre eventos críticos hidrológicos ocorridos na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, bem como estimar as causas de eventuais mudanças detectadas no ambiente, principalmente se estão relacionadas à mudança no uso e ocupação do solo e/ou climática;
- Análise da mudança do clima em processos de planejamento do país;
- Avaliar o impacto econômico e social do déficit hídrico considerando os principais usuários de recursos hídricos da bacia e avaliar estratégias de priorização das demandas no âmbito do balanço hídrico;
- Analisar os cenários envolvendo variáveis econômicas e sociais, realizando uma análise crítica e comparativa com os anos afetados pela crise hídrica;
- Apresentar uma estimativa do prejuízo financeiro pela redução do atendimento às demandas da bacia.

3. ÁREA DE ABRANGÊNCIA DOS ESTUDOS E SISTEMATIZAÇÃO DA BASE ESPACIAL

Conforme já exposto nas etapas anteriores e no termo de referência de desenvolvimento deste estudo, a área de abrangência trata da totalidade da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, envolvendo a bacia como um todo e suas Unidades de Planejamento e Gestão, de acordo com o Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul – PIRH-PS e conforme exposto no Quadro 3-1.

A Figura 3-1 espacializa as Unidades de Planejamento no contexto da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul e apresenta a localização dos três estados que a bacia faz parte (Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo).

Quadro 3-1 – Áreas de abrangência das Unidades de Planejamento.

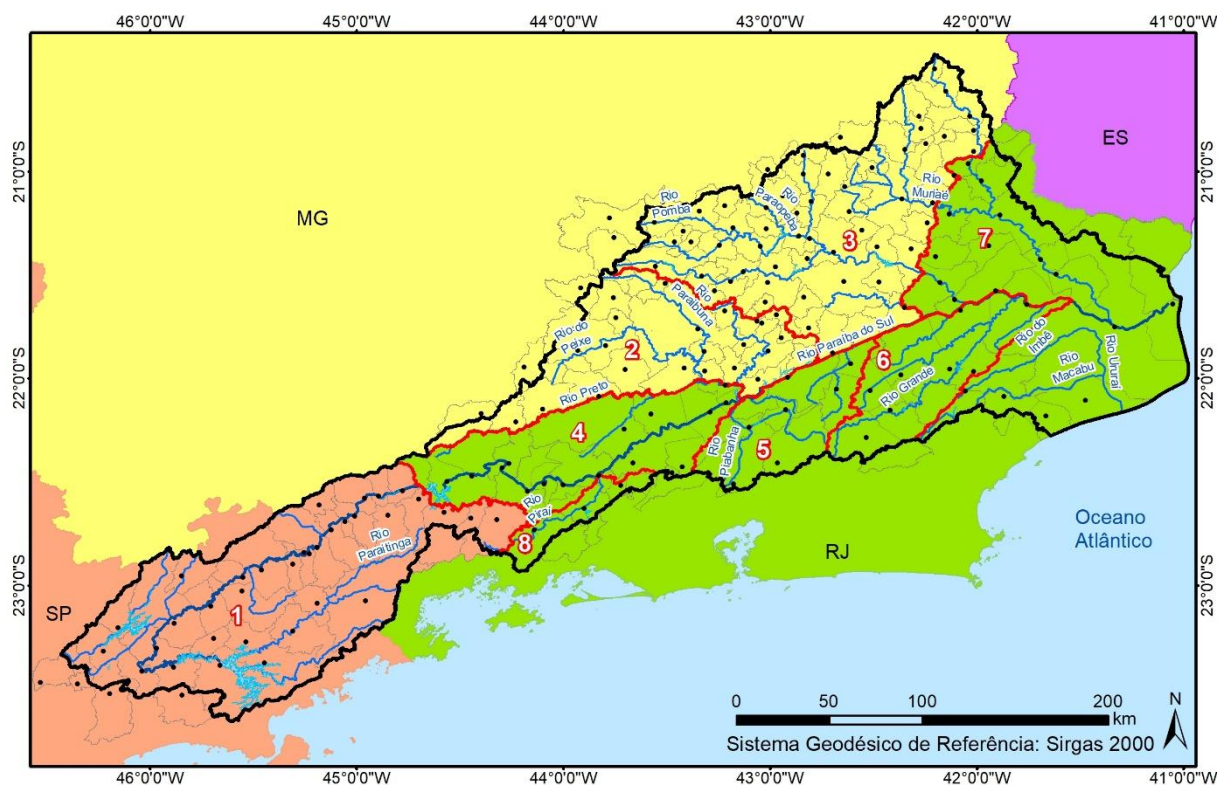
Nº	Nome	Área (km²)	% da bacia do rio Paraíba do Sul	Unidade da Federação
1	Paraíba do Sul – Trecho Paulista	13.944,01	22,6%	SP
2	Preto Paraibuna	7.185,99	11,7%	MG
3	Pomba e Muriaé	13.537,26	22,0%	MG
4	Médio Paraíba do Sul	6.429,06	10,4%	RJ
5	Piabanha	3.459,19	5,6%	RJ
6	Rio Dois Rios	4.462,38	7,3%	RJ
7	Baixo Paraíba do Sul	11.509,60	18,7%	RJ
8	Sub-bacia do Rio Pirai	1.017,90	1,7%	RJ

Fonte: PIRH-PS, 2021.

Além da divisão em Unidades de Planejamento, o Estudo das Disponibilidades Hídricas na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul – EDH-PS adota a divisão por sub-bacia afluente e Ottobacias. A Figura 3-2 apresenta a localização das 13 sub-bacias que compõem a bacia do rio Paraíba do Sul, sendo elas: Alto Vale do Rio Paraíba do Sul, Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul, Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul, Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul, Rio Carangola, Rio Dois Rios, Rio Muriaé, Rio Paraibuna, Rio Piabanha, Rio Pirai, Rio Pomba e Rio Preto.

Assim, destaca-se que as informações de balanço hídrico a serem apresentadas no presente relatório são espacializadas por ottobacias / microbacias (trechos de rio), ou seja, na discretização dos estudos de disponibilidade hídrica. Dessa forma, os resultados podem ser analisados por trecho de rio ou por microbacia.

Figura 3-1 – Unidades de planejamento e principais cursos d'água.



Legenda

- Sede municipal
- Principais cursos d'água
- Rio Paraíba do Sul
- Principais massas d'água
- Limite municipal
- Unidade de Planejamento
- Bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul

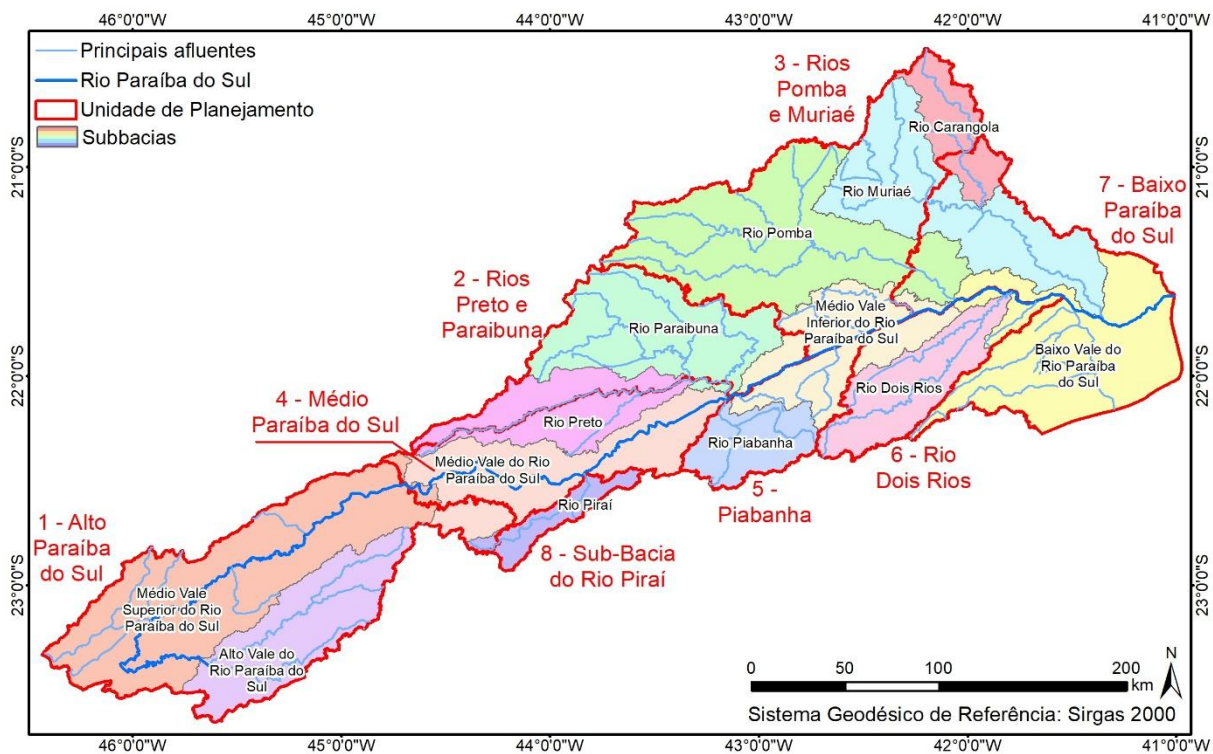
Unidade da Federação

- Espírito Santo
- Minas Gerais
- Rio de Janeiro
- São Paulo

Código da Unidade de Planejamento	Comitê	Nome da Unidade de Planejamento	Unidade da Federação
1	CBH - Paraíba do Sul (SP)	Alto Paraíba do Sul	São Paulo
2	CBH - Preto Paraibuna	Rios Preto e Paraibuna	Minas Gerais
3	COMPÊ (MG)	Rios Pomba e Muriaé	Minas Gerais
4	CBH - Médio Paraíba do Sul	Médio Paraíba do Sul	Rio de Janeiro
5	Comitê Piabanha	Piabanha	Rio de Janeiro
6	CBH - Rio Dois Rios	Rio Dois Rios	Rio de Janeiro
7	CBH - Baixo Paraíba do Sul	Baixo Paraíba do Sul	Rio de Janeiro
8	Comitê Guandu (Sub-bacia do Rio Pirai)	Sub-Bacia do Rio Pirai	Rio de Janeiro

Fonte: elaborado pelo Consórcio.

Figura 3-2 – Divisão da bacia do rio Paraíba do Sul em Sub-bacias e Unidades de Planejamento



Fonte: elaborado pelo Consórcio

4. CONTEXTUALIZAÇÃO E METODOLOGIA

Este trabalho está previsto para ser desenvolvido em um total de oito etapas, tendo iniciado com o planejamento do estudo e seguindo até a consolidação do relatório final e do banco de dados com as informações geradas e sistematizadas ao longo do estudo.

Para entendimento das etapas de desenvolvimento do estudo, foi construída a Figura 4-1 com o processo adotado envolvendo o caminho previsto, destacando, em verde, as etapas já concluídas, envolvendo a anterior e a relacionada ao presente produto. Vale o destaque para a etapa 6, que dá origem ao Produto 5, que está sendo desenvolvida em paralelo com esta etapa 7.

A presente etapa refere-se à avaliação do impacto econômico e social e do impacto das mudanças climáticas no balanço hídrico. Problemas relacionados à escassez hídrica e déficit de disponibilidade hídrica podem afetar os usos de água e, conseqüentemente, levar a impactos econômicos e sociais à bacia. Correlacionados a isso, têm-se os processos de mudanças climáticas que vêm levando ao incremento de situações de escassez hídrica, também afetando o balanço hídrico da bacia.

Para o desenvolvimento dessa etapa, foi proposto o fluxograma de processo apresentado na Figura 4-2, que terá seu detalhamento exposto na sequência, com a metodologia a ser utilizada para cada uma das atividades.

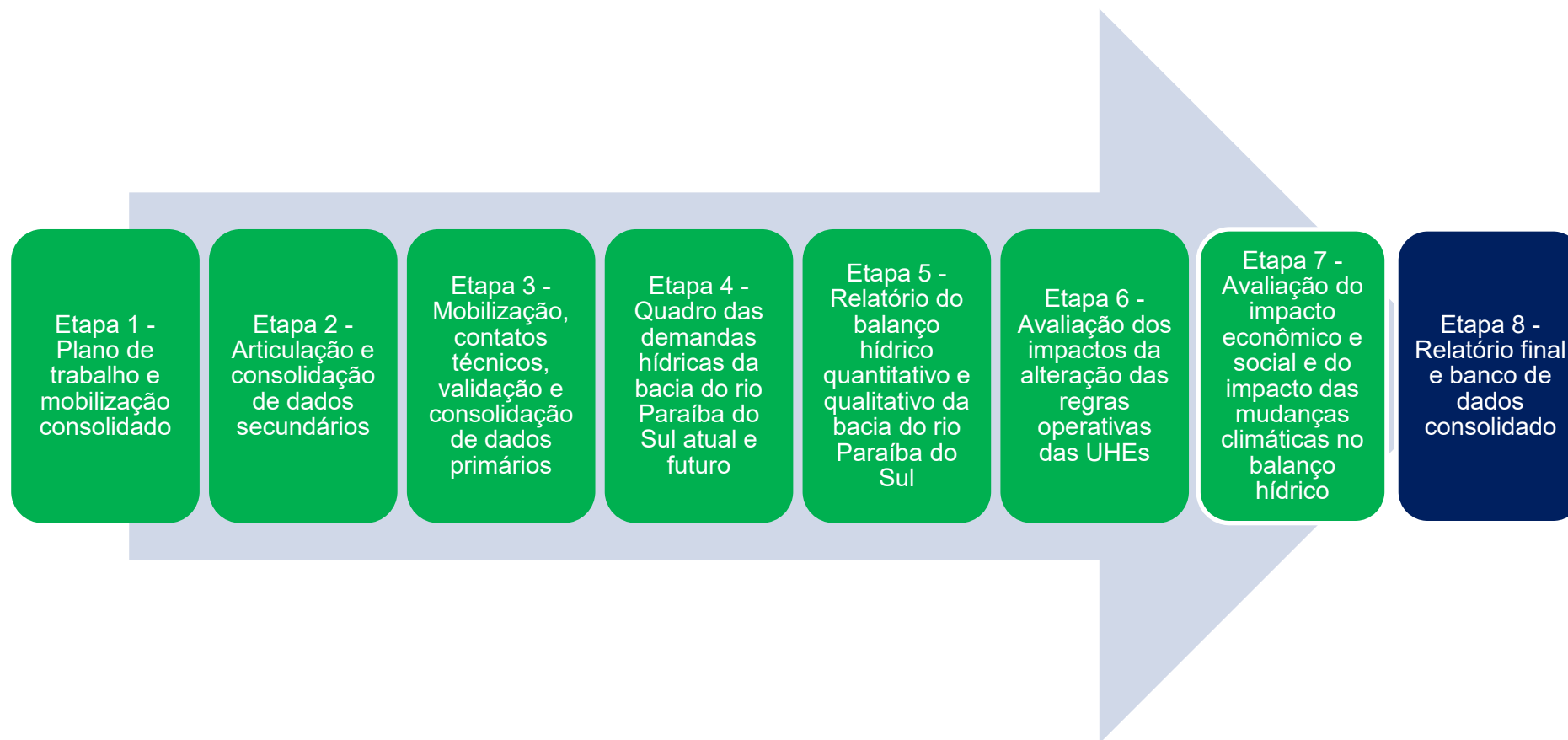


Figura 4-1 – Fluxograma de processo para o desenvolvimento do estudo.

Fonte: Elaborado pelo Consórcio.

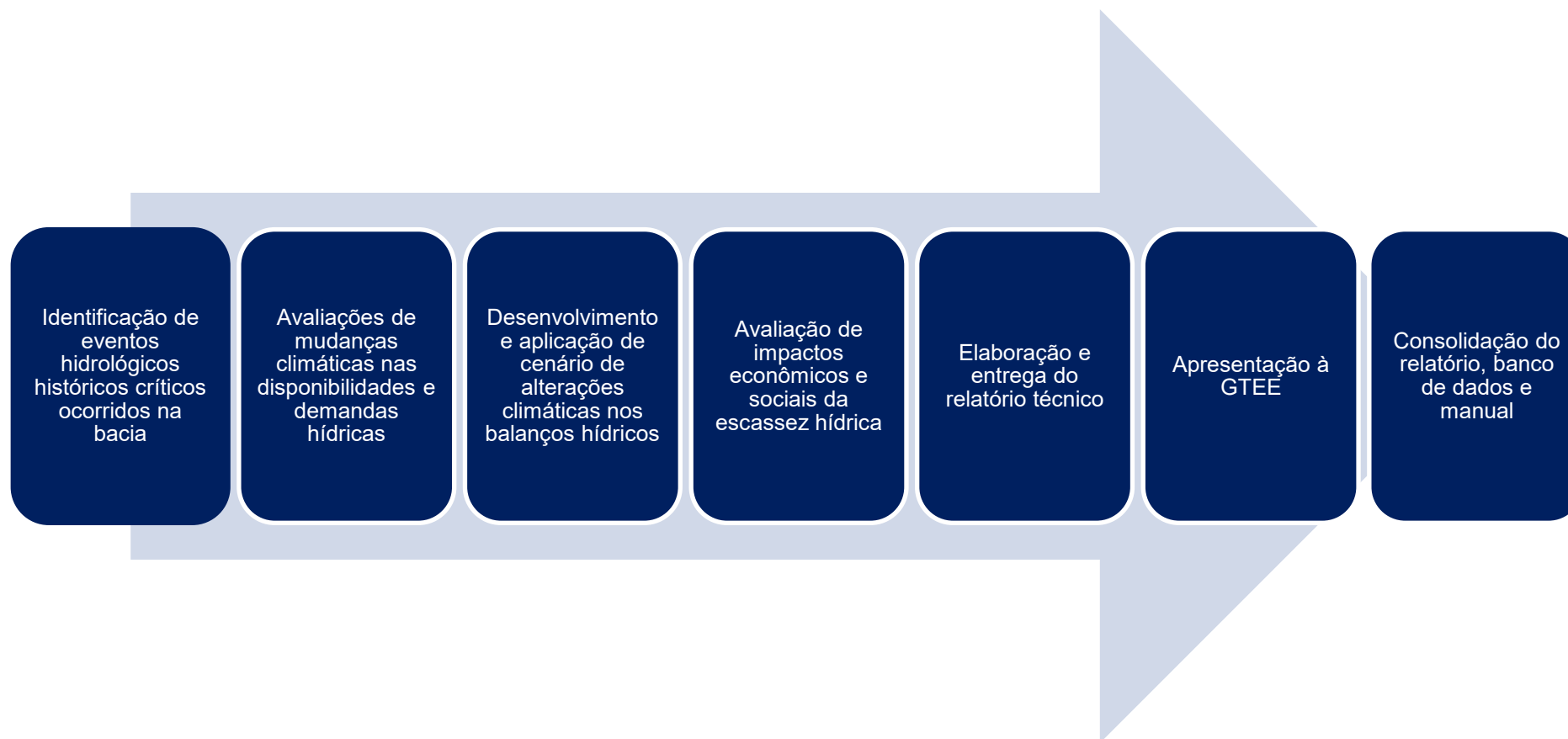


Figura 4-2 – Fluxograma com as atividades previstas para serem executadas na Etapa 7

Fonte: Elaborado pelo Consórcio.

De forma a continuar as análises de balanço hídrico realizadas nas etapas anteriores, serão consideradas avaliações de impactos econômicos e social do déficit hídrico advindos de alterações no clima da bacia. Para isso, inicialmente será feita uma breve análise histórica de eventos críticos de estiagens e cheias, a partir de dados do Plano de Gerenciamento de Riscos e atualização de suas informações.

Na sequência, será realizada uma análise de mudanças climáticas e de uso e ocupação do solo e seus efeitos hidrológicos esperados para a bacia. Essas análises são seguidas de avaliações sobre modificações das demandas pelo uso da água que, conseqüentemente, alterarão os balanços hídricos. Dessa forma, serão apresentados balanços hídricos voltados a cenários de mudanças climáticas.

O estudo segue para análises relacionadas aos impactos econômicos e sociais para a bacia do rio Paraíba do Sul e cada bacia afluente em função de problemas relacionados à escassez hídrica e impactos advindos das mudanças climáticas. A metodologia detalhada de estudos relacionados a cada atividade é apresentada de forma específica em cada capítulo, sendo encadeada com seus resultados obtidos, o que é apresentado na sequência do documento.

5. HISTÓRICO SOBRE EVENTOS HIDROLÓGICOS CRÍTICOS

O histórico de eventos hidrológicos críticos na bacia do rio Paraíba do Sul foi elaborado com base nas informações do Plano de Gerenciamento de Riscos (PGR) da bacia, publicado em 2021, atualizando-se as informações para o momento presente. Segundo esse levantamento, os eventos foram classificados em duas categorias principais: naturais e tecnológicos. Entre os desastres de origem natural, destacam-se as estiagens, as inundações e as cheias, que são o foco desta análise.

O inventário completo foi construído a partir de diversas fontes de informação. Foram utilizados documentos oficiais, registros do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID), dados do Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (MDR, 2025), informações das defesas civis municipais, do Instituto Geológico, do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) e de outras instituições relevantes. Dessa forma, foi possível reunir um panorama abrangente dos eventos críticos registrados na bacia.

Os dados de secas e estiagens compreendem o período de 2001 a 2020, enquanto as ocorrências de inundações e cheias cobrem os anos de 1993 a 2021. Todas essas informações foram extraídas do banco de dados do PGR e representam as principais crises enfrentadas na região ao longo dessas décadas.

Com o objetivo de atualizar esse histórico e incluir os eventos mais recentes, referentes ao período de 2021 a 2024, foram realizadas novas consultas ao S2ID e ao Atlas Brasileiro de Desastres Naturais. Esse esforço permitiu uma análise mais completa e atualizada, contribuindo para a avaliação estatística e para a identificação de tendências na ocorrência dos desastres, tanto em nível estadual quanto por unidade de planejamento.

5.1. EVENTOS HIDROLÓGICOS CRÍTICOS DE SECA

O Apêndice C apresenta quadros com o número de eventos de seca registrados na bacia do rio Paraíba do Sul (Quadro 11.3 ao Quadro 11.5), incluindo tanto os dados do Plano de Gerenciamento de Riscos (PGR), elaborado em 2021, quanto informações mais recentes obtidas por meio da consulta aos sistemas nacionais de informações sobre desastres.

A atualização das bases de dados permitiu identificar seis novos eventos de seca ocorridos entre os anos de 2022 e 2024, localizados nas porções mineira e fluminense da bacia. Essa inclusão tornou o levantamento mais completo e atualizado. Por outro lado, no trecho da bacia localizado no estado de São Paulo, não foram identificados novos registros de secas nesse período recente. Dessa forma, os dados apresentados para essa região referem-se exclusivamente às informações constantes no PGR de 2021.

A análise dos eventos de seca e estiagem registrados na bacia do rio Paraíba do Sul mostra que os anos de 2014 e 2015 foram os mais críticos em termos de quantidade de ocorrências. Nestes anos concentram-se a maior parte dos eventos ao longo da série histórica inventariada. Além disso, o trecho fluminense da bacia apresentou um número significativo de eventos também em 2017, o que pode estar relacionado à ocorrência de um fenômeno de seca localizado, que afetou de forma mais intensa determinadas regiões do estado do Rio de Janeiro.

Para compreender melhor como os eventos de seca têm se comportado ao longo do tempo em cada região da bacia, os dados foram organizados por Unidade de Planejamento (UP). A partir dessa segmentação, foram elaborados gráficos que apresentam a quantidade de eventos registrados por ano, de forma a dar suporte a uma possível observação se o número de ocorrências está aumentando ou diminuindo com o tempo. No entanto, em algumas Unidades de Planejamento, como a do Piabanha e a da Sub-bacia do Rio Pirai, foi registrado apenas um ano com eventos de seca durante todo o período analisado, assim como também vale para áreas como Rios Preto e Paraibuna e no trecho paulista da bacia, com eventos observados apenas em dois anos. Por isso, nessas áreas, não foi possível identificar qualquer tendência de crescimento ou redução das ocorrências.

Mesmo com essas limitações, foi possível elaborar um gráfico geral por trecho da bacia, considerando todos os eventos registrados, inclusive nas regiões com dados mais escassos. Assim, foi possível obter uma visão mais ampla e integrada do comportamento das secas na bacia como um todo, mesmo que algumas análises mais detalhadas por região não tenham sido possíveis devido à limitação dos dados.

Na porção mineira da bacia, os dados integrados na Figura 5.1 mostram uma leve tendência de aumento no número de eventos de seca ao longo do tempo, sugerindo possibilidade que a região venha se tornando mais vulnerável a esse tipo de evento.

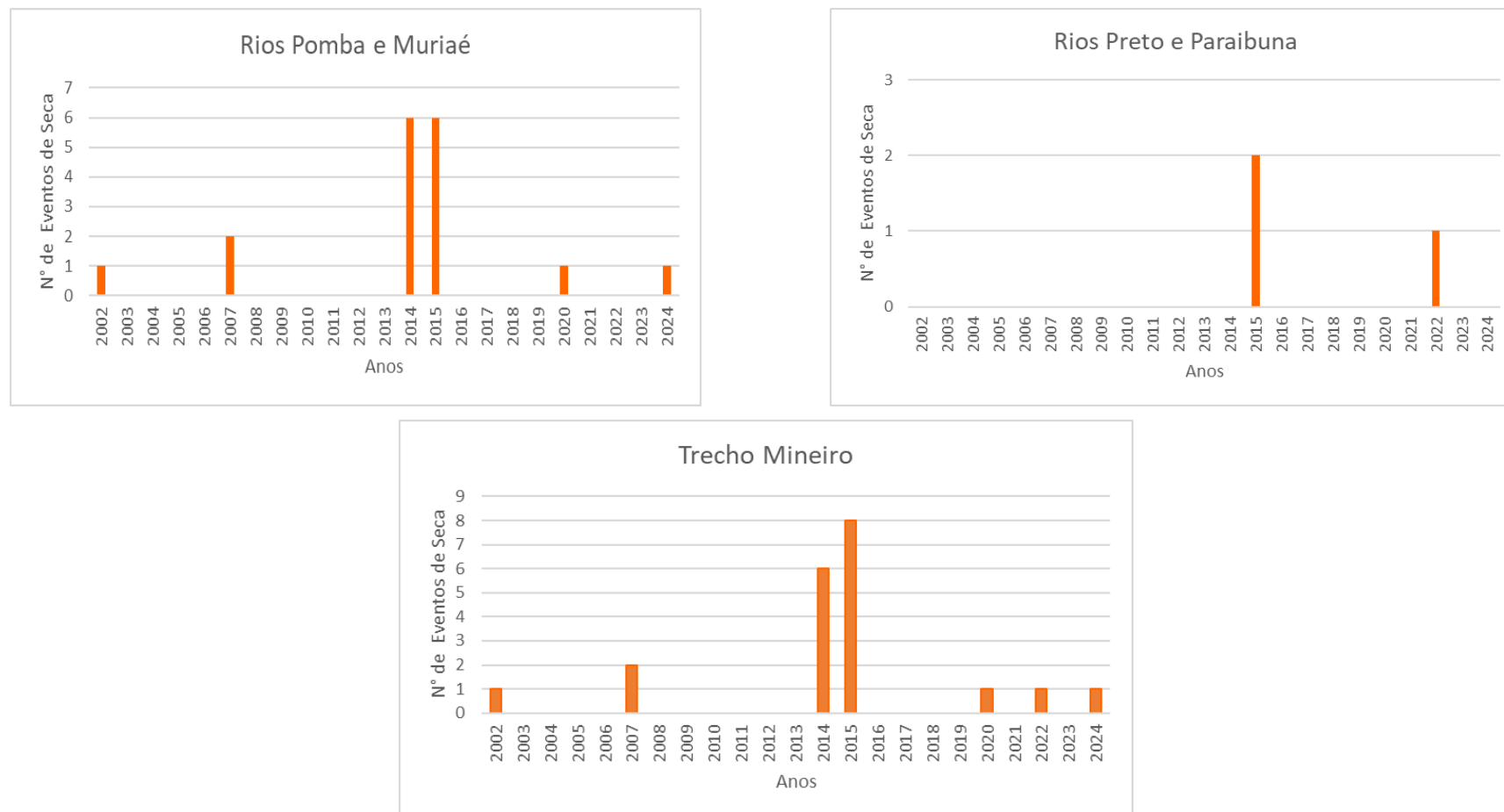
Na porção fluminense (Figura 5.2), a tendência varia entre as diferentes unidades de planejamento. Na Figura 5.2, não são apresentados gráficos das bacias dos rios Piabanha e Pirai, uma vez que possuem apenas um evento identificado em cada, nos anos de 2015 e 2017, respectivamente. O mesmo ocorre com a região do Médio Paraíba do Sul, que não teve gráfico apresentado por não ter tido evento formalmente identificado no período.

A análise da porção paulista da bacia, correspondente à Unidade de Planejamento do Alto Paraíba do Sul (Figura 5.3) apresenta eventos formalizados apenas em dois anos, o que impossibilita tal análise de tendência.

Como pode ser observado ao longo dos gráficos da Figura 5.1 até a Figura 5.3, há relevante variação nos valores identificados a cada ano nas bacias afluentes ao rio Paraíba do Sul. Essa variação pode tratar de questões relacionadas ao aumento propriamente dito de estiagens, mas também a outros fatores como o baixo preparo de determinados municípios para lidar com a seca, alterações de uso e ocupação do solo, possíveis conflitos relacionados ao balanço hídrico no município ou até problemas específicos do sistema de abastecimento público. Assim, os valores e tendências devem ser analisados com precaução, sendo apenas considerados como uma referência em função da base de dados dos sistemas de informações avaliados.

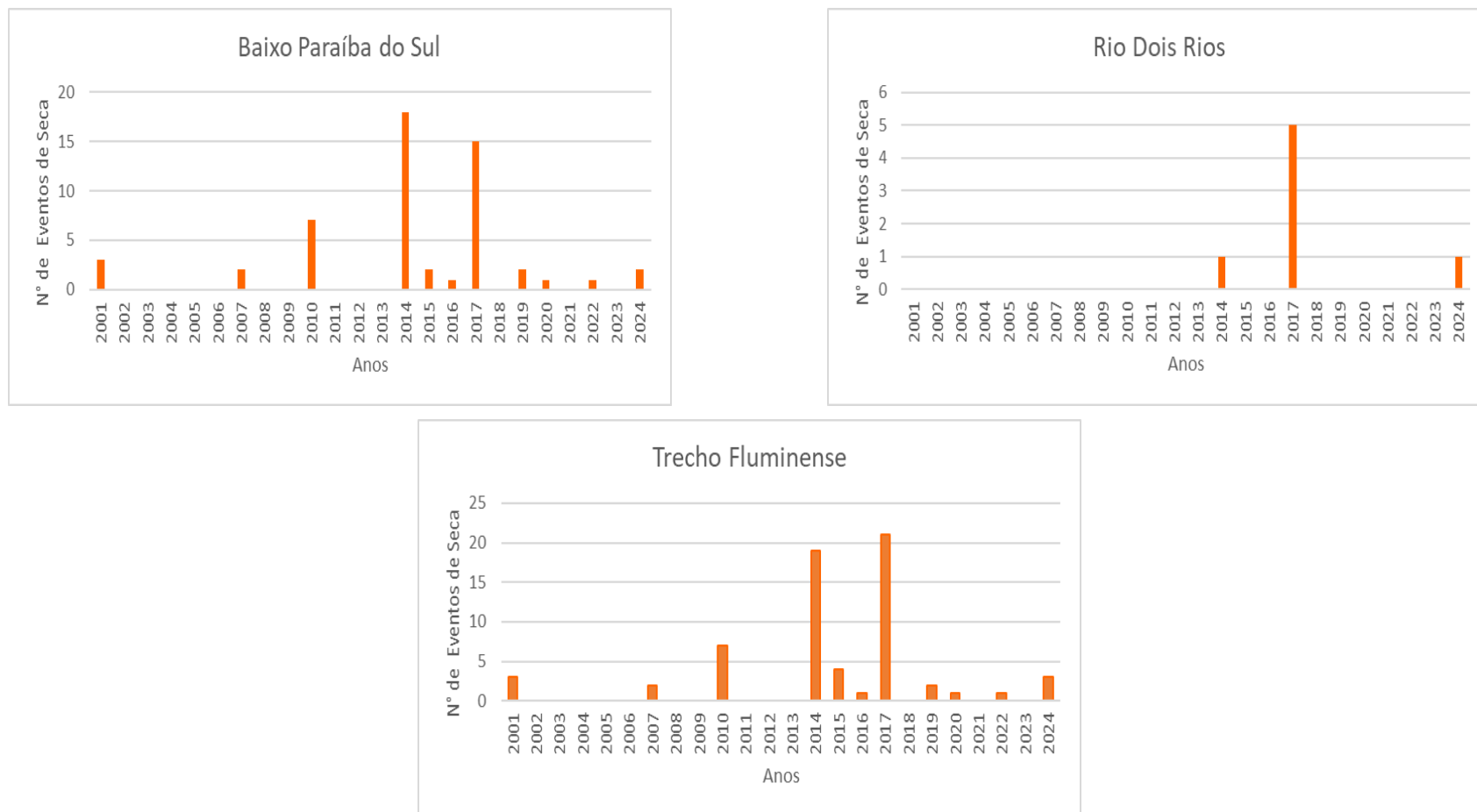
Dessa forma, é importante destacar que a identificação de tendências no número de eventos de seca ou estiagem deve ser analisada junto a outras informações como mudanças no uso e ocupação do solo, como o desmatamento, a urbanização e a intensificação da agricultura, podem influenciar diretamente a ocorrência desses eventos. Além disso, as mudanças climáticas globais, com alterações nos padrões de precipitação e aumento das temperaturas médias, têm impacto direto na frequência e intensidade das secas. Por isso, a análise das tendências deve sempre ser acompanhada por uma compreensão mais ampla dos fatores ambientais e climáticos que afetam a região.

Figura 5.1 – Distribuição e tendência de secas por Unidade de Planejamento e no Trecho Mineiro



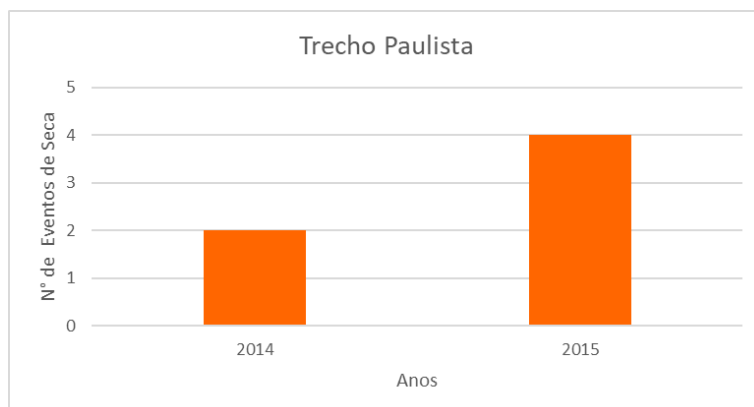
Fonte: Elaborado pelo Consórcio.

Figura 5.2 – Distribuição e tendência de secas por Unidade de Planejamento e no Trecho Fluminense



Fonte: Elaborado pelo Consórcio.

Figura 5.3 – Distribuição e tendência de secas no Trecho Paulista – Alto Paraíba do Sul.



Fonte: Elaborado pelo Consórcio

Em complemento ao registro das ocorrências de secas, o Atlas de Desastres Naturais no Brasil também apresenta informações acerca dos danos (materiais) e prejuízos (atividades econômicas interrompidas) causados por tais eventos, sendo possível estimar as ordens de grandeza envolvidas. A contabilidade das perdas (sendo "perdas" a nomenclatura para a consideração agregada dos danos e dos prejuízos) é de suma importância para subsidiar os esforços de planejamento e análise dos benefícios decorrentes das perdas a serem evitadas pela mitigação de eventos futuros. A identificação das perdas associadas a cada um dos desastres provém das informações prestadas pelos municípios ao órgão estadual de Defesa Civil ou à Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil para declarações municipais de Situação de Emergência ou de Estado de Calamidade Pública que foram reconhecidas pelo Governo Federal. Assim sendo, é possível obter dados no nível municipal e agregá-los para representar a situação na bacia do rio Paraíba do Sul.

Destaca-se, no entanto, que esse registro não foi concebido para formar uma base nacional de perdas econômicas, mas sim para viabilizar a solicitação de recursos de resposta e reconstrução. A partir de 2012, com o Formulário de Informações do Desastre, passou-se a registrar as informações sobre afetados, danos e prejuízos de forma mais sistemática, ainda que limitadas ao momento da notificação inicial (ou seja, sem atualizações posteriores). O preenchimento, de responsabilidade dos municípios, pode variar tanto em qualidade como na padronização da contabilização das perdas, além de variar conforme a estrutura local e o tipo de desastre. Prejuízos, por exemplo, são mais dificilmente estimáveis do que os danos, haja vista sua natureza de interrupção de um serviço e não da materialização de uma estrutura física visivelmente comprometida.

Mesmo com essas ressalvas, trata-se de rica base de registros para informar a ordem de grandeza envolvida nos eventos de secas e, como é visto no próximo item, também de

inundações. A base de registros de perdas cobre os anos de 1991 a 2024, e os valores monetários são apresentados a preços de 2024 com base na correção dos valores originais pela inflação, com base no índice de preços IGP-DI (conforme MDR, 2025). A consulta na base de dados de perdas econômicas para os municípios da bacia do rio Paraíba do Sul, revela um total de 50 eventos de categoria "estiagem e seca". Nota-se, de antemão, que esses registros atrelados à informação de perdas econômicas são inferiores aos quantitativos apresentados nos quadros acima, reforçando que essas estimativas são subestimações que concedem uma ordem de grandeza dos valores comprometidos pelos eventos. No total declarado de perdas, tem-se o registro de R\$ 452 milhões a preços de 2024.

O Quadro 5-1 apresenta a distribuição de 43 dos registros que trazem valores para as perdas, declarados pelos 27 municípios afetados. O município de São Francisco de Itabapoana, com a ocorrência de 3 eventos de secas, registou as maiores perdas econômicas associadas, que montam em R\$ 100 milhões a preços de 2024, seguido do município de Itaocara (R\$ 69 milhões).

Quadro 5-1 – Registros de perdas econômicas por eventos de estiagem e seca nos municípios da bacia do rio Paraíba do Sul

Ordem	Município	Qtde. Eventos	Perdas (R\$, MM)
1	São Francisco de Itabapoana	3	100,02
2	Itaocara	2	68,69
3	Porciúncula	2	39,05
4	Natividade	4	31,45
5	São João da Barra	2	22,72
6	Cambuci	1	17,41
7	Italva	3	16,48
8	Aperibé	1	16,46
9	Itaperuna	1	16,32
10	Miracema	4	14,84
11	Laje do Muriaé	1	14,19
12	São Fidélis	2	13,84
13	São José de Ubá	1	10,74
14	Santa Maria Madalena	1	10,39
15	Santo Antônio de Pádua	1	9,91
16	São Sebastião do Alto	1	8,53
17	Cardoso Moreira	2	7,63
18	Guidoval	1	6,46
19	Recreio	2	5,13
20	Visconde do Rio Branco	1	4,92

Ordem	Município	Qtde. Eventos	Perdas (R\$, MM)
21	Goianá	1	4,32
22	Coronel Pacheco	1	4,23
23	Quissamã	1	3,71
24	Lima Duarte	1	2,69
25	Santa Isabel	1	1,32
26	São José do Vale do Rio Preto	1	0,10
27	Rio Claro	1	0,05

Obs.: municípios ordenados da maior para a menor perda identificada em R\$
 Fonte: elaborado pelo Consórcio com base em MDR, 2025.

Torna-se bastante evidente que as crises hídricas decorrentes de escassez geram prejuízos econômicos, mas cuja contabilização ainda enfrenta importantes desafios. O Capítulo 8 retoma e aprofunda essa discussão.

5.2. EVENTOS HIDROLÓGICOS CRÍTICOS DE INUNDAÇÃO

O Apêndice D apresenta quadros com os eventos de inundação registrados por município, com base no inventário do Plano de Gerenciamento de Riscos (PGR) e que foram atualizados com informações mais recentes, a partir do ano de 2021 (Quadro 11.6 ao Quadro 11.8). Nesse novo levantamento, foram identificados 30 novos eventos de inundação, concentrados principalmente nas regiões mineira e fluminense da bacia do rio Paraíba do Sul.

Assim como aconteceu com os eventos de seca, os municípios do estado de São Paulo não tiveram registros de inundações nas bases nacionais de informações sobre desastres no período recente. Por isso, os dados apresentados para essa região são exclusivamente os que constam no PGR, elaborado anteriormente.

É importante destacar que o número elevado de eventos registrado na porção paulista da bacia se deve, principalmente, aos municípios de Guarulhos, Mogi das Cruzes e Itaquaquecetuba. Nesses casos, a forma como os dados foram reportados contabiliza inundações em áreas urbanas por local afetado (como ruas e bairros específicos), o que aumenta significativamente o número total de registros. Além disso, vale lembrar que esses três municípios não estão totalmente inseridos na bacia do rio Paraíba do Sul. Suas sedes e parte significativa de seus territórios pertencem, na verdade, à bacia do Alto Tietê. Isso significa que muitos dos eventos registrados podem ter ocorrido fora dos limites da bacia analisada, o que deve ser levado em consideração na interpretação dos dados.

Em Minas Gerais, vários municípios apresentaram mais de 10 ocorrências de inundações no período analisado. São eles: Além Paraíba, Cataguases, Dona Eusébia, Guidoal, Juiz de Fora, Muriaé, Palma, Santos Dumont, Tocantins e Tabuleiro. Já no estado do Rio de Janeiro, os municípios com maior número de registros foram Petrópolis, Campos dos Goytacazes e Aperibé. Destaca-se o caso de Petrópolis, que sozinho concentrou mais de 50 eventos de inundação, tornando-se o município com o maior número de ocorrências no período avaliado no estado.

Para compreender melhor como as inundações se distribuem ao longo do tempo e entre as diferentes regiões da bacia do rio Paraíba do Sul, também foram elaborados gráficos que apresentam a quantidade de eventos registrados por Unidade de Planejamento (UP) e também por estado.

Na porção mineira da bacia, destaca-se a UP dos Rios Pomba e Muriaé, que apresentou o maior número de eventos de inundação no ano de 2016. Somente nesse ano, foram registrados mais de 70 eventos, o que evidencia um período de alta criticidade para a região (Figura 5.4). Apesar desse pico, a linha de tendência construída a partir dos dados não indica de forma clara alteração na frequência das inundações ao longo do tempo. Já na Unidade dos Rios Preto e Paraibuna, também houve um número elevado de registros em 2016, com 17 eventos e a linha de tendência também não permite inferir um aumento ou redução clara nos eventos.

Quando se considera todo o trecho mineiro da bacia, nota-se que o ano de 2016 foi especialmente crítico, concentrando a maior parte dos eventos analisados. Ainda assim, a tendência geral das inundações nessa região apresenta uma leve queda, mas sem clareza na continuidade desse processo de redução. Essa redução é influenciada, principalmente, pelos dados das UPs dos Rios Pomba e Muriaé.

Na porção fluminense da bacia (Figura 5.5), o comportamento das inundações varia entre as Unidades de Planejamento. As regiões do Baixo Paraíba do Sul e Médio Paraíba do Sul podem ter a percepção de leve tendência de redução no número de inundações ao longo do tempo. Em contrapartida, as Unidades dos rios Dois Rios e Piabanha podem indicar possível tendência de aumento nas ocorrências. O caso da UP Piabanha é bastante relevante, com diversos eventos registrados entre 2016 e 2020, o que eleva significativamente a média da região. De toda forma, vale destacar que para ter o entendimento claro de um possível incremento, deve-se ter um maior período histórico de dados analisados.

Quando se observa o estado do Rio de Janeiro como um todo, observa-se a possibilidade de um leve aumento na frequência das inundações. Essa possível tendência é influenciada pelo

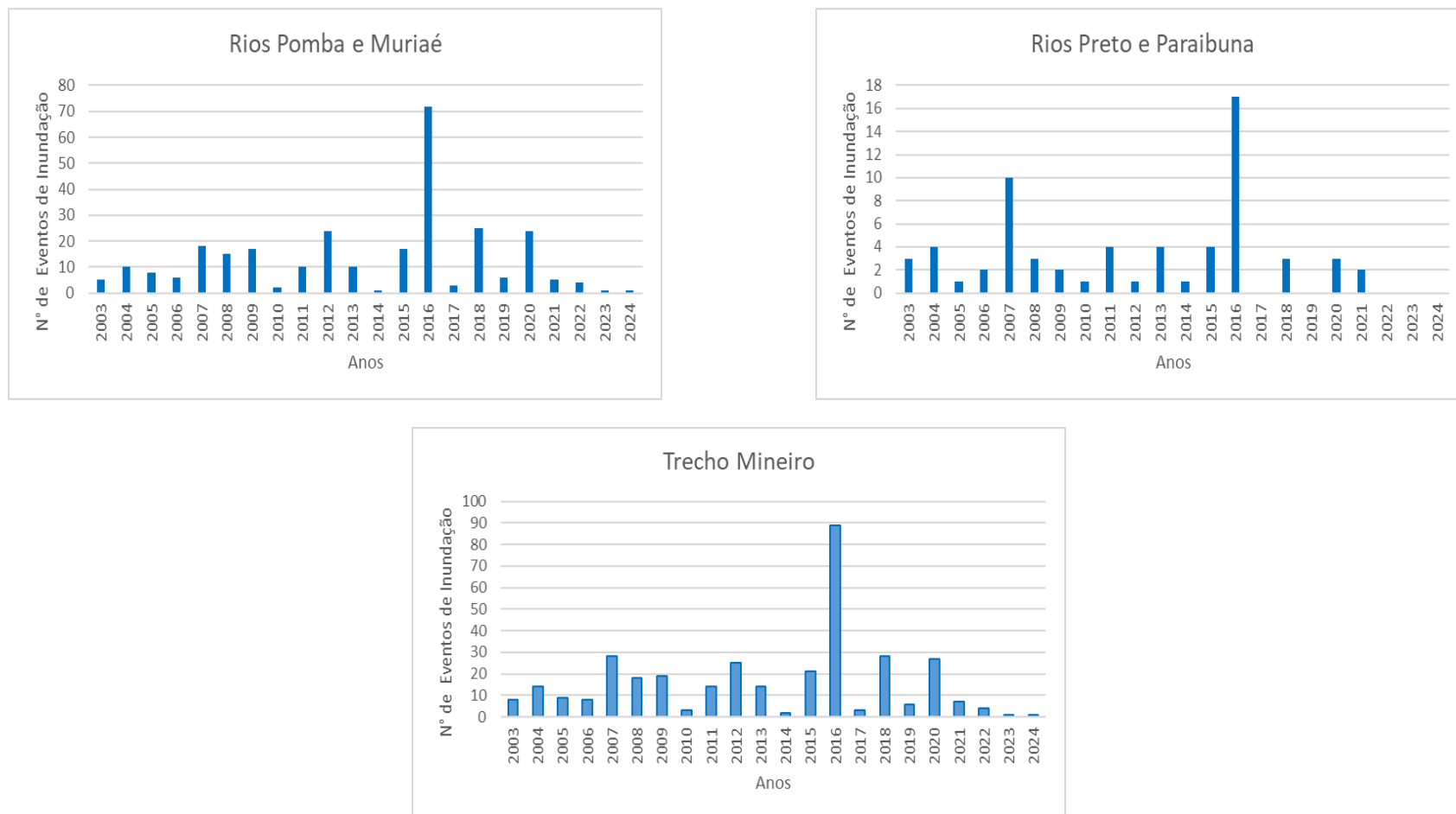
número de eventos registrados na UP Piabanha durante os anos mencionados, bem como pela concentração de ocorrências em diferentes regiões no ano de 2020, um dos mais críticos do período analisado. Esses dados reforçam a importância de monitorar continuamente essas regiões, especialmente aquelas com histórico recente de alta vulnerabilidade.

A análise do trecho paulista da bacia considerou apenas os municípios que realmente integram a área da bacia do rio Paraíba do Sul, desconsiderando os municípios de Guarulhos, Arujá, Mogi das Cruzes e Itaquaquecetuba. Esses municípios, embora apresentem um elevado número de registros de inundações, têm suas sedes e grande parte de seus territórios fora da bacia. Por isso, a exclusão se justifica diante da natureza urbana dos eventos, relacionados a alagamentos localizados e não diretamente vinculados ao comportamento hidrológico da bacia do rio Paraíba do Sul.

Dessa forma, a Figura 5.6 apresenta os dados de inundações exclusivamente para a Unidade de Planejamento do Alto Paraíba do Sul, correspondente ao trecho paulista da bacia. Os registros mais significativos ocorreram entre os anos de 2010 e 2018.

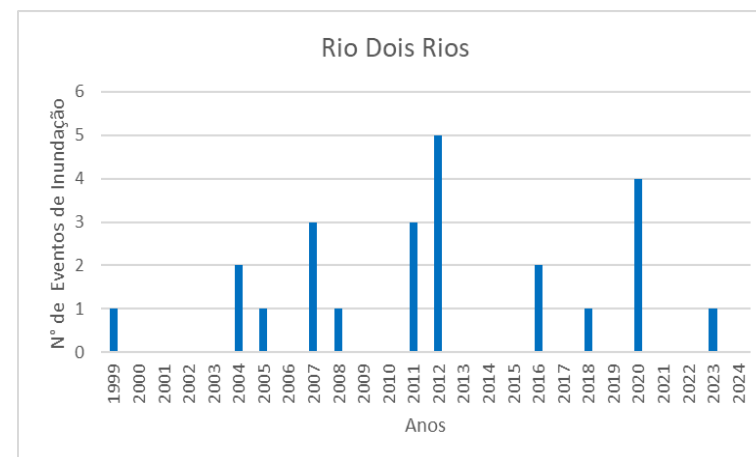
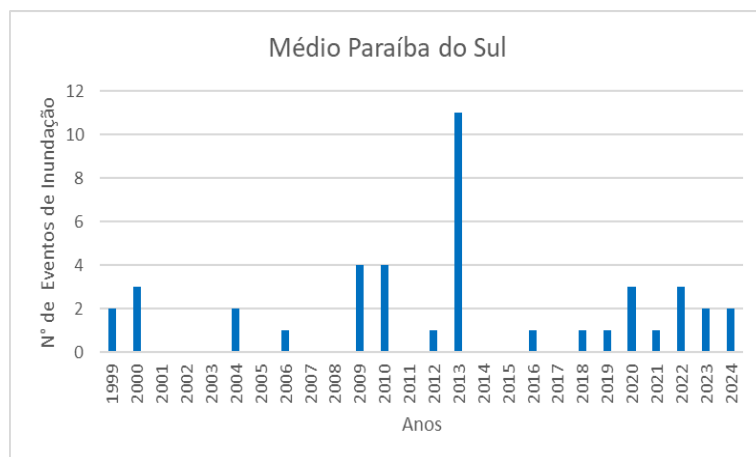
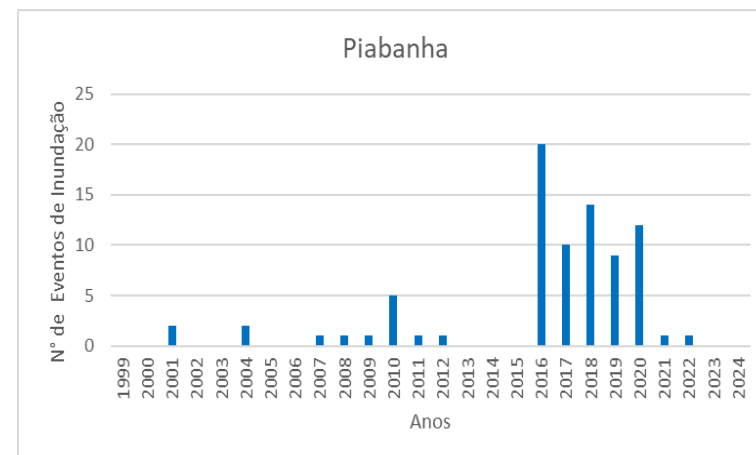
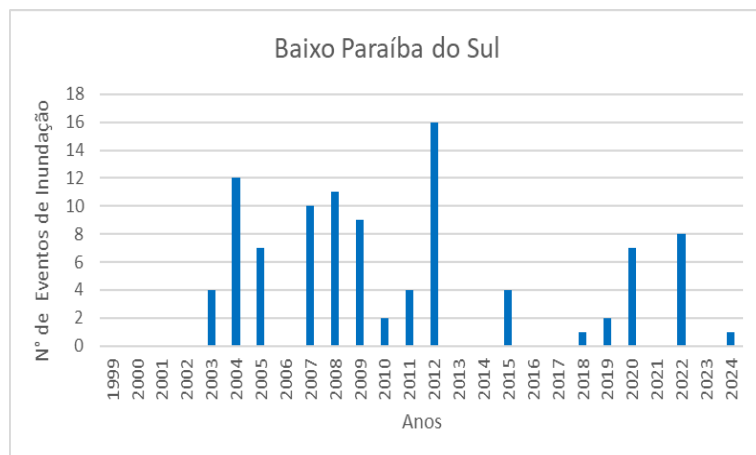
Assim como já verificado no subitem anterior para os eventos hidrológicos de secas, os gráficos de cheias (Figura 5.4 a Figura 5.6) mostram relevante variação nos valores identificados a cada ano nas bacias afluentes ao rio Paraíba do Sul. Uma série de fatores pode afetar tais valores, podendo ser citados alguns relacionados, por exemplo, o incremento de eventos críticos de alta pluviosidade, aumento de intensidade de chuvas, ausência ou reduzido preparo de determinados municípios para lidar com as cheias, alterações de uso e ocupação do solo, problemas específicos relacionados ao atendimento a usos da água para determinadas finalidades, falta de planos de contingência ou despreparo de sistemas de atendimento a emergências em determinado município. Assim, tais números ou tendências devem ser avaliados com precaução, podendo ser associados outros aspectos em uma situação em que seja interesse o detalhe para algum município ou região específica.

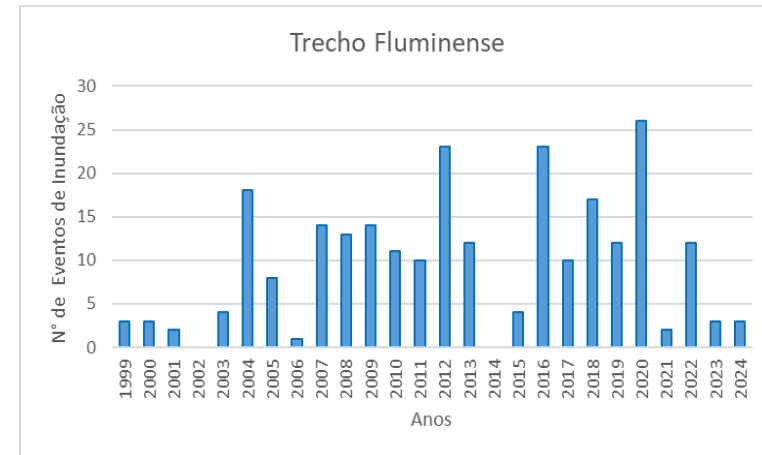
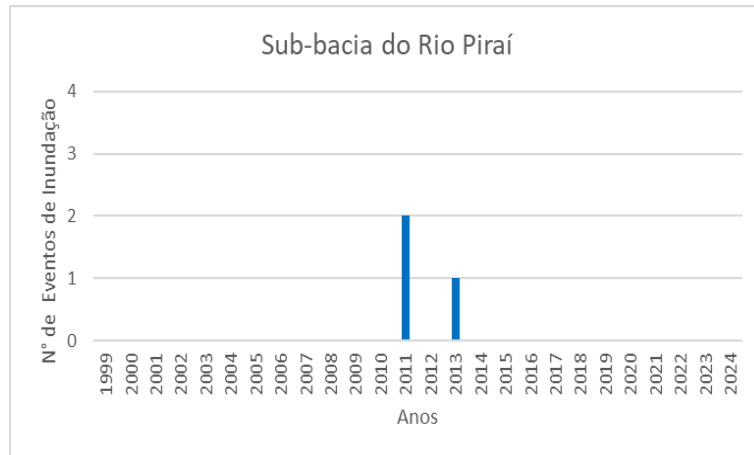
Figura 5.4 – Distribuição e tendência das inundações por Unidade de Planejamento e no Trecho Mineiro.



Fonte: Elaborado pelo Consórcio.

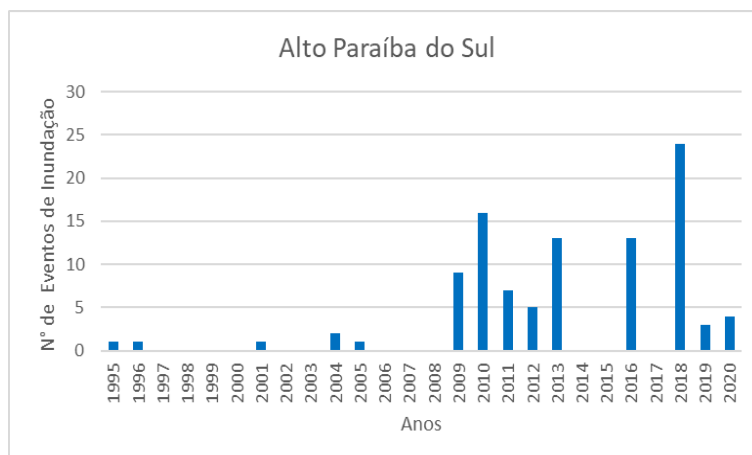
Figura 5.5 – Distribuição e tendência das inundações por Unidade de Planejamento e no Trecho Fluminense.





Fonte: Elaborado pelo Consórcio.

Figura 5.6 – Distribuição e tendência das inundações no Trecho Paulista – Alto Paraíba do Sul.



Fonte: Elaborado pelo Consórcio.

Acerca do custo econômico dos eventos de inundação, nota-se que foram encontrados 303 registros na base de dados respectiva (MDR, 2025), mas apenas 228 destes trazem anotações das perdas enfrentadas. Mesmo assim, a preços de 2024, observa-se um total de R\$ 2,65 bilhões em perdas, contabilizando danos materiais e prejuízos econômicos por atividades públicas e privadas interrompidas pelas inundações. Nota-se que os eventos de inundação são vinculados explicitamente aos recursos hídricos, uma vez que se trata do processo em que ocorre a submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água, decorrentes geralmente de chuvas torrenciais. As inundações geram perdas relativas à produção agrícola comprometida, aos danos materiais aos bens móveis e imóveis que ficam submersos, além das atividades econômicas interrompidas pela presença das águas.

O Quadro 5-2 apresenta a distribuição dos 40 municípios nos quais foram registrados os maiores valores econômicos em perdas, que juntos somam R\$ 2,56 bilhões, ou seja, 96,6% do total de perdas registradas. O município de Muriaé se destaca, pois com uma única ocorrência de inundação, registrou perdas da ordem de R\$ 313 milhões (a preços de 2024). O município de Campos dos Goytacazes, que recebe a influência do rio Muriaé (que por sua vez incorpora a vazão do rio Carangola), além da vazão do próprio rio Paraíba do Sul, registra 13 episódios associados a perdas econômicas de R\$ 224 milhões (uma média simples de R\$ 17 milhões por evento). Outro município que se destaca pela frequência na ocorrência de episódios de inundação vinculados a importantes perdas econômicas (R\$ 105 milhões) é o município de Aperibé, às margens do rio Pombo, com 14 registros.

Quadro 5-2 – Registro dos 40 municípios com as maiores perdas econômicas por eventos de inundação nos municípios da bacia do rio Paraíba do Sul.

Ordem	Município	Qtde. Eventos	Perdas (R\$, MM)
1	Muriaé	1	313,29
2	Paraíba do Sul	5	271,50
3	Cataguases	6	259,05
4	Nova Friburgo	1	248,01
5	Campos dos Goytacazes	13	224,17
6	São José do Vale do Rio Preto	1	143,63
7	São Francisco de Itabapoana	7	114,97
8	Aperibé	14	105,33
9	Cardoso Moreira	8	95,33
10	Itaperuna	5	90,83
11	Ubá	1	71,45
12	Cambuci	7	69,11
13	Carangola	5	56,16
14	Santo Antônio de Pádua	6	48,08
15	Juiz de Fora	3	39,68
16	Porciúncula	5	31,83
17	Miradouro	3	30,91
18	São João da Barra	2	27,71
19	Barra Mansa	4	26,04
20	Miracema	2	24,70
21	Rio Novo	2	22,07
22	Sapucaia	2	21,94
23	Guiricema	2	19,11
24	Cunha	3	16,96
25	Eugenópolis	4	16,75
26	Natividade	3	15,60
27	Teresópolis	3	14,36
28	Macuco	5	14,22
29	Vieiras	3	13,89
30	Pirapetinga	2	12,67
31	Bom Jardim	2	12,09
32	Miraf	2	11,68
33	Laje do Muriaé	4	11,10
34	Quissamã	1	10,08
35	Carmo	3	9,97
36	São Geraldo	4	9,66

Ordem	Município	Qtde. Eventos	Perdas (R\$, MM)
37	Leopoldina	1	9,28
38	Senador Cortes	1	9,18
39	Barra do Pirai	5	8,78
40	Itaocara	2	8,65

Obs.: municípios ordenados da maior para a menor perda identificada em R\$
 Fonte: elaborado pelo Consórcio com base em MDR, 2025.

A bacia do rio Paraíba do Sul tem enfrentado, nos últimos anos, eventos hidrológicos cada vez mais frequentes e intensos, como secas, estiagens e inundações. Esses eventos não apenas afetam diretamente o abastecimento de água e o cotidiano das populações locais, como também trazem impactos relevantes para o desenvolvimento econômico da região. De acordo com o levantamento realizado no estudo de atualização do quadro de demandas hídricas, as preocupações com o clima já estão sendo incorporadas pelas empresas, setores produtivos e o governo no momento de projetar cenários de crescimento da economia e planejar investimentos. A recorrência desses eventos tem exigido adaptações na forma como o setor econômico avalia os riscos e planeja o futuro.

O tema ganha ainda mais relevância quando se observa a crescente relação entre o risco climático e a economia nacional. Mesmo que haja investimentos em infraestrutura e modernização das atividades produtivas, a ocorrência de eventos extremos como os registrados em 2023 e 2024, com secas severas, enchentes e incêndios, pode comprometer significativamente o crescimento econômico, tanto regional quanto nacional. Nesse contexto, o impacto das mudanças climáticas não se limita à alteração do equilíbrio entre oferta e demanda de água, mas se estende ao agravamento do risco econômico. Isso se deve ao fato de a instabilidade climática interferir diretamente no planejamento das atividades produtivas, na segurança energética, na produtividade agrícola e até no custo dos seguros, ampliando as incertezas e dificultando a construção de trajetórias de crescimento estáveis e sustentáveis.

O estudo intitulado “Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos do Brasil” da ANA, publicado em 2024, aponta que a região do Atlântico Sul, onde está localizada a bacia do rio Paraíba do Sul, terá algumas alterações como consequência das mudanças climáticas. As projeções indicam tendência de diminuição da precipitação nas bacias brasileira, com exceção da Uruguai e Atlântico Sul, com relação a evapotranspiração, a região hidrográfica de interesse está em área com projeções de aumento, mas não de forma acentuada. No que se refere as vazões, não há previsão de diminuição para a região hidrográfica do Atlântico Sul.

Com base nas projeções da ANA não é esperado a redução de chuvas na região. O padrão das ocorrências de inundação tende a aumentar, visto que a bacia apresenta mudanças de uso e ocupação do solo ao longo dos anos, promovendo uma maior impermeabilização do solo, o que aumenta o escoamento superficial e por consequência, as vazões de pico durante as chuvas. Esse contexto também tende a influenciar a dinâmica das águas subterrâneas, em decorrência da diminuição da água infiltrada no solo.

6. MUDANÇAS DETECTADAS NO AMBIENTE

Neste capítulo são exploradas as causas de eventuais mudanças detectadas no ambiente, principalmente se estão relacionadas à mudança no uso e ocupação do solo ou mudanças climáticas.

6.1. USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

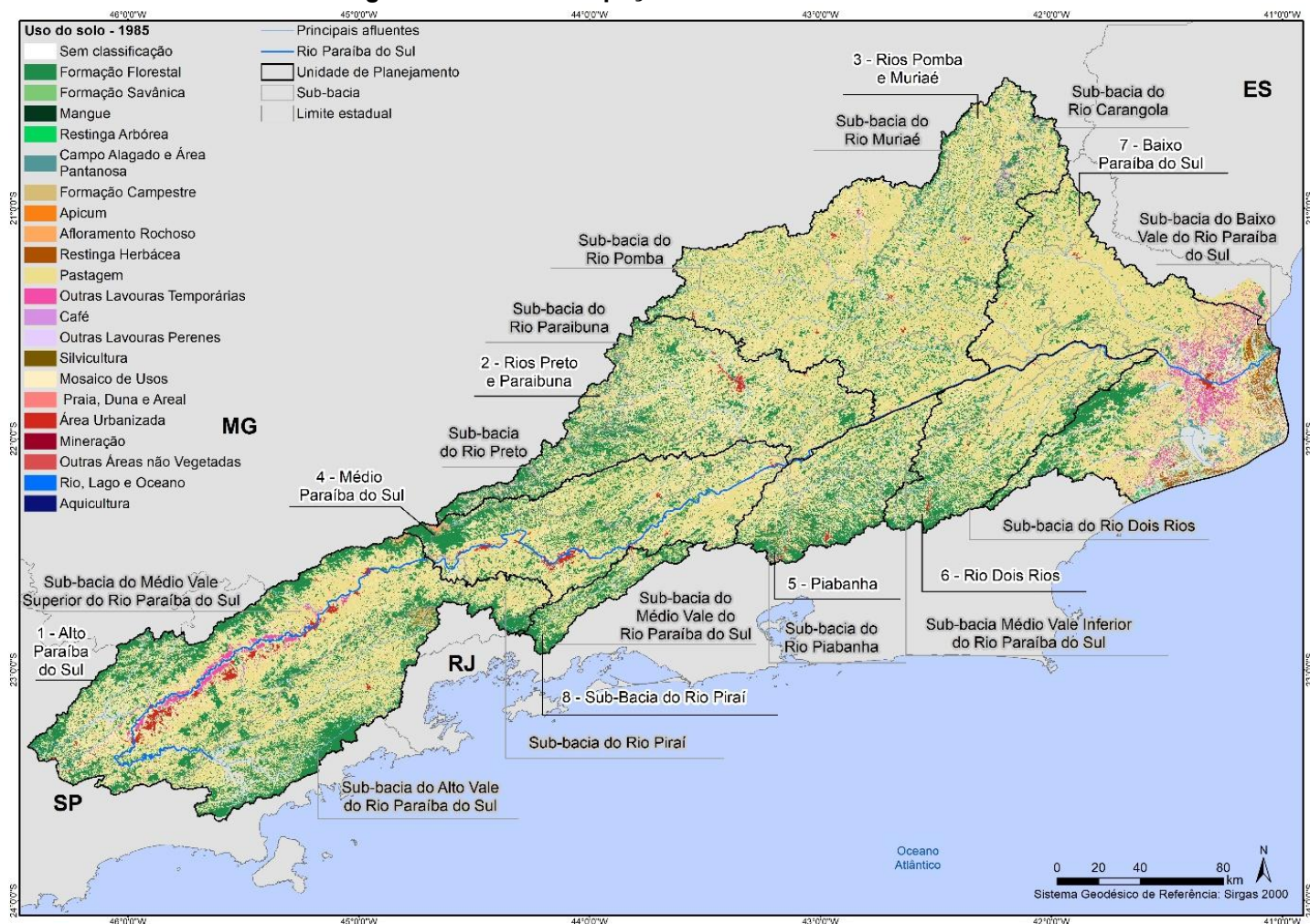
6.1.1. Mudanças no uso e ocupação do solo observadas na BHPS

Os processos de geração de escoamento direto da chuva estão também associados com a cobertura de uso e ocupação do solo. Alterações na cobertura da superfície também interferem no comportamento hidrológico das bacias em relação à evaporação, evapotranspiração e infiltração (Profill, 2025).

Os dados de uso e cobertura do solo da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul (BHPS) utilizados nesta análise são provenientes da Coleção 9 do projeto MapBiomas, publicada em 2024. Foram selecionados, para uma análise aprofundada, o primeiro e o último ano da série (1985 e 2023) com o objetivo de avaliar as mudanças na dinâmica de uso da terra ao longo do maior intervalo temporal disponível. A análise qualitativa dos mapas de uso e cobertura do solo de 1995 (Figura 6-1), 2023 (Figura 6-2) e do mapa de transição entre estes anos (Figura 6-3), indica que, de maneira geral, ocorreram poucas alterações no período analisado. Esta constatação é corroborada pelos dados apresentados no Quadro 6-1, que apresenta a área ocupada por cada classe de uso do solo na BHPS em intervalos de cinco anos a partir de 1985. Nesses dados, não são identificadas mudanças expressivas na distribuição espacial das classes.

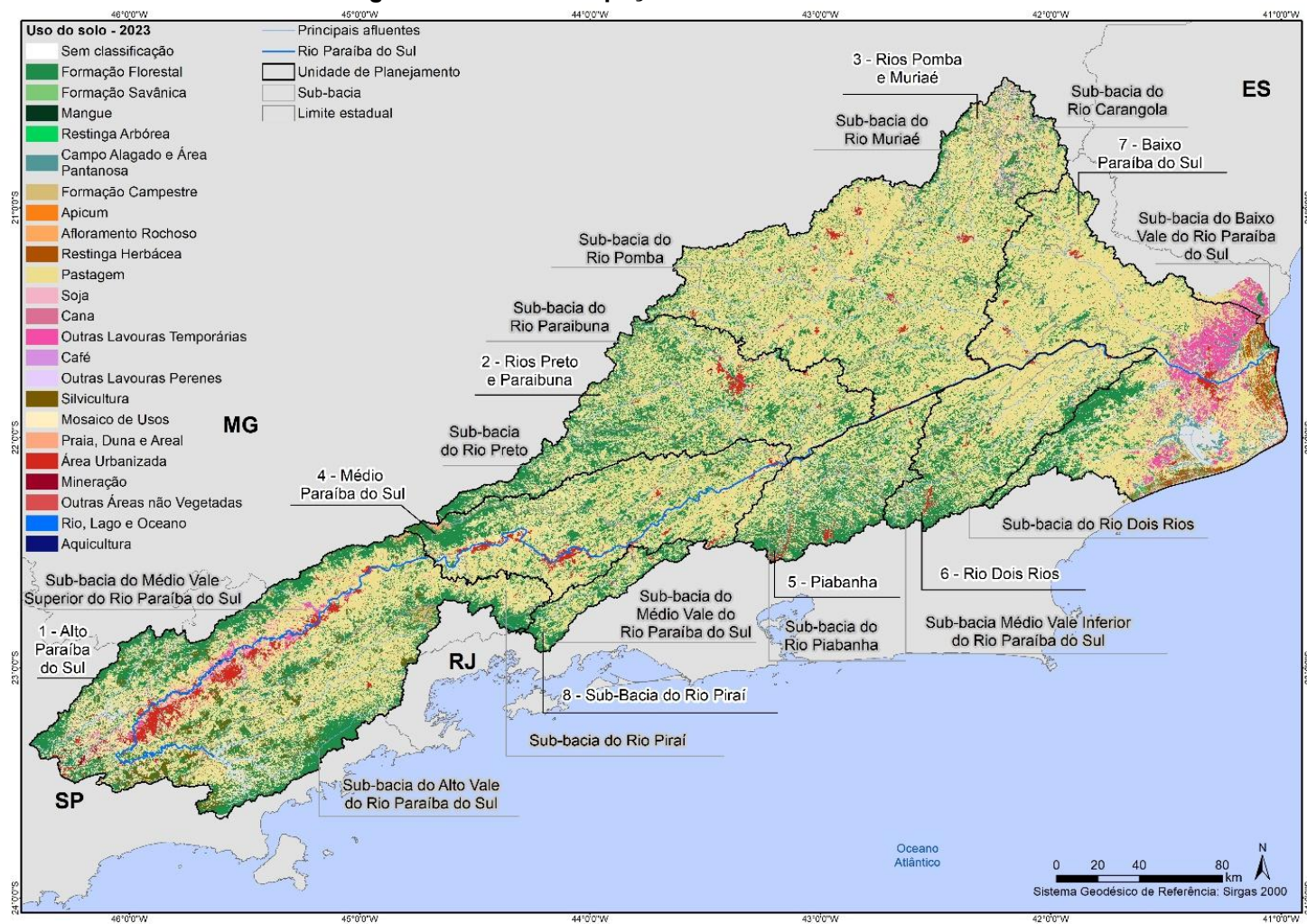
Entretanto, comparando os mapas de 1985 e 2023, bem como analisando o mapa de transições de áreas entre esses anos, é possível notar um aumento da área não vegetada em toda bacia, sendo mais pronunciado na Unidade de Planejamento (UP) Alto Paraíba do Sul próximo ao rio Paraíba do Sul. Essa região coincide com as áreas de maior urbanização e áreas identificadas com alta demanda hídrica no Produto 3, especialmente para os setores de abastecimento urbano, indústria e mineração.

Figura 6-1 – Uso e ocupação do solo da BHPS em 1985



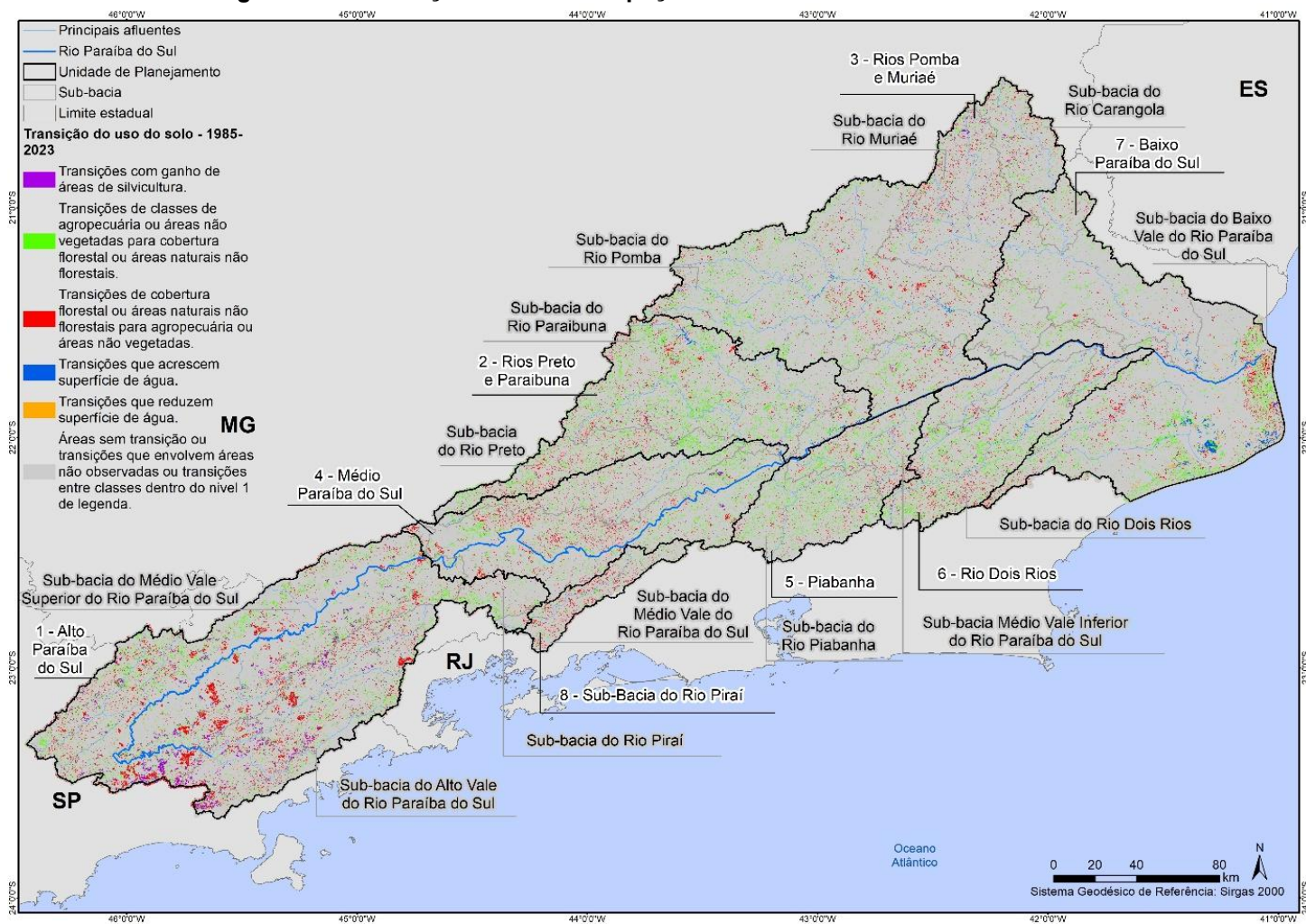
Fonte: elaborado pelo consórcio a partir de MapBiomass

Figura 6-2 – Uso e ocupação do solo da BHPS em 2023



Fonte: elaborado pelo consórcio a partir de MapBiomas

Figura 6-3 – Transição do uso e ocupação do solo da BHPS entre 1985 e 2023



Fonte: elaborado pelo consórcio a partir de MapBiomass

Quadro 6-1 – Área (km²) por classe de uso do solo na BHPS em diferentes anos a partir de 1985

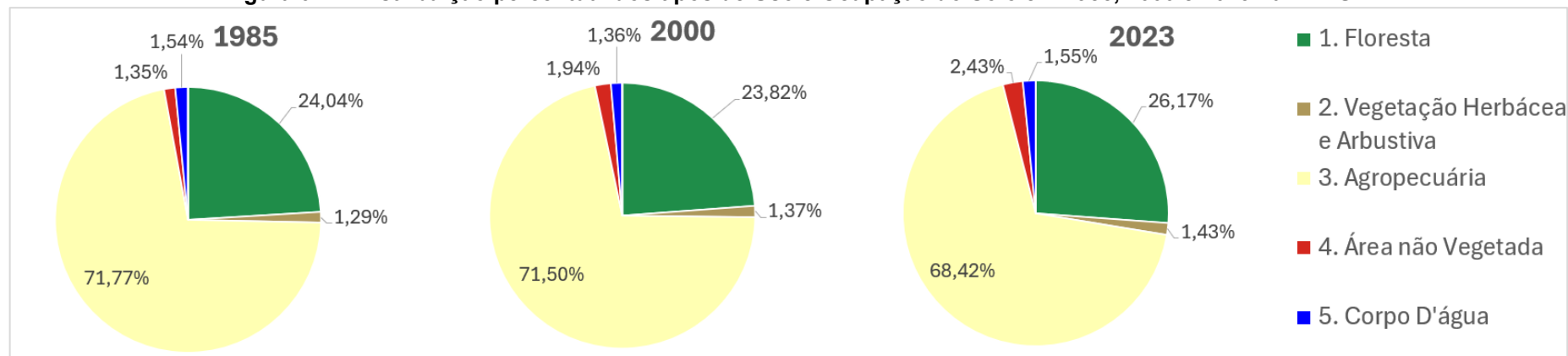
Classes de uso e ocupação do solo	Área por classe de uso do solo (km²)								
	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023
1. Floresta	14.808,10	14.629,80	14.709,64	14.672,04	14.727,76	15.054,53	15.497,95	15.666,19	16.119,03
1.1 Formação Florestal	14.753,69	14.578,97	14.657,33	14.616,30	14.667,92	14.989,76	15.431,29	15.594,24	16.042,88
1.2. Formação Savânica	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1.3. Mangue	3,53	3,70	3,80	4,02	4,46	4,69	4,67	4,75	4,52
1.5. Restinga Arbórea	50,86	47,13	48,50	51,72	55,37	60,07	61,98	67,20	71,63
2. Vegetação Herbácea e Arbustiva	795,17	793,38	769,08	842,71	910,85	905,05	926,57	917,41	881,82
2.1. Campo Alagado e Área Pantanosa	290,88	308,08	317,65	359,55	409,46	421,90	425,47	398,82	374,83
2.2. Formação Campestre	5,42	6,28	6,61	6,83	7,08	7,31	7,36	7,30	7,13
2.3. Apicum	0,06	0,06	0,07	0,14	0,21	0,22	0,18	0,43	0,40
2.4. Afloramento Rochoso	243,67	234,74	230,63	229,93	230,09	229,95	229,44	227,01	225,30
2.5. Restinga Herbácea	255,15	244,22	214,12	246,27	264,01	245,67	264,13	283,85	274,16
3. Agropecuária	44.206,18	44.303,31	44.122,31	44.041,68	43.825,84	43.346,24	42.931,60	42.662,18	42.141,17
3.1. Pastagem	30.047,06	33.104,72	33.347,63	34.716,99	33.141,13	31.467,50	31.996,61	31.775,03	31.092,22
3.2. Agricultura	1.079,75	1.616,38	1.769,12	1.935,81	1.692,62	1.893,12	1.701,78	1.585,65	1.620,94
3.3. Silvicultura	9,77	26,29	104,61	156,00	312,55	541,61	706,45	776,16	782,27
3.4. Mosaico de Usos	13.069,60	9.555,92	8.900,95	7.232,88	8.679,54	9.444,01	8.526,77	8.525,34	8.645,74
4. Área não Vegetada	833,46	919,39	1.060,09	1.195,60	1.231,88	1.322,45	1.405,61	1.450,79	1.496,05
4.1. Praia, Duna e Areal	248,90	244,70	268,92	225,24	161,91	184,67	165,93	129,74	129,47
4.2. Área Urbanizada	527,79	634,55	748,64	911,16	986,57	1.058,84	1.159,36	1.226,99	1.260,36
4.3. Mineração	5,04	9,20	11,97	15,73	18,02	20,80	22,54	23,59	25,70
4.4. Outras Áreas não Vegetadas	51,72	30,94	30,56	43,47	65,38	58,14	57,79	70,46	80,51
5. Corpo D'água	949,07	946,14	930,90	840,17	895,61	963,88	830,33	895,66	952,69
5.1 Rio, Lago e Oceano	948,49	944,48	926,38	829,80	882,74	946,25	810,98	878,31	933,58
5.2 Aquicultura	0,57	1,66	4,52	10,37	12,87	17,63	19,35	17,35	19,11
6. Não observado	0,86	0,82	0,82	0,64	0,90	0,69	0,78	0,61	2,08
Total Geral	61.592,84	61.592,84	61.592,84	61.592,84	61.592,84	61.592,84	61.592,84	61.592,84	61.592,84

Fonte: elaborado pelo consórcio a partir de MapBiomass

De maneira geral, conforme distribuição percentual apresentada na Figura 6-4, observa-se que a classe Agropecuária domina o território ao longo de todo o período, embora com tendência de leve redução, passando de 71,77% em 1985 para 68,42% em 2023. Ao relacionar o gráfico de setores com a matriz de transição de uso e cobertura da terra entre 1985 e 2023 (Quadro 6-2), observa-se que a redução percentual da classe Agropecuária (de 71,77% para 68,42%) está associada a uma conversão significativa de áreas produtivas para outros usos. Segundo a matriz, aproximadamente 3.328,91 km² de áreas agropecuárias foram convertidas em florestas, indicando processos de regeneração natural ou reflorestamento, enquanto 717,87 km² foram transformadas em áreas não vegetadas, evidenciando a expansão urbana ou uso antrópico intensivo.

O aumento da classe referente a Floresta, de 24,04% em 1985 para 26,17% em 2023, pode ser atribuído não apenas ao retorno de áreas agropecuárias, mas também à permanência de cerca de 12.662,65 km² de vegetação florestal original, que se manteve estável ao longo do período. O aumento das áreas não vegetadas (de 1,54% para 2,43%) reflete a incorporação de terras agropecuárias (717,87 km²) e florestadas (16,78 km²) a essa classe, revelando o avanço de zonas urbanas ou degradadas.

Figura 6-4 – Distribuição percentual dos tipos de Uso e Ocupação do Solo em 1985, 2000 e 2023 na BHPS



Fonte: elaborado pelo consórcio a partir de MapBiomias

Quadro 6-2 – Área de transição (km²) entre classes de uso do solo na BHPS entre os anos de 1985 e 2023

Classes de uso e ocupação do solo	Área de transição (km²) entre classes de cobertura e uso da terra entre 1985 e 2023						Total
	1. Floresta	2. Vegetação Herbácea e Arbustiva	3. Agropecuária	4. Área não Vegetada	5. Corpo D'água	6. Não observado	
1. Floresta	12.662,65	0,08	2.123,00	16,78	5,58	0,00	14.808,10
2. Vegetação Herbácea e Arbustiva	0,21	625,58	113,12	15,68	40,31	0,27	795,17
3. Agropecuária	3.328,91	147,34	39.888,22	717,87	123,35	0,49	44.206,18
4. Área não Vegetada	0,74	73,02	41,78	715,90	2,00	0,01	833,46
5. Corpo D'água	13,30	28,47	80,73	8,11	818,45	0,00	949,07
6. Não observado	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,86	0,86
Total Geral	16.005,81	874,50	42.246,86	1.474,34	989,69	1,63	61.592,84

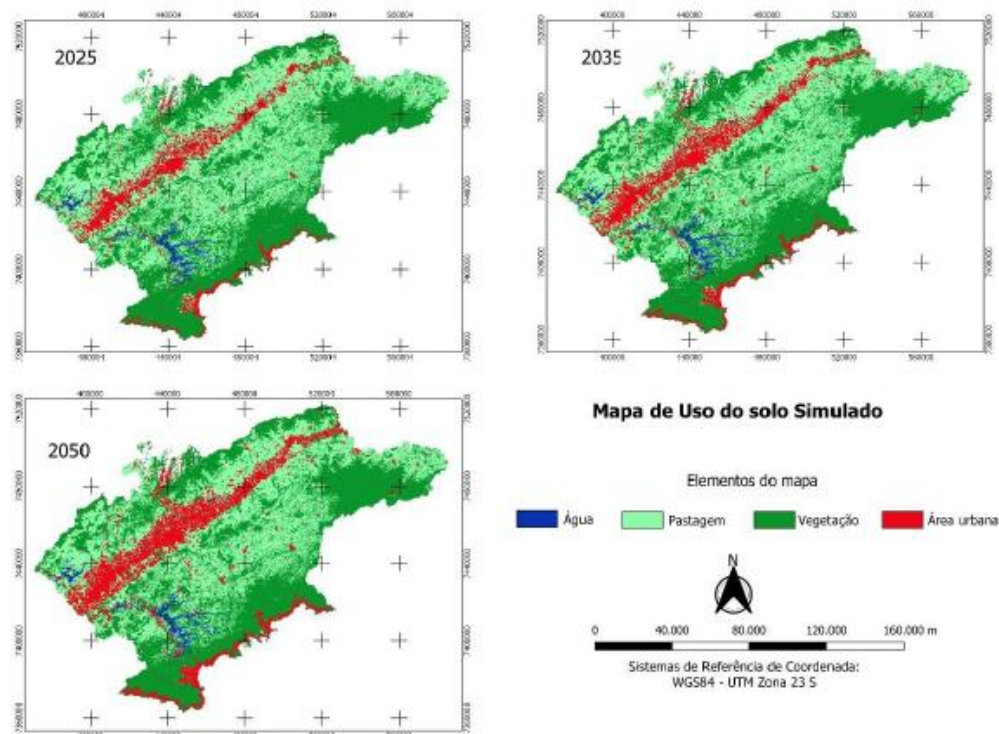
Fonte: elaborado pelo consórcio a partir de MapBiomias

6.1.2. Projeções no uso e ocupação do solo para a BHPS

As projeções de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul foram analisadas com base em dois estudos anteriores que abordam o assunto, a tese de Paiva (2021) e o relatório Cenários de uso e ocupação do solo da bacia do Rio Paraíba do Sul – Porção Paulista/SP (GAEA e IIS, 2017). Ambos utilizam modelagem espacial para avaliar trajetórias de mudança do uso do solo para os próximos anos, considerando implicações para os serviços ecossistêmicos, a cobertura vegetal e a segurança hídrica.

Na tese de Paiva (2021), foi adotado o modelo *Dinamica EGO* para simular os cenários de uso do solo na porção paulista da bacia, com base em mapas dos anos de 2005 e 2010 e em variáveis explicativas como infraestrutura, relevo e proximidade de áreas urbanas. Três cenários foram propostos: (i) atual, refletindo a continuidade das tendências observadas, com avanço da silvicultura e manutenção de áreas de vegetação; (ii) pessimista, com intensificação do desmatamento e substituição de áreas naturais por pastagens e monoculturas; e (iii) otimista, baseado na recuperação da vegetação nativa e aplicação de políticas ambientais. A projeção considerou os anos de 2025, 2035 e 2050, resultando em cenas que mostraram intensificação urbana ao longo de eixos logísticos como a Rodovia Dutra, conforme apresentado na Figura 6-5.

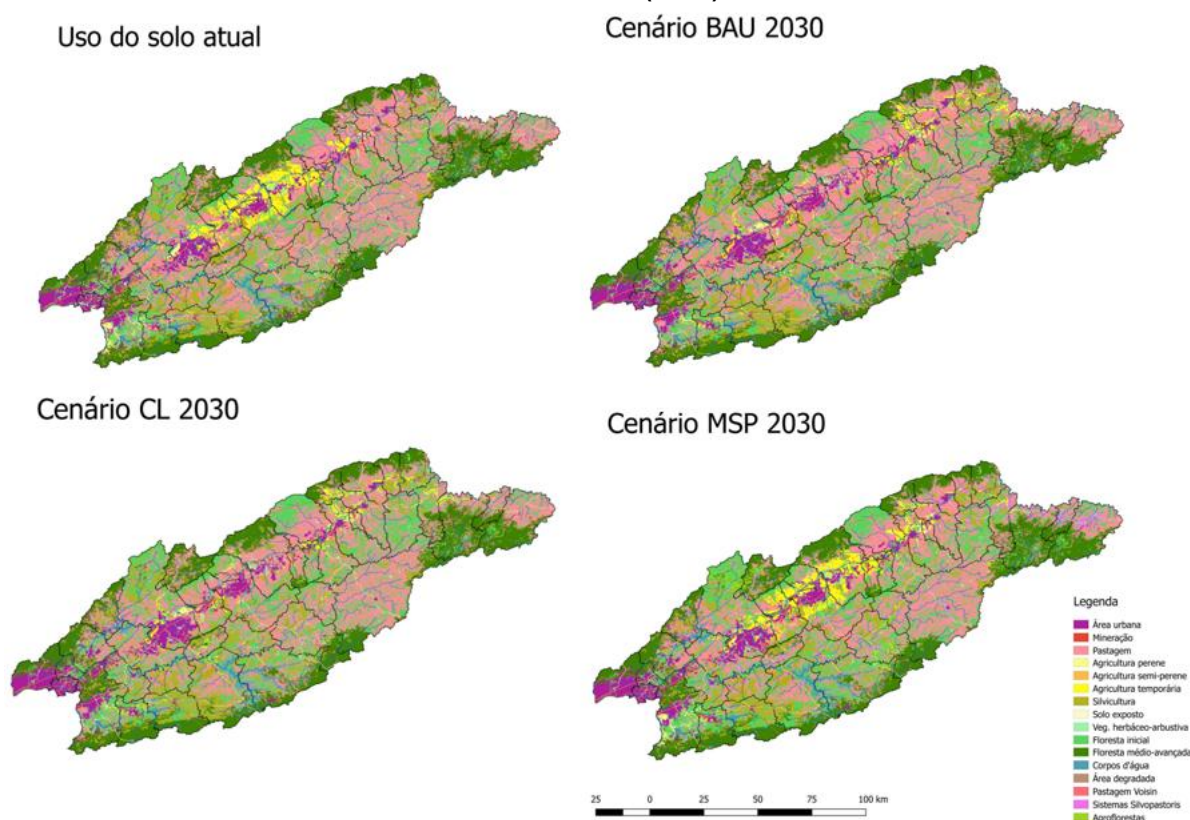
Figura 6-5 – Cenas de expansão urbana da porção paulista da BHPS para os anos de 2025, 2035 e 2050 projetados por Paiva (2021)



Fonte: Paiva, 2021

O relatório de GAEA e IIS (2017), por sua vez, realizou projeções, também para a porção paulista da bacia, utilizando o modelo *LuccME* (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE), considerando variáveis socioeconômicas e ambientais. Três cenários exploratórios para 2030 foram definidos: o cenário de base, que considera as tendências já observadas (*Business as Usual* – BAU), um cenário de Conformidade Legal (CL) e um cenário de Manejo Sustentável da Paisagem (MSP). Os resultados do estudo de GAEA e IIS (2017) são apresentados na Figura 6-6.

Figura 6-6 – Cenários de uso e ocupação do solo da porção paulista da BHPS para 2030 por GAEA e IIS (2017)



Fonte: GAEA e IIS, 2021

Ambos estudos destacam que, mantidas as tendências atuais, a porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul enfrentará maior pressão antrópica e perda de cobertura vegetal, especialmente nas margens do rio Paraíba do Sul e próximo a rodovias importantes. Por outro lado, os cenários mais sustentáveis evidenciam ganhos significativos em termos de resiliência ecológica, segurança hídrica e qualidade ambiental se considerados aspectos de conformidade legal e manejo sustentável da paisagem, conforme indicado por GAEA e IIS (2021).

Não foram identificados estudos que fazem a projeção de uso e ocupação do solo em outras regiões da BHPS.

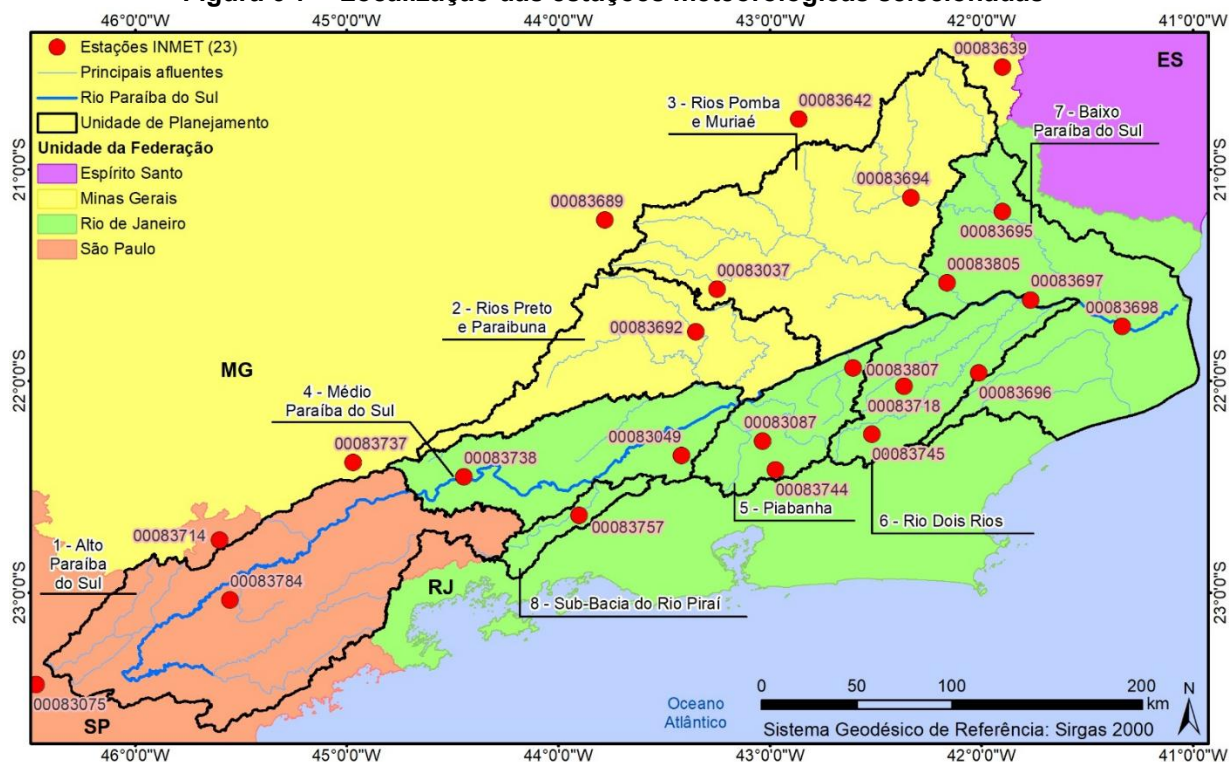
6.2. MUDANÇAS CLIMÁTICAS

6.2.1. Avaliação das Normais Climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) – alterações observadas na BHPS

Foram coletados dados de 23 estações meteorológicas do INMET (Figura 6-7) situadas dentro e nas proximidades da bacia do rio Paraíba do Sul, todas consideradas representativas do regime climatológico da bacia como um todo. Para cada estação, foram avaliadas três normais climatológicas (1961 a 1990, 1981 a 2010 e 1991 a 2020), com foco nas temperaturas médias, mínimas, máximas e evaporação. Essa abordagem permite analisar tendências ao longo do tempo, observando possíveis variações associadas a mudanças climáticas regionais. Foram utilizadas na análise apenas as estações que apresentavam pelo menos duas séries de dados disponíveis e consistentes, dentre aquelas inicialmente selecionadas.

Os resultados indicam um aumento consistente da temperatura média (Figura 6-8) em diversas estações, com destaque para as estações 83738 (Médio Paraíba do Sul), 83698 e 83695 (ambas no Baixo Paraíba do Sul). Em relação às temperaturas mínimas (Figura 6-9), observa-se também uma tendência de elevação, evidenciada nas estações 83037 (Rios Preto e Paraibuna), 83807 (Piabanha), 83745 e 83697 (Rio Dois Rios), além das estações 83698 e 83965 (Baixo Paraíba do Sul).

Figura 6-7 – Localização das estações meteorológicas selecionadas



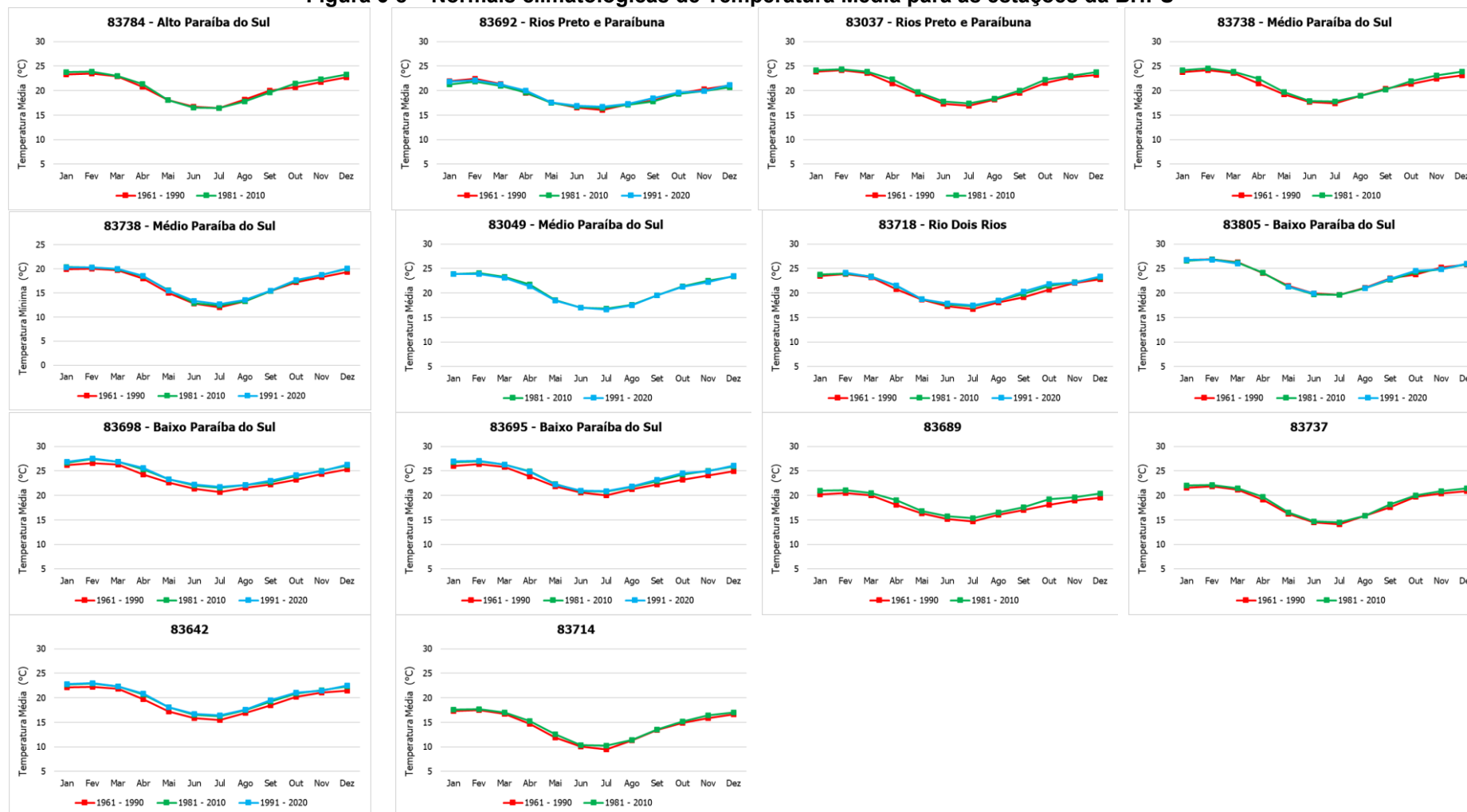
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quanto às temperaturas máximas (Figura 6-10), o aumento é bastante perceptível nas estações 83784 (Alto Paraíba do Sul), 83745 e 83718 (Rio Dois Rios), 83805 e 83695 (Baixo Paraíba do Sul). Esse comportamento está relacionado ao aquecimento regional observado nas últimas décadas, o que pode ter implicações diretas sobre a disponibilidade hídrica e a evapotranspiração na região.

No caso da evaporação (Figura 6-11), as diferenças entre as normais climatológicas são ainda mais evidentes. Na maior parte das estações analisadas, observou-se um aumento significativo nos valores de temperatura, o que corrobora para maior demanda evaporativa da atmosfera. Uma exceção notável foi a estação 83718 (Rio Dois Rios), que apresentou uma leve redução nos índices de evaporação no período mais recente, destoando da tendência geral.

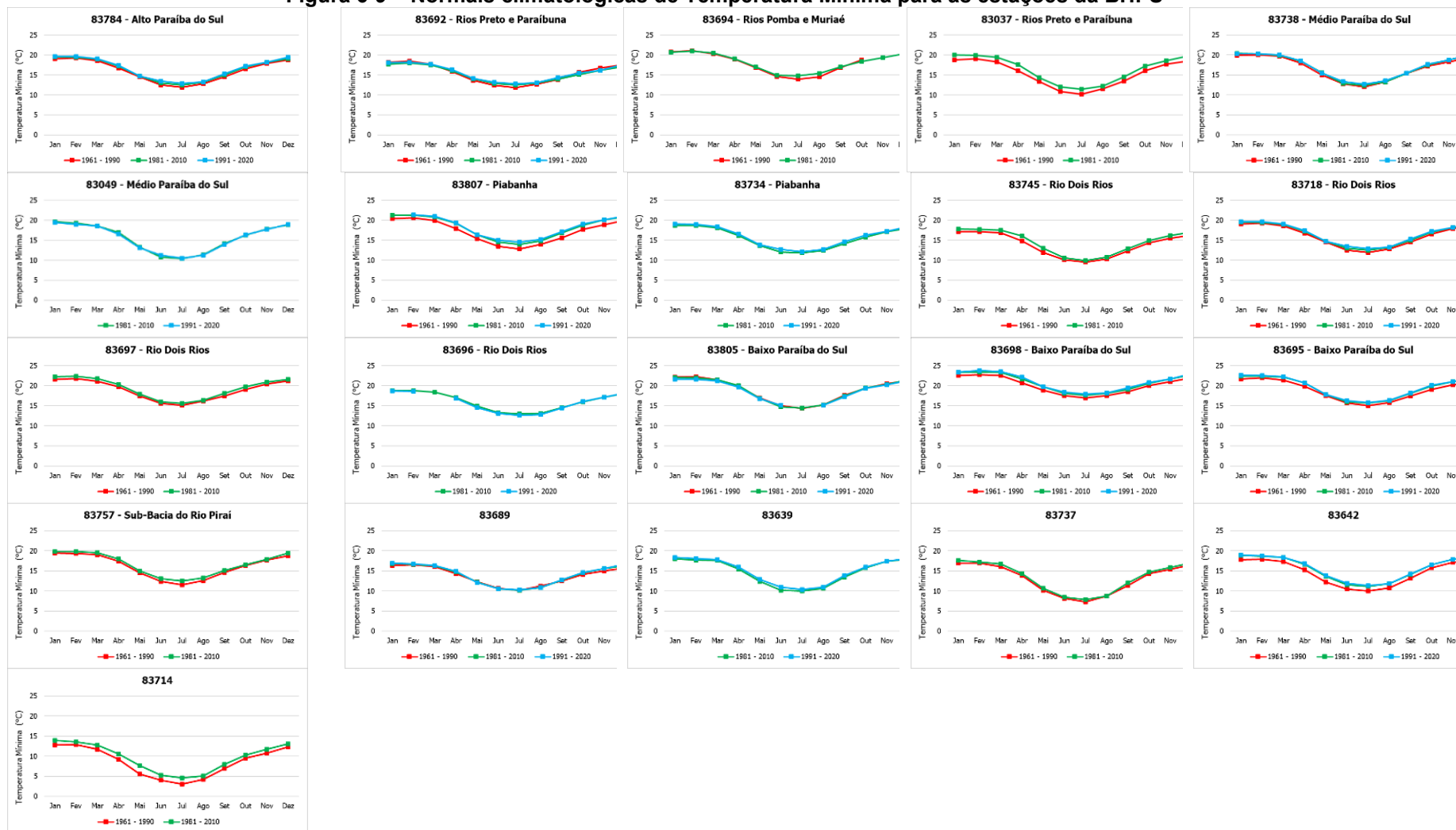
O aumento expressivo de evaporação na bacia está correlacionado ao leve aumento observado nas temperaturas indicando que mesmo variações modestas na temperatura podem provocar intensificação nos processos de perda de água para a atmosfera.

Figura 6-8 – Normais climatológicas de Temperatura Média para as estações da BHPS



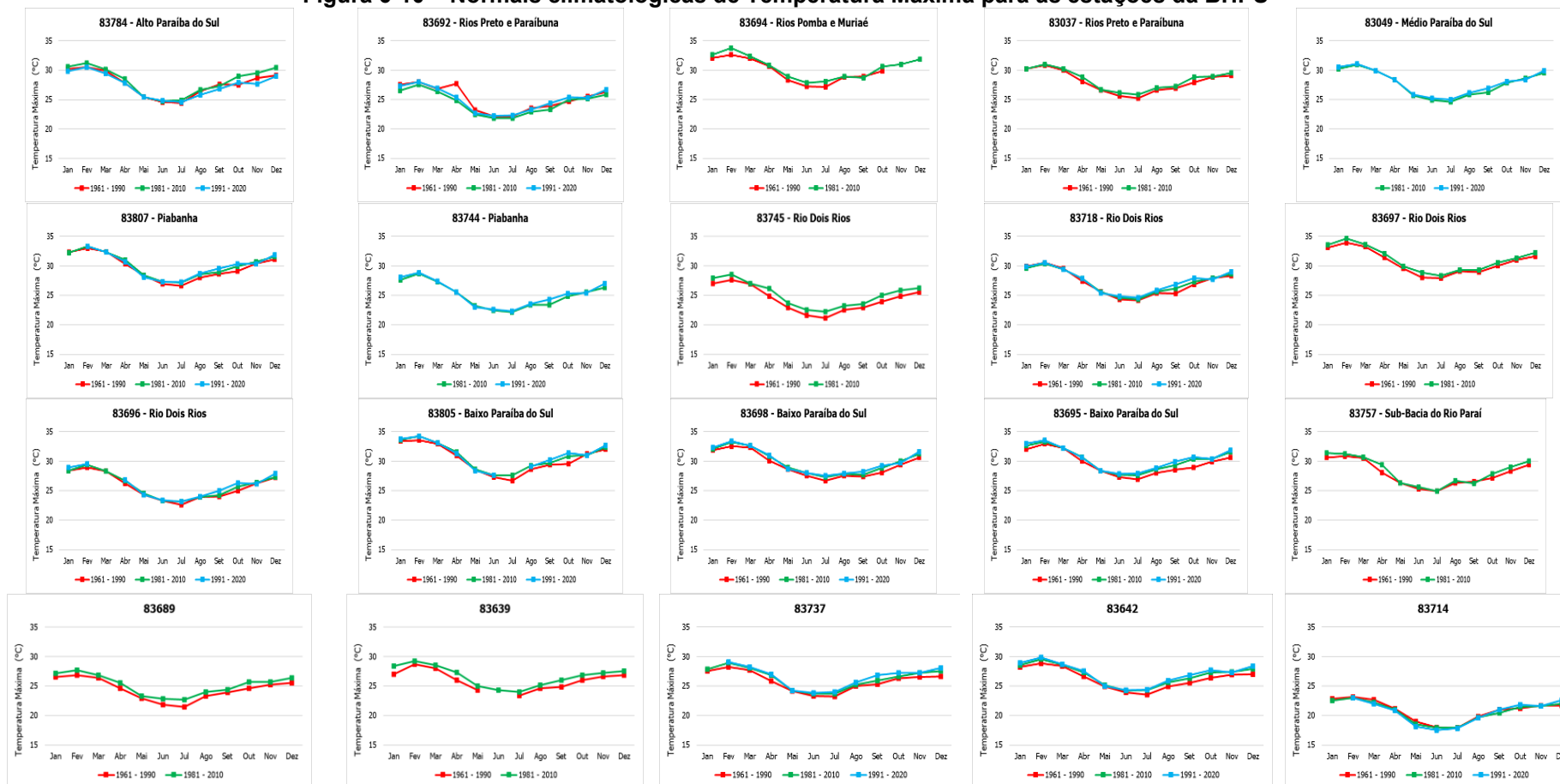
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 6-9 – Normais climatológicas de Temperatura Mínima para as estações da BHPS



Fonte: elaborado pelo Consórcio

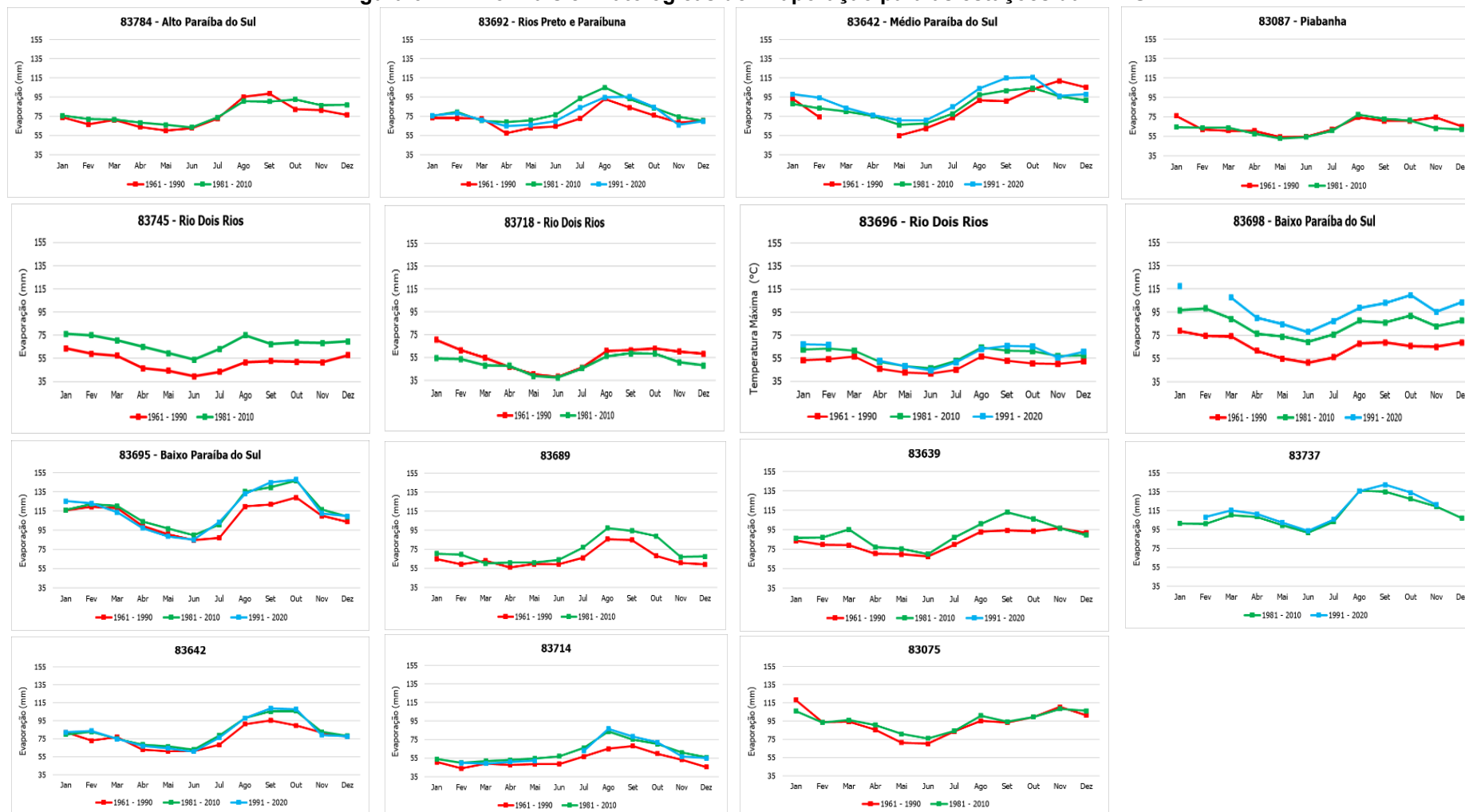
Figura 6-10 – Normais climatológicas de Temperatura Máxima para as estações da BHPS



Obs: Alguns gráficos não apresentam informações para todos os meses, em função da ausência de dados

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 6-11 – Normais climatológicas de Evaporação para as estações da BHPS



Fonte: elaborado pelo Consórcio

6.2.2. Projeções de aumento de temperatura na BHPS

Conforme demonstrado pela análise das projeções de temperatura máxima e mínima nos 19 modelos de sistemas terrestre sob cenário de emissões SSP2-4.5 para a bacia do rio Paraíba do Sul no EDH-PS, em todos ocorre crescimento das anomalias com tendência positiva. Além dessa tendência de acréscimo de temperatura ser corroborada por todos os modelos, ocorre em todos os pontos espacialmente discretos da bacia. Em outras palavras, os modelos indicam que tanto as temperaturas médias anuais como as temperaturas máximas vão ser maiores no futuro em relação ao que foram no passado.

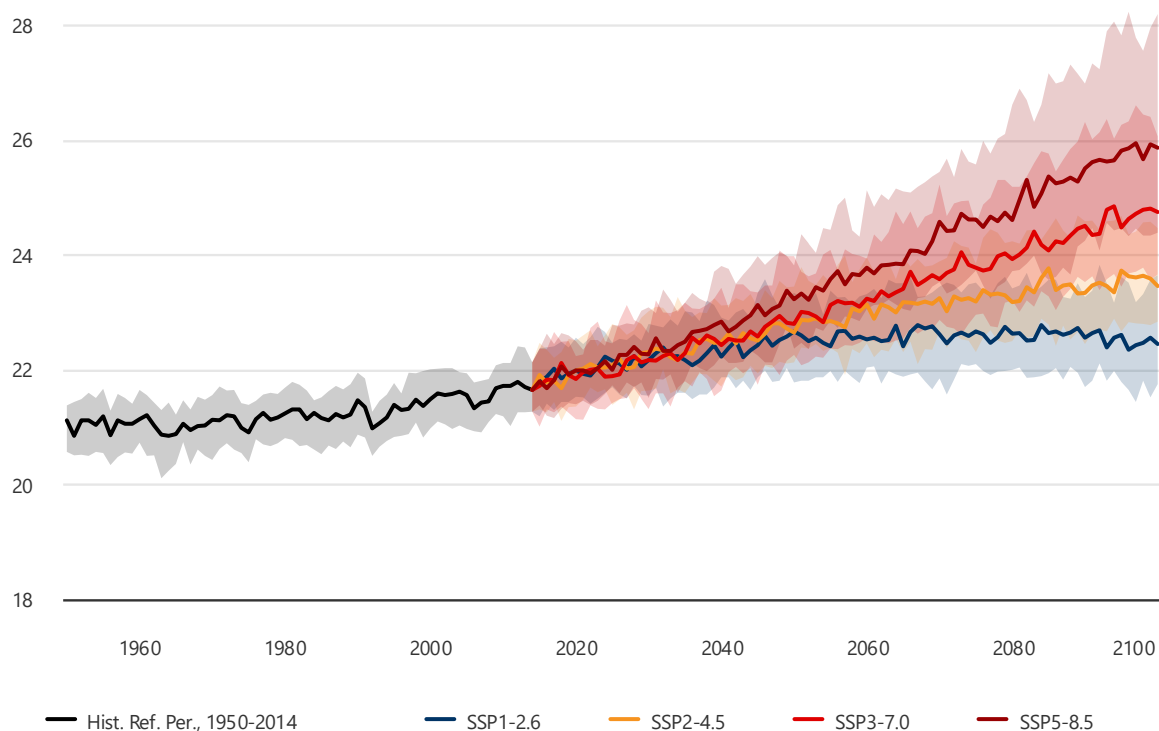
Com base nessa conclusão, cabe, de forma objetiva, investigar sobre quanto será o aumento das temperaturas. Para isso, faz-se uso dos dados disponibilizados no portal do Banco Mundial denominado de *Climate Change Knowledge Portal - CCKP*¹. Trata-se de plataforma que oferece produtos de análise de variáveis climáticas com base nos cenários de emissão do IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas da ONU – Organização das Nações Unidas da rodada seis dos Projetos de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP-6), destacando-se as análises de climatologia e de tendências futuras para bacias hidrográficas - dentre elas, a bacia do rio Paraíba do Sul (sob código LAC001375). O CCKP apresenta resultados de ensemble de modelos climáticos do sistema terrestre, técnica recomendada para identificação de sinais consistentes entre diferentes modelos, o que aumenta a confiança nos resultados obtidos. O uso de ensemble multi-modelo é vantajoso porque a combinação estatística dos resultados compensa eventuais deficiências individuais, mas sem perder a variabilidade inerente às projeções, pois trabalha-se com o intervalo de confiança dos resultados.

Com esse entendimento, foram consultadas as projeções de temperatura máxima, mínima e média para a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. A Figura 6-12 permite observar os efeitos esperados para o cenário de emissões de gases de efeito estufa SSP2-4.5, adotado como referência no estudo supracitado de disponibilidades hídricas sob mudança do clima. Em um horizonte mais curto de tempo, no entanto, representado pelo ano de 2045, o aumento da temperatura é praticamente certo e ocorre em magnitudes muito similares, independentemente do cenário de emissões. Isso decorre, essencialmente, devido ao elevado tempo de residência do preponderante gás de efeito estufa na atmosfera (CO₂). Ou seja, dado o estoque acumulado de gás carbônico na atmosfera terrestre, mesmo cortes drásticos de

¹ Banco Mundial / World Bank - Climate Change Knowledge Portal. Disponível em:
<https://climateknowledgeportal.worldbank.org>

emissões farão com que sua redução seja paulatina, tendo como consequência um inexorável incremento de temperaturas ao menos ao longo das próximas duas décadas (WMO, 2024).

Figura 6-12 – Projeção da temperatura média na BHPS (°C)



Obs.: Escala vertical em °C. Fonte: *Climate Change Knowledge Portal*.

O Quadro 6-3 apresenta as projeções de temperatura média, máxima e mínima para a bacia, sob cenário de emissões SSP2-4.5, pela qual se nota um aumento percentual previsto de 5,53% para as médias, de 6,69% para a mínima, e de 4,70% para a máxima. O mesmo quadro permite observar o limite inferior (10%) e superior (90%) do Intervalo de Confiança (IC) para os resultados da temperatura.

Quadro 6-3 – Projeções de temperatura na BHPS sob cenário de emissões SSP2-4.5

Temperatura	Período histórico (1995-2014)		Projeção 2040-2059	
	T °C	IC 10%-90%	T °C	IC 10%-90%
Mínima Anual	17,19	17,01-17,37	18,34	17,94-18,88
Média Anual	21,56	21,37-21,74	22,75	22,28-23,37
Máxima Anual	25,91	25,67-26,16	27,13	26,54-27,91

Fonte: Consulta em *Climate Change Knowledge Portal*

Com base nas projeções de temperatura média, é possível quantificar as modificações que deverão ocorrer nas demandas hídricas também médias - ou seja, que decorrem dos sintomas crônicos das mudanças do clima. Já quanto aos sintomas agudos, não basta observar a projeção de elevação na temperatura máxima, mas sim compreender como a ocorrência de eventos extremos se modificará. Afinal, a problemática das temperaturas máximas decorre

não tanto pelo episódico dia de altas temperaturas, mas sim pelas ondas de calor mais intensas e ou mais frequentes. Segundo definição da Cobrade (op. cit.), uma onda de calor é caracterizada como um período prolongado de tempo excessivamente quente e desconfortável, onde as temperaturas ficam acima de um valor normal esperado para a região em determinado período do ano. Para sua definição, geralmente é adotado um período mínimo de três dias com temperaturas 5°C acima dos valores máximos médios. Ainda outra forma de estabelecer a ocorrência de uma onda de calor é com base na permanência da temperatura máxima diária acima do percentil 90 por ao menos três dias consecutivos. Ainda outra forma de se compreender a modificação na ocorrência de ondas de calor trata da quantidade de dias com temperatura muito elevada (acima de 35°C ou ainda 40°C), ou seja, com base em limiares absolutos.

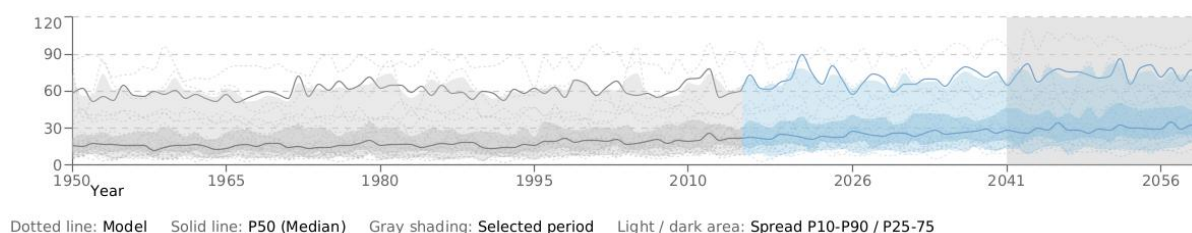
O uso de limiares de temperaturas elevadas, como 35°C, deriva de sistemas biológicos e socioeconômicos, haja vista que, do ponto de vista fisiológico e, especialmente quando combinada com alta umidade relativa do ar², é uma temperatura que supera o limite da termorregulação eficiente do corpo humano (Vecellio et al., 2022) e de muitos animais de criação (Shephard e Maloney, 2023). Já para sistemas agrícolas, constitui-se em ponto de inflexão para muitos processos de polinização (Dol e Huvermann, 2020) e de desenvolvimento de cereais e leguminosas (Han et al., 2022), inclusive o arroz, uma das principais culturas na bacia do rio Paraíba do Sul (Kumar et al., 2015).

Uma expressiva vantagem da abordagem por limiares absolutos é quanto à simplicidade operacional, pois não requer séries históricas e cálculos estatísticos mais sensíveis a vieses sistemáticos. Nesse sentido, destaca-se que o Atlas Interativo do IPCC (IPCC, 2025) permite consultar resultados de ensemble de 27 modelos de sistema climático global para a ocorrência de dias em um ano (de ocorrência aleatória, ou seja, não sequenciais) com temperaturas acima de 35°C e de 40°C para os cenários de emissões de gases de efeito estufa (SSPs). Assim como o *Climate Change Knowledge Portal* do Banco Mundial, trata-se de um portal de síntese de informações climáticas que oferece projeções e dados históricos em uma mesma base, além de produtos de análises regionais. O Atlas apresenta uma interface avançada pela qual é possível consultar as projeções para os dias com temperaturas muito elevadas para a região Sudeste da América do Sul. Não se trata de consulta com grande detalhe espacial,

² A relação entre temperatura e umidade relativa do ar dá origem ao conceito de temperatura de bulbo-úmido, que é a menor temperatura que pode ser atingida pela evaporação da água em condições de pressão constante. A temperatura de 35°C de bulbo-úmido é considerado o limite teórico para sobrevivência humana prolongada, pois acima desse valor, o corpo humano não consegue se resfriar adequadamente através da transpiração.

pois como o nome sugere, a região engloba principalmente o sudeste do Brasil, parte do Paraguai, Uruguai e nordeste da Argentina. A Figura 6-13 permite observar a projeção da quantidade de dias com temperaturas superiores a 35°C sob o cenário de emissões SSP2-4.5 para a grande região.

Figura 6-13 – Projeção de dias com temperatura acima de 35°C na região Sudeste da América do Sul sob cenário de emissões SSP2-4.5



Obs.: Escala vertical em °C. Fonte: IPCC WGI Interactive Atlas

A bacia do rio Paraíba do Sul se localiza no extremo norte dessa grande região, tornando-se possível consultar, junto ao Atlas do IPCC, as projeções para seu centróide (Long. -44° e Lat. -22°) no horizonte de interesse (entre os anos de 2040 e 2060), representando assim o clima típico do horizonte máximo de projeções dos cenários, que é em 2045. O Quadro 6-4 permite observar os resultados do período histórico e das projeções, pelos quais se evidencia um expressivo aumento de dias com temperaturas muito elevadas. O mesmo quadro permite também observar o intervalo de confiança (IC) para os resultados. Na região como um todo, ao invés de se ter 19,9 dias por ano com temperaturas superiores a 35°C, prevê-se a ocorrência de 28,8 dias. Já para o centróide da bacia do rio Paraíba do Sul, tem-se um incremento previsto de 8,4 para 15,0 dias por ano.

Quadro 6-4 – Projeções de dias com temperaturas muito altas sob cenário SSP2-4.5

Dias com temperatura muito alta		Período histórico (1995-2014)		Projeção 2040-2059	
		Dias	IC 10%-90%	Dias	IC 10%-90%
Dias com Tmáx. >35°C	Centróide da BHPS	8,4	-	15,0	-
	Sudeste da A. do Sul	19,9	10,3-50,1	28,8	17,6-63,2
Dias com Tmáx. >40°C	Centróide da BHPS	2,1	-	3,2	-
	Sudeste da A. do Sul	2,7	0,8-15,9	5,4	3,3-26,1

Fonte: Consulta em IPCC WGI Interactive Atlas

Com base nas projeções de dias com temperaturas acima de 35°C e, sabendo-se que uma onda de calor se caracteriza a partir da duração de temperaturas elevadas por 3 dias, pode-se realizar o cálculo da probabilidade de excedência anual, ou seja, da probabilidade de ocorrência de pelo menos uma onda de calor durante um ano específico, baseada na frequência de dias com temperatura máxima superior a 35°C. Evidente que existem limitações para essa abordagem, não menos a assunção de que dias consecutivos são independentes e que não há sazonalidade. Mesmo assim, tem-se uma forma prática de obter as ordens de

grandeza de risco climático a partir de projeções. A probabilidade de excedência anual de uma onda de calor (PEA_{oc}) é dada por:

$$PEA_{oc} = 1 - (1 - p^d)^{(N-d+1)}$$

Onde: p é a probabilidade diária de ocorrência (razão entre a quantidade de dias no ano com temperaturas acima de 35°C), d é a duração mínima da onda de calor, de 3 dias, e N é a quantidade de dias no ano. O resultado para o centróide da bacia do rio Paraíba do Sul é de 0,44% para o período histórico recente (entre 1995 e 2014), passando para 2,49% no clima futuro centrado em 2050 sob cenário de emissões ainda relativamente otimista (SSP2-4.5). O resultado aponta o incremento de 2,05 pontos percentuais na probabilidade de ocorrência de uma onda de calor. Os mesmos resultados, quando calculados para a grande região Sudeste da América do Sul, são de respectivos 5,71% e 16,34%, ou seja, um aumento de 10,63 pontos percentuais.

6.2.3. Alterações hidrológicas projetadas para a BHPS

As alterações nos padrões de precipitação e temperatura contribuem para o aumento da variabilidade dos fenômenos hidrológicos extremos, como as secas mais frequentes e prolongadas e cheias também mais frequentes e intensas.

Em relação ao aumento das vazões máximas, pesquisas científicas recentes baseadas em análises de séries históricas mostram que as vazões de cheias têm aumentado nos últimos anos no sudeste do Brasil (Chagas et al., 2022). Ainda, estudos conduzidos considerando projeções de mudanças climáticas apontam para aumento da magnitude e na frequência de cheias na região sudeste, embora o sinal tenha sido relativamente fraco na composição dos modelos (Brêda et al., 2023).

O estudo de refinamento das disponibilidades hídricas na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul (EDH-PS) desenvolvido por CEIVAP (2024), avaliou o impacto que as precipitações e mudanças de temperatura projetadas para o futuro com os modelos climáticos terão nos regimes de vazões da BHPS, avaliando a alteração da disponibilidade hídrica e eventos extremos de cheias da bacia. Para isso, o estudo utilizou modelagem hidrológica do tipo chuva-vazão, associada a dados de 19 modelos climáticos provenientes do Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, CMIP6 - *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*). As simulações consideraram projeções das variáveis de precipitação e temperatura para dois horizontes temporais: curto prazo (2015–2045) e longo prazo (2046–2100), utilizando o cenário intermediário de emissões SSP2-4.5. Esse cenário climático representa uma trajetória intermediária de desenvolvimento, caracterizada

por um nível moderado de vulnerabilidade socioeconômica e uma forçante radiativa média. Como no presente estudo o horizonte de projeção das demandas hídricas e balanço hídrico é 2045 (conforme termo de referência), serão explorados apenas os resultados do período de curto prazo do EDH-PS.

Para vazões máximas, o EDH-PS concluiu que na BHPS predomina a tendência de aumento da alteração com o aumento do tempo de recorrência. O estudo obteve resultados de aumento médio percentual nas vazões máximas para os tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos por sub-bacia, conforme apresentado no Quadro 6-5. Percebe-se que as sub-bacias Alto Vale do Rio Paraíba do Sul, Rio Pirai, Rio Muriaé e Carangola, e o Rio Pombo, apresentaram as menores frações de alteração. Já as sub-bacias do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul, Rio Dois Rios e Rio Piabanha apresentaram as maiores alterações no curto prazo.

Quadro 6-5 – Resultados médios das alterações nas vazões máximas em percentual (%) por sub-bacia da BHPS considerando o horizonte temporal de Curto Prazo (2015 - 2045)

Sub-bacia	Fator de alteração das vazões máximas (%) no curto Prazo (2015 – 2045)			
	TR10	TR25	TR50	TR100
Alto Vale do Rio Paraíba do Sul	3,5	6,5	8	9,2
Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul	10	13,4	15,4	16,9
Médio Vale do Rio Paraíba do Sul	8,3	12,5	15,3	17,9
Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul	13,3	18,1	19,5	21,5
Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul	6,6	10,9	13,2	15,1
Rio dois Rios	12,6	17,2	19,4	20,8
Rio Muriaé e Carangola	-1,1	0,5	1,5	2,5
Rio Paraíbauna	5,6	10,1	11,7	13
Rio Piabanha	13,8	17,3	18,5	19,5
Rio Pirai	4,9	5,8	7,5	9
Rio Pombo	3,9	7,4	9	10,1
Rio Preto	13	19,2	22,6	25,1

Fonte: Produto 5 do EDH-PS (CEIVAP, 2024).

Tratando de disponibilidade hídrica e vazões mínimas, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) lançou em 2024 o estudo Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos do Brasil (ANA, 2024). Os resultados dessa publicação mostraram que existe um potencial de diminuição na disponibilidade hídrica na bacia do rio Paraíba do Sul até 2040. O estudo destaca, no entanto, que a região Sudeste ainda apresenta certa divergência entre os resultados dos modelos, mas predomina, sobretudo na faixa litorânea, a tendência de redução nas vazões em função da mudança climática, ocasionando a diminuição

da disponibilidade de água nas bacias hidrográficas do Sudeste. Esses resultados vão de encontro aos obtidos pelo EDH-PS (CEIVAP, 2024).

No Quadro 6-6 são apresentados os resultados das alterações médias percentuais nas vazões de referência por sub-bacia da BHPS obtidos pelo EDH-PS (CEIVAP, 2024). Verifica-se que todas as vazões de referência apresentam predomínio de projeções de redução. As sub-bacias dos rios Muriaé e Carangola e rio Pomba se destacam como as regiões com maior projeção de redução das vazões de referência Q_{95} e Q_{90} . Para a vazão de referência $Q_{7,10}$, as sub-bacias Alto Vale do Rio Paraíba, Rio Muriaé e Carangola, Rio Pomba e Rio Preto são as regiões que apresentaram as maiores projeções de redução da vazão de referência.

Quadro 6-6 – Resultados das alterações médias, em percentual, nas vazões de referência para o horizonte temporal de Curto Prazo (2015 - 2045)

Sub-bacias	Curto Prazo (2015 – 2045)		
	Q_{90}	Q_{95}	$Q_{7,10}$
Alto Paraíba do Sul	-6,2%	-7,3%	-10,0%
Baixo Vale do Rio Paraíba	-6,0%	-6,5%	-5,1%
Médio Vale do Rio Paraíba	-6,8%	-8,4%	-9,2%
Médio Vale Inferior do Rio Paraíba	-7,0%	-8,8%	-7,5%
Médio Vale Superior do Rio Paraíba	-8,1%	-9,2%	-8,7%
Rio dois Rios	-6,0%	-6,5%	-9,9%
Rio Muriaé e Carangola	-9,9%	-10,5%	-15,5%
Rio Paraíbauna	-6,4%	-6,1%	-7,0%
Rio Piabanha	-5,1%	-6,1%	-7,3%
Rio Pirai	-5,2%	-7,2%	-7,6%
Rio Pomba	-11,7%	-10,0%	-11,2%
Rio Preto	-7,5%	-8,9%	-12,5%

Fonte: adaptado do Produto 5 do EDH-PS (EDH-PS)

7. IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BALANÇO HÍDRICO

7.1. METODOLOGIA E CENÁRIOS CONSIDERADOS

7.1.1. Balanço hídrico superficial

A estimativa do balanço hídrico de águas superficiais na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul em cenários de mudança climática foi conduzida por meio de *script* computacional desenvolvido na linguagem *Python*. A metodologia completa do algoritmo de balanço hídrico quantitativo desenvolvido pode ser consultada no Produto 4 do presente estudo, bem como no “Manual do Código de Balanço Hídrico” disponibilizado em conjunto ao documento do Produto 4.

O procedimento envolveu a análise de 272.149 ottobacias, para as quais foram atribuídos os seguintes conjuntos de dados: disponibilidade hídrica alterada por mudanças climáticas, com base no Estudo de Disponibilidade Hídrica do Paraíba do Sul – *EDH-PS* (CEIVAP, 2024, descrita em detalhes a seguir no Item 7.2); demanda hídrica superficial, conforme o Estudo de Demandas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul – *EDBH-PS*, Produto 3 e projeções em cenários de mudança climática nas demandas hídricas (descritas a seguir no Item 7.3); e valores de lançamento de efluentes nos corpos hídricos, conforme o Estudo de Enquadramento das Águas da Bacia do Paraíba do Sul (Água e Solo, 2025), os quais foram mantidos constantes, ou seja, não foram projetadas alterações nos lançamentos de efluentes para cenários de mudanças climáticas.

7.1.2. Balanço hídrico subterrâneo

A metodologia adotada para o balanço hídrico subterrâneo em situação de mudança climática segue as mesmas premissas que foram adotadas no Produto 4 do presente estudo. A reserva explotável de água subterrânea segue a proposta utilizada no Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (PERH, 2024 - 2027). Esta metodologia, descrita no roteiro para elaboração de relatórios de situação segundo a deliberação do Conselho Estadual de Recursos Hídricos de São Paulo – CRH-SP nº 146/2012 (CRH, 2020), considera que a reserva explotável subterrânea pode ser obtida pela diferença entre a vazão com 95% de permanência (Q_{95}) e a vazão mínima de 7 dias com período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$).

A disponibilidade hídrica subterrânea foi estimada, portanto, a partir da metodologia mencionada utilizando informações de disponibilidade hídrica anual ($Q_{7,10}$ e Q_{95}) alteradas por mudanças climáticas, com base no Estudo de Disponibilidade Hídrica do Paraíba do Sul – *EDH-PS* (CEIVAP, 2024, descrita em detalhes a seguir no Item 7.2). A demanda hídrica

subterrânea foi obtida do Estudo de Demandas da Bacia Hidrográfica – EDBH-PS, Produto 3 e projeções em cenários de mudança climática nas demandas hídricas (descritas a seguir no Item 7.3).

7.1.3. Cenários de alteração na disponibilidade e demandas hídricas

O termo de referência do presente estudo prevê, no balanço hídrico, a análise das vazões de referência $Q_{7,10}$, Q_{95} e Q_{90} anuais, mensais, bimestrais e trimestrais, para os horizontes de curto, médio e longo prazos: 5, 10, 15 e 20 anos. No entanto, considerando que as alterações na disponibilidade hídrica por mudanças climáticas fornecidas pelo EDH-PS são em escala anual, no presente relatório será dado enfoque às análises das vazões de referência $Q_{7,10}$, Q_{95} e Q_{90} anuais.

Em termos de demandas hídricas consideradas, para facilitar a sensibilidade e interpretação dos resultados, foram rodados balanços hídricos considerando apenas o cenário de maior pressão (cena futura com horizonte de 20 anos – 2045). As mudanças do clima gerarão diferentes repercussões nas demandas hídricas, a depender das características de cada setor usuário. Foram projetadas duas diferentes alterações nas demandas hídricas: alterações nas demandas hídricas em cenário de aumento de temperatura considerando o cenário climático SSP2-4.5; e alterações nas demandas hídricas considerando um episódio eventual de onda de calor.

7.2. DISPONIBILIDADE HÍDRICA

A alteração da disponibilidade hídrica em decorrência das mudanças climáticas no horizonte temporal considerado (horizonte de curto prazo 2015–2045) é objeto de um estudo aprofundado e de alta complexidade, envolvendo diversas variáveis. Essa variação decorre de múltiplos fatores climatológicos, como precipitação e temperatura causadas pelas mudanças climáticas. Tais aspectos foram analisados no Produto 5 do EDH-PS (CEIVAP, 2025), já descrito anteriormente no Item 6.2.1, os quais serviram como base para a definição da variação da disponibilidade hídrica adotada nos cenários de balanço hídrico desenvolvidos neste estudo.

A partir das simulações desses modelos, o estudo EDH-PS realizou uma análise estatística das variações projetadas das vazões de referência, com o cálculo da alteração média percentual em relação ao período histórico. Essa abordagem permitiu avaliar a tendência central de comportamento das vazões futuras, considerando a diversidade de respostas dos modelos. Ressalta-se que as projeções de disponibilidade hídrica do EDH-PS não foram desenvolvidas na escala de otobacias. Diante disso, para o presente estudo, aplicaram-se as

alterações médias apresentadas no Quadro 6-6, por sub-bacia, às vazões de referência históricas (1977–2021), originalmente disponibilizadas por ottobacia. Com isso, foi possível estimar o balanço hídrico sob cenário de mudança climática na mesma escala utilizada nos balanços hídricos desenvolvidos no Produto 4 deste estudo.

Ressalta-se que a disponibilidade hídrica gerada para a avaliação dos cenários futuros não considera a operação dos reservatórios da bacia, de forma que, conforme indicado por CEIVAP (2024), não seria possível estimar o futuro estado de operação dessas obras hidráulicas e o seu impacto na bacia hidrográfica. Sendo assim, as alterações na disponibilidade hídrica em cenários de mudança climática contemplam apenas a resposta da bacia à alteração do regime de chuvas, mas não à operação dos reservatórios da bacia.

7.3. DEMANDAS HÍDRICAS

As mudanças do clima gerarão diferentes repercussões nas demandas hídricas, a depender das características de cada setor usuário. Este capítulo apresenta e discute as perspectivas de cada um, apontando - sempre que pertinente - as variações a serem aplicadas nas demandas hídricas estimadas sob cenários de crescimento (apresentados no Produto 3 do presente estudo).

A distribuição das demandas hídricas conforme a fonte de captação (superficial ou subterrânea) seguiu os mesmos percentuais adotados no Produto 3. Embora se reconheça que a redução da disponibilidade hídrica superficial possa levar a um aumento na utilização de águas subterrâneas, não foi possível projetar essa possível migração de forma robusta. Assim, optou-se por manter a proporção de uso entre as fontes adotada nas projeções anteriores.

7.3.1. Abastecimento humano (urbano e rural)

Em relatório técnico intitulado *Climate Change and Water Policy Brief*, a ONU (2019) esclarece a multifacetada natureza do efeito produzido pela mudança do clima no ciclo hidrológico e sua interação com a demanda hídrica. Uma dessas facetas é a alteração das demandas hídricas em função de temperaturas mais elevadas.

Primeiramente, temperaturas mais elevadas geram respostas fisiológicas devido ao processo de termorregulação (principalmente transpiração e respiração), resultando em maiores perdas de água corporal que devem ser repostas através do consumo de líquidos. Situações de estresse térmico, que ocorrem quando as temperaturas ambientes estão fora da zona de conforto, ativam mecanismos compensatórios como a taxa metabólica basal e a frequência respiratória, elevando consequentemente as perdas de água. O consumo de água pode ser

entre 12% e 15% maior para cada grau Celsius acima da temperatura máxima de conforto (Yamada et al., 2022).

Além da questão fisiológica, mudanças comportamentais induzidas pelo calor também podem se desdobrar em maiores demandas hídricas. Afinal, temperaturas elevadas estimulam maior consumo de bebidas geladas, banhos mais frequentes e atividades ao ar livre que têm na água um meio de resfriamento. Esse comportamento adaptativo resulta em aumentos no consumo residencial de água durante períodos de calor intenso. Observando situações de ilhas de calor urbano (aquecimento diferencial das áreas urbanas), Mekonnen et al. (2025) desvendam que a resposta na demanda por água ($2,38 \text{ m}^3/1^\circ\text{C}/\text{ano}$) é mais elevada do que a do consumo de eletricidade ($1,62 \text{ kW}/1^\circ\text{C}/\text{ano}$), que também é positiva devido ao uso mais intenso de equipamentos como ar-condicionado e ventilador.

Ondas de calor - geralmente associadas a períodos de restrição hídrica nos mananciais - intensificam, assim, a demanda por água, gerando picos de consumo que podem ser pronunciados e exceder de 20% a 40% o consumo médio anual, como apontam episódios recentes no estado do Paraná, tanto no interior (+20%, a partir de Sanepar, 2020) como no litoral (+40%, a partir de Sanepar, 2024), e em São Paulo (+20%, a partir de Samar, 2023). A mesma faixa de variação na demanda foi verificada em episódios de ondas de calor nos Estados Unidos (+19%, a partir de Bevi, 2024), Escócia (+20%, a partir de BBC, 2023), Canadá (+30%, a partir de NS News, 2021) e Inglaterra (+30%, a partir de BBC, 2025).

O trabalho de Belleza *et al.* (2023) apresenta uma análise sobre as respostas de diferentes setores frente a três tipos de eventos: secas hidrológicas (vazão mensal abaixo do percentil 20), secas agrícolas (umidade do solo abaixo do percentil 20), e ondas de calor (temperatura máxima diária acima do percentil 90 por ao menos três dias consecutivos). Usando dados globais com abrangência temporal de 30 anos (1990-2019), os autores revelam que na ocorrência de quaisquer dos três eventos isolados, verificam-se variações na demanda por água pelos setores usuários de consumo humano, criação animal e irrigação. Ainda, eventos compostos (ocorrência simultânea de dois deles) e ondas de calor isoladas geram os maiores impactos sobre o uso da água, especialmente para os usuários de irrigação e consumo humano.

Zapata (2015) realizou estudo sobre os determinantes da demanda residencial por água no Equador, com base em dados de 2012 e 2013 cobrindo cerca de dois terços da população total (amostra de 11,62 mil domicílios). Os resultados indicam que famílias em cidades com temperaturas mais elevadas consomem significativamente mais água em comparação com aquelas em cidades mais frias, sendo que a elasticidade-temperatura estimada é de 1% para

0,46% - ou seja, a cada aumento marginal de 1% na temperatura, a elevação no consumo é de 0,46%. Considerando o efeito de temperaturas máximas, o efeito é ainda mais acentuado, com elasticidade de 0,61%. O autor destaca, ainda, a heterogeneidade dos dados, que mostram que famílias de baixa renda apresentam efeito da temperatura maior (elasticidade de 0,60%) do que as de renda média e alta (0,40%), e que o impacto térmico é mais pronunciado em áreas rurais (elasticidade de 0,35%) do que urbanas (0,20%), mesmo com uma menor média de consumo nessas zonas.

Identificam-se, enfim, duas concomitantes pressões oriundas dos aumentos de temperatura nas demandas hídricas de abastecimento humano. A primeira trata do aumento das temperaturas médias, o que influencia as demandas pelo uso da água. De forma complementar, tem-se também como pressão para incremento de demandas, as ondas de calor.

Para estimar o primeiro efeito, cujo tratamento pode ser embutido na composição de demandas hídricas devido ao seu comportamento permanente, destaca-se o estudo conduzido pelo Instituto Trata Brasil (2022), que incorpora dados históricos de temperatura dos estados de São Paulo e Ceará entre 1980-2015 para realizar análises passadas e projeções para 2040. Segundo o estudo, a cada grau Celsius adicional na temperatura, pode-se esperar um aumento de 2,4% na demanda por água domiciliar.

Uma vez que é esperado, na bacia do rio Paraíba do Sul, um incremento de 1,19 °C na temperatura média anual entre a verificada na cena atual (21,56 °C) e o clima entre 2040-2059 (22,75 °C), sob cenário de emissões SSP2-4.5, pode-se prever um aumento na demanda de abastecimento humano de 2,86%. Nota-se que esse incremento percentual é compatível com a aplicação do coeficiente de elasticidade encontrado por Zapata (2015) para o Equador: a relação de 1%:0,46%, quando aplicada aos 5,53% de aumento previsto para a temperatura média, resulta em um aumento de 2,54%.

Com base no coeficiente de elasticidade do Instituto Trata Brasil e no aumento esperado na temperatura média anual na bacia, portanto, pode-se aplicar o incremento de 2,86% sobre as demandas hídricas projetadas para os usos de abastecimento humano, tanto urbano quanto rural, projetados para o ano de 2045. Por fim, e no intuito de simular as consequências de um eventual episódio de onda de calor, adota-se um incremento de 20% sobre as demandas de mudanças climáticas, de forma a se ter uma noção do que pode ocorrer na conjunção de um evento extremo dessa natureza.

Os resultados são apresentados no Quadro 7-1 e Quadro 7-2 segmentados por unidade de planejamento e pela origem (superficial ou subterrânea).

De modo geral, a tendência do abastecimento humano urbano (Quadro 7-1) em 2045 é de redução se considerada a progressão padrão. A demanda na cena atual, de 17,81 m³/s, reduz para 14,68 m³/s em 2045 no cenário de maior pressão. Essa redução reflete os efeitos das mudanças nas dinâmicas populacionais nos três estados e as metas de redução de perdas nos sistemas de abastecimento de água, conforme mencionado no Produto 3. No entanto, com a inclusão dos efeitos das mudanças climáticas sob o cenário de emissões SSP2-4.5, o valor sobe para 15,11 m³/s, e, sob a condição mais crítica, de onda de calor, a demanda para abastecimento humano urbano total da BHPS alcança 18,13 m³/s, ultrapassando o valor da cena atual. De modo geral, verifica-se que os efeitos de mudança climática são, de certa forma, compensados pela redução no índice de perdas na distribuição e redução populacional projetada para a BHPS (consultar Produto 3 para mais informações).

A UP Alto Paraíba do Sul concentra os maiores valores de demanda de abastecimento humano urbano dentre todas as Unidades de Planejamento. No cenário de maior pressão (2045), as demandas dessa UP variam de 5,58 m³/s na progressão padrão para 5,74 m³/s com a influência das mudanças climáticas, alcançando 6,89 m³/s sob a condição de onda de calor. Esse aumento significativo evidencia o forte impacto que as ondas de calor podem exercer sobre a demanda hídrica, especialmente em regiões que já apresentam elevados níveis de demanda, como o Alto Paraíba do Sul.

Já a tendência do abastecimento humano rural (Quadro 7-2) é de incremento, tanto considerando a progressão padrão para 2045 (passa de 1,20 m³/s para 1,36 m³/s), quanto o cenário de mudança climática (1,38 m³/s) e onda de calor (1,66 m³/s).

Quadro 7-1 – Consolidação das demandas de abastecimento humano urbano (m³/s) sob cenário de emissões SSP2-4.5 e onda de calor no ano de 2045

UP	Cena Atual		Demandas de abastecimento humano urbano (m³/s) no ano de 2045																	
			Cenário de Menor Pressão						Cenário Tendencial						Cenário de Maior Pressão					
			Progressão padrão		Mudanças Climáticas		Onda de Calor		Progressão padrão		Mudanças Climáticas		Onda de Calor		Progressão padrão		Mudanças Climáticas		Onda de Calor	
	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup
1 - Alto Paraíba do Sul	0,81	5,63	0,81	5,62	0,83	5,78	1,00	6,94	0,76	4,82	0,78	4,96	0,94	5,95	0,79	4,79	0,81	4,93	0,97	5,92
2 - Rios Preto e Paraibuna	0,09	1,74	0,10	1,80	0,10	1,85	0,12	2,22	0,10	1,60	0,10	1,65	0,12	1,98	0,10	1,55	0,10	1,59	0,12	1,91
3 - Rios Pomba e Muriaé	0,25	1,76	0,25	1,78	0,26	1,83	0,31	2,20	0,26	1,76	0,27	1,81	0,32	2,17	0,27	1,78	0,28	1,83	0,34	2,20
4 - Médio Paraíba do Sul	0,02	3,12	0,02	3,02	0,02	3,11	0,02	3,73	0,02	2,31	0,02	2,38	0,02	2,86	0,02	2,14	0,02	2,20	0,02	2,64
5 - Piabanha	0,05	0,99	0,04	0,80	0,04	0,82	0,05	0,98	0,04	0,78	0,04	0,80	0,05	0,96	0,04	0,79	0,04	0,81	0,05	0,97
6 - Rio Dois Rios	0,01	0,69	0,01	0,71	0,01	0,73	0,04	0,88	0,01	0,62	0,01	0,64	0,04	0,77	0,01	0,60	0,01	0,62	0,05	0,74
7 - Baixo Paraíba do Sul	0,17	2,20	0,15	1,94	0,15	1,99	0,18	2,39	0,13	1,52	0,13	1,56	0,16	1,87	0,12	1,42	0,12	1,46	0,14	1,75
8 - Sub-bacia do Rio Pirai	0,01	0,27	0,01	0,43	0,01	0,44	0,01	0,53	0,01	0,31	0,01	0,32	0,01	0,38	0,01	0,26	0,01	0,27	0,01	0,32
Total	1,41	16,40	1,39	16,12	1,43	16,58	1,72	19,90	1,32	13,71	1,36	14,10	1,63	16,92	1,36	13,33	1,40	13,71	1,68	16,45
Total Geral	17,81		17,50		18,01		21,62		15,04		15,46		18,55		14,68		15,11		18,13	

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 7-2 – Consolidação das demandas de abastecimento humano rural (m³/s) sob cenário de emissões SSP2-4.5 e onda de calor no ano de 2045

UP	Cena atual		Demandas de abastecimento humano rural (m³/s) no ano de 2045																	
			Cenário de Menor Pressão						Cenário Tendencial						Cenário de Maior Pressão					
			Progressão padrão		Mudanças Climáticas		Onda de Calor		Progressão padrão		Mudanças Climáticas		Onda de Calor		Progressão padrão		Mudanças Climáticas		Onda de Calor	
	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup
1 - Alto Paraíba do Sul	0,23	0,09	0,23	0,09	0,24	0,09	0,29	0,11	0,24	0,10	0,25	0,10	0,30	0,12	0,30	0,12	0,31	0,13	0,37	0,14
2 - Rios Preto e Paraibuna	0,06	0,04	0,06	0,04	0,06	0,04	0,07	0,05	0,03	0,02	0,03	0,02	0,04	0,02	0,04	0,02	0,04	0,03	0,05	0,02
3 - Rios Pomba e Muriaé	0,21	0,00	0,22	0,00	0,23	0,00	0,28	0,00	0,14	0,00	0,14	0,00	0,17	0,00	0,17	0,00	0,17	0,00	0,20	0,00
4 - Médio Paraíba do Sul	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05
5 - Piabanha	0,09	0,06	0,09	0,06	0,09	0,06	0,11	0,07	0,10	0,07	0,10	0,07	0,12	0,08	0,13	0,08	0,13	0,08	0,16	0,10
6 - Rio Dois Rios	0,03	0,05	0,03	0,05	0,03	0,05	0,04	0,07	0,03	0,06	0,03	0,06	0,05	0,08	0,04	0,07	0,04	0,07	0,05	0,08
7 - Baixo Paraíba do Sul	0,09	0,14	0,09	0,14	0,09	0,14	0,11	0,17	0,09	0,14	0,09	0,14	0,11	0,17	0,11	0,17	0,11	0,17	0,13	0,20
8 - Sub-bacia do Rio Pirai	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02
Total	0,76	0,44	0,76	0,43	0,78	0,43	0,94	0,52	0,69	0,43	0,71	0,43	0,85	0,52	0,83	0,53	0,85	0,54	1,02	0,64
Total Geral	1,20		1,19		1,21		1,46		1,12		1,14		1,37		1,36		1,39		1,66	

Fonte: elaborado pelo Consórcio

7.3.2. Irrigação

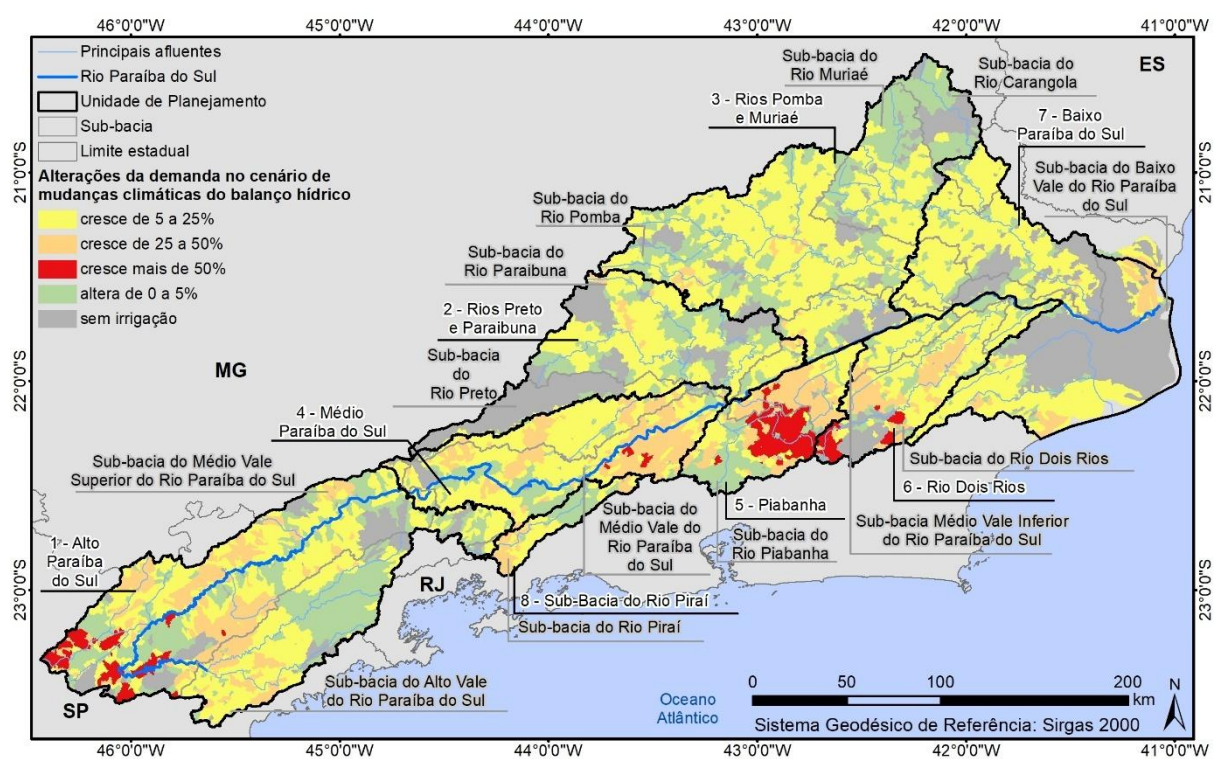
Estimar o aumento da demanda por irrigação devido às mudanças climáticas representa um complexo desafio para o planejamento hídrico, pois envolve sistemas interdependentes de clima-solo-planta-água, onde múltiplas variáveis climáticas interagem simultaneamente. Dada a relevância desse setor usuário dos recursos hídricos, a ANA conduziu estudo do impacto das mudanças do clima nas demandas de irrigação (2023), produzindo resultados que são alinhados ao propósito do presente estudo. As projeções foram obtidas pela leitura integrada de cenários climáticos no horizonte temporal de curto prazo, correspondente ao período 2015-2040 (outros períodos foram utilizados, cobrindo os anos de 2041-2070 e 2071-2100). Para gerar as projeções integradas para a Base Hidrográfica Ottocodificada, o estudo utilizou um ensemble de 33 modelos climáticos e projeções, que foram submetidos a técnicas de *downscaling* estatístico para correção de viés e alcançar resolução espacial de 0,25°.

O estudo identificou que o fator chave para o aumento da demanda de irrigação é o aumento consistente da evapotranspiração potencial, que deve ocorrer em todo o território brasileiro, resultado direto da elevação projetada das temperaturas para todos os cenários climáticos futuros. Paralelamente às alterações na evapotranspiração, modificações nas precipitações também devem gerar alterações na necessidade de irrigação suplementar. Segundo ANA (2023), a combinação de maior demanda evaporativa e menor precipitação, resulta em aumentos substanciais na demanda total de irrigação, especialmente nas regiões Norte e Nordeste do país. Já a região Sul apresenta um cenário diferenciado, com possível redução da necessidade de irrigação suplementar devido ao aumento da precipitação.

As projeções para a região Sudeste indicam que o maior fator de alteração é o aumento consistente da evapotranspiração, e não as projeções de alteração nas precipitações. A magnitude do aumento na evapotranspiração se situa, predominantemente, abaixo de 25% para a maioria dos cenários, mas pode chegar até 50% nos cenários mais pessimistas como o SSP5-8.5 para o período de longo prazo (2071-2100). A bacia do rio Paraíba do Sul apresenta aumentos menos pronunciados, mas ainda assim significativos o suficiente para impactar a demanda evaporativa das culturas irrigadas - ou seja, a quantidade de água que as culturas necessitam repor para compensar a perda de umidade do solo e das plantas causada pelo processo de evapotranspiração que, como visto, tem tendência de aumento. No período de relevância para a presente análise (2015-2040), os resultados apontam aumentos de 5-15% na demanda evaporativa, o que deve fazer com que os sistemas de irrigação tenham maiores demandas hídricas.

Conforme se observa na Figura 7-1, as alterações na demanda de irrigação por ottobacias são expressas em cinco classes, uma delas sendo a ausência de demanda por irrigação. De forma prática, adotam-se os seguintes resultados de cada uma das demais classes para compor as demandas hídricas de irrigação sob mudança do clima: 2,5% para a classe de alteração entre 0 e 5%; 15% para a classe entre 5 e 25%; 37,5% para a classe entre 25 e 50%; e finalmente, 50% para a classe superior. A aplicação dessas variações percentuais se dá sob as demandas agregadas de irrigação, apresentadas no Produto 3, para o horizonte de longo prazo (2045).

Figura 7-1 – Alterações (aumento) na demanda de irrigação em função das mudanças climáticas



Fonte: ANA (2023).

O Quadro 7-3 apresenta os resultados consolidados por unidade de planejamento, que são resultantes da aplicação das taxas adotadas para cada uma de suas ottobacias componentes. Com base nos dados projetados para o ano de 2045, observa-se um aumento significativo nas demandas de irrigação quando se considera exclusivamente o efeito das mudanças climáticas em comparação com a progressão padrão, ambos sob o cenário de maior pressão. Na cena atual, a demanda total é de 10,63 m³/s. Sob progressão padrão, esse valor se eleva para 20,55 m³/s, enquanto com a inclusão das mudanças climáticas, a demanda total atinge 23,81 m³/s — um acréscimo de 3,26 m³/s apenas devido ao fator climático.

Esse aumento de aproximadamente 16% em relação à progressão padrão evidencia o impacto direto das mudanças climáticas sobre o setor de irrigação, especialmente pela intensificação da evapotranspiração e pela maior demanda hídrica das culturas em cenários de temperatura elevada. As UPs com maior percentual de aumento nas demandas de irrigação quando comparada a projeção apenas econômica com a projeção de mudanças climáticas foram as UPs Piabanha (com 40% de aumento), Médio Paraíba do Sul (com 31% de aumento), Alto Paraíba do Sul (com 18% de aumento) e Rios Pomba e Muriaé (com 15% de aumento).

Quanto aos eventos extremos de temperaturas elevadas (ondas de calor), nota-se que o período de sua ocorrência, em combinação com o estágio fenológico da cultura, é essencial para determinar o grau de estresse decorrente. Segundo Han *et al.* (2022), ao estudarem a relação térmica no desenvolvimento de cereais (arroz, trigo, milho) e leguminosas, observaram que a ocorrência de estresse térmico durante o estágio reprodutivo resulta em aborto de flores, esterilidade do pólen e falha na polinização de todas as culturas, gerando declínio irreversível do número de sementes e, consequentemente, perda de produtividade. Kumar *et al.* (2015), ao analisarem o cultivo do arroz (*Oryza sativa*), identificam que a exposição a temperaturas superiores a 35°C por cerca de 5 dias, caso ocorra durante o florescimento, causa esterilidade das espiguetas e impede a formação de sementes. Além disso, os autores apontam que o estresse térmico também limita o rendimento por meio de um menor enchimento dos grãos, com reduções de 20-30%.

Kaushal *et al.* (2016) realizaram uma revisão de literatura abrangente acerca das respostas ao estresse térmico de diferentes culturas alimentares em regiões tropicais, subtropicais e temperadas, demonstrando que a elevação das temperaturas representa uma ameaça multinível. Especificamente quanto ao estresse térmico, os autores apontam que as regiões tropicais, como a bacia do rio Paraíba do Sul, apresentam alta vulnerabilidade devido à proximidade dos limiares críticos de temperatura, prevendo 10% de redução na produtividade do arroz para cada 1°C acima do limiar.

Compreende-se, enfim, que a ocorrência de estresse térmico para a agricultura irrigada terá, como resposta, reduções na produtividade ou, ainda, perdas de produção, o que não necessariamente resultará em maiores demandas para irrigação.

Quadro 7-3 – Consolidação das demandas de irrigação (m³/s) sob mudanças climáticas no ano de 2045

UP	Demandas de irrigação (m³/s) no ano de 2045													
	Cena Atual		Cenário de Menor Pressão				Cenário Tendencial				Cenário de Maior Pressão			
			Progressão padrão		Mudanças Climáticas		Progressão padrão		Mudanças Climáticas		Progressão padrão		Mudanças Climáticas	
	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup
1 - Alto Paraíba do Sul	0,05	4,78	0,05	5,75	0,06	6,78	0,06	6,25	0,07	7,35	0,07	7,68	0,08	9,04
2 - Rios Preto e Paraibuna	0,00	0,14	0,01	0,20	0,01	0,20	0,01	0,30	0,01	0,30	0,01	0,37	0,01	0,38
3 - Rios Pomba e Muriaé	0,08	1,48	0,11	2,14	0,12	2,42	0,16	3,19	0,19	3,64	0,21	4,11	0,24	4,71
4 - Médio Paraíba do Sul	0,00	0,30	0,00	0,35	0,00	0,46	0,00	0,37	0,00	0,49	0,00	0,42	0,00	0,55
5 - Piabanha	0,00	0,92	0,00	1,25	0,00	1,75	0,00	1,46	0,00	0,44	0,00	1,67	0,00	2,34
6 - Rio Dois Rios	0,03	0,43	0,04	0,52	0,04	0,57	0,04	0,60	0,04	0,62	0,05	0,68	0,05	0,68
7 - Baixo Paraíba do Sul	0,03	2,38	0,04	2,72	0,05	2,95	0,06	4,19	0,07	4,53	0,07	5,18	0,09	5,61
8 - Sub-bacia do Rio Pirai	0,00	0,02	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00	0,03
Total	0,19	10,44	0,25	12,96	0,28	15,16	0,33	16,38	0,38	17,40	0,42	20,14	0,47	23,34
Total Geral	10,63		13,21		15,44		16,71		17,78		20,55		23,81	

Fonte: elaborado pelo Consórcio

7.3.3. Dessedentação Animal

Assim como para a irrigação, são esperados efeitos sensíveis decorrentes do aumento das temperaturas no setor produtivo de criação animal, pois a água é um dos elementos fisiológicos de maior importância. Quanto mais calor os animais precisam dissipar, seja via suor, respiração ofegante ou urina, maior volume de água deverá ser consumido. Além da questão fisiológica, o uso da água nos tratamentos da criação animal (asseio dos animais, dos estabelecimentos e de equipamentos) também deve ser maior devido ao maior consumo de água para dessedentação, como sugerem as respostas fisiológicas. Modificações nas faixas de conforto térmico de animais de criação devem, inclusive, promover alterações estruturais na atividade, tal como a migração para outros locais ou a necessidade de substituição de raças - como Potopová (2023) identifica para a República Tcheca. Segundo resultados da análise global de Thornton *et al.* (2021), diversos nichos climáticos atuais para pecuária doméstica tendem a se tornar tão mais quentes e úmidos que o risco de estresse térmico exigirá considerável esforço de adaptação. Segundo os autores, sistemas de criação extensivos são os mais suscetíveis. Cada animal apresenta relações próprias entre temperatura e demanda de dessedentação, que podem ser estimadas em suas situações médias e em eventos extremos de ondas de calor.

Para enfatizar a importância da adequada hidratação e fornecimento de água na criação de bovinos, Benedetti (2007) esclarece que os animais podem sobreviver à perda de 100% do tecido adiposo e 50% da proteína corporal, mas morrem com perda de cerca de 10-12% da água corporal. O autor enfatiza que o fornecimento adequado de água maximiza a eficiência produtiva, sendo necessário considerar fatores climáticos, distância das fontes hídricas e qualidade da água no planejamento das propriedades rurais. A variável de interesse - fatores climáticos - é abordada pela correlação positiva entre a ingestão de água e o consumo de matéria seca, com a equação de regressão demonstrando coeficiente de 2,51 litros de água para cada quilograma consumido. Segundo Benedetti (2007), a variabilidade da temperatura ambiente pode contribuir com cerca de 15% da variação no consumo de água.

Segundo documento técnico de referência sobre a dessedentação de bovinos, publicado originalmente em 2011 por Rasby e Waltz, da Universidade de Nebraska, nos Estados Unidos, e recentemente atualizado (2024), a variação de consumo de água para temperatura limites de 4°C e de 32°C é: (i) de 15,1 a 56,8 litros/dia para novilhos e touros em crescimento, cujo peso corporal se situa entre 182 e 363 kg; (ii) de 22,7 a 78,0 litros/dia para bovinos em terminação (272-454 kg); (iii) 43,1 a 68,9 litros/dia para vacas em lactação (cerca de 409 kg); e (iv) de 30,3 a 78,0 litros/dia para touros maduros (peso superior a 636 kg).

A Publicação da Embrapa (Minho e Gaspar, 2023) corrobora os resultados de Rasby e Waltz para a ambiência brasileira, trazendo que um aumento da temperatura ambiente de 10°C para 32°C pode aumentar o requerimento de ingestão diária de água em até 2,5 vezes. Os autores também apresentam as diferenças entre raças, sendo que zebuínos (*Bos taurus indicus*) como Nelore, Gir e Guzerá apresentam maior adaptabilidade ao clima quente e seco; consequentemente, têm maior resistência a períodos de privação hídrica comparados a raças europeias (*Bos taurus taurus*). Shephard e Maloney (2023), estudando estas mesmas raças na Austrália, corroboram que o *B. indicus* detém taxa metabólica 15-20% inferior e maior densidade de glândulas sudoríparas que o *B. taurus*, demonstrando assim maior capacidade de adaptação ao clima quente. Em termos de temperaturas críticas, a da primeira raça foi de 30 °C de bulbo úmido, enquanto a da segunda foi de 26 °C.

De forma prática, identifica-se como tendência para todas as raças e estágios da criação, um aumento de cerca de 3-4% por grau Celsius a partir de temperaturas ambientes de cerca de 20 °C. Conforme o Produto 3, que tratou da elaboração das demandas hídricas para a bacia, foram adotados os coeficientes per capita para estimativa das demandas hídricas de dessedentação animal, provenientes do Manual de Usos Consuntivos (ANA, 2024). Para a criação animal de bovinos: 50 litros por dia por animal para o gado de corte, e 127,5 litros/dia para vacas ordenhadas, nos quais estão incluídos tanto o atendimento das necessidades fisiológicas como as demandas correlatas (lavagem, limpeza e manutenção de instalações e estruturas). Uma vez que se prevê aumento de 1,19 °C na temperatura média até 2045 (Item 5.3.2), e utilizando-se de um aumento de 3,5% no coeficiente de dessedentação de bovinos para cada grau Celsius, pode-se prever coeficientes futuros de 52,09 litros/dia para gado de corte e de 132,82 litros/dia para vacas ordenhadas.

Já em termos de eventos extremos, pode-se calcular as demandas hídricas específicas (coeficiente em litros por dia) associados à ocorrência de uma onda de calor. Evidente que essa ocorrência é episódica durante o transcorrer de um ano - não obstante, gerará uma demanda pontual bastante elevada. A diferença de temperatura entre o limiar de 35 °C e a média futura (projetada em 22,75 °C) é de 12,25 °C, o que gera coeficientes de 71,44 litros/dia para gado de corte e de 182,17 litros/dia para vacas ordenhadas.

Dada a similaridade com os bovinos e haja vista terem o mesmo coeficiente de consumo unitário, a mesma métrica é adotada para o rebanho bubalino (coeficiente de 52,09 litros/dia para a temperatura média e de 71,44 litros/dia para ondas de calor). Já para o rebanho equino cujo coeficiente padrão é de 40 litros/dia, tem-se alterações respectivas para 41,67 e 57,15 litros por dia.

Para a criação de suínos, observa-se por dados da Embrapa³ que as zonas de conforto térmico são bastante variáveis a depender da fase de vida e da condição reprodutiva. Os recém-nascidos representam a categoria mais sensível termicamente, necessitando temperaturas de conforto entre 32-34 °C devido à sua limitada capacidade de termorregulação e baixa reserva energética. Durante o período de aleitamento, os leitões até a desmama apresentam temperaturas de conforto ligeiramente mais baixas, entre 29-31 °C, apresentando temperatura crítica inferior de 21 °C e superior de 36 °C. As faixas de temperatura variam, então, entre 22-26 °C para leitões desmamados, 18-21°C para leitões em crescimento, e entre 12-21 °C na fase de terminação. As fêmeas em lactação apresentam as menores exigências térmicas para conforto, situando-se entre 12-16°C, com temperatura crítica inferior de 7 °C e superior de 23 °C. Marco (2023) compila diversos estudos de sistemas intensivos de suinocultura, apontando que, assim como a faixa de conforto térmico, o consumo de água varia conforme a fase produtiva, com leitões lactentes requerendo de 1-2 litros/dia, passando a 2-5 litros/dia para leitões desmamados, 2,5-12 para suínos em crescimento, 5-20 para suínos em terminação e de até 25 litros por dia para as porcas gestantes e lactantes. O autor aponta uma relação bastante direta entre a temperatura e o consumo de água, indicando que para cada grau Celsius de aumento na temperatura ambiente, o consumo de água aumenta 1,45% quando em condições normais de temperatura acima de 21 °C. Quando a temperatura ambiente se eleva para a faixa de 30-35 °C, ocorre um aumento mais do que proporcional, superior a 50% no consumo de água.

Tal como para os bovinos, pode-se aplicar o coeficiente de 1,45% para cada grau Celsius na previsão de aumento na temperatura média da bacia do rio Paraíba do Sul para se ter, em 2045, o coeficiente futuro de consumo em termos de litros de água por dia. Assim, o coeficiente padrão de consumo em suínos, que é de 18,7 litros por dia, passa a ser de 19,02 no futuro. Já em termos de eventos extremos, adota-se o aumento indicado de 50% na demanda, o que faz com que o coeficiente passe a ser de 28,05 litros/dia. Dada a relativa similaridade nos coeficientes de dessedentação animal suíno e ovino/caprino, e principalmente dada a baixa expressividade destes rebanhos na bacia, adotam-se as mesmas métricas. Assim, o coeficiente de 10 litros/dia passa a ser de 10,17 sob mudança média e de 15 litros/dia sob ondas de calor.

³ Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/criacoes/suinos/pre-producao/equipamentos-e-instalacoes/construcoes/homeotermia>

Analisando a relação de consumo de água e temperatura para a criação avícola, Tabler *et al.* (2018) observam que frangos de corte consomem quase duas vezes mais água que ração em peso. Durante sua vida, um frango de cerca de 2,27 kg consumirá aproximadamente 8,16 kg de água, comparado a aproximadamente 4,54 kg de ração. Quanto ao impacto da temperatura no consumo, os autores encontram uma taxa de aproximadamente 7% de incremento para cada grau Celsius de aumento na temperatura quando a temperatura ambiente se encontra na faixa entre 20°C e 32°C. A partir desse limiar, no entanto, o ritmo cai para cerca de 5% para cada novo grau de aumento na temperatura. Embora o foco das análises seja em criações avícolas norte-americanas, tem-se que os sistemas de produção comercial são intensivos e similares aos nacionais, podendo-se assumir a aplicabilidade das taxas observadas.

O cálculo da dessedentação animal avícola é segregado em codornas, aves de corte e galinhas poedeiras, cujos coeficientes padrão são de respectivos 0,18, 0,22 e 0,27 litros por dia. Com base no incremento médio de temperaturas, pode-se estimar, então, coeficientes de 0,20 litros/dia para as codornas, 0,24 litros/dia para frangos de corte, e de 0,29 litros/dia para as galinhas de postura. Já para os eventos extremos, os coeficientes respectivos passam a ser de 0,29, 0,36 e de 0,44 litros/dia.

A metodologia de cálculo e espacialização das demandas de dessedentação animal seguiu as mesmas premissas que foram aplicadas no Produto 3 – Quadro das demandas hídricas da bacia do rio Paraíba do Sul atual e futuro. O Quadro 7-4 consolida os coeficientes técnicos aplicados no cálculo das demandas hídricas de dessedentação animal considerando a condição normal (adotada no Produto 3), a condição de mudanças climáticas com o cenário SSP2-4.5, e, a condição de mudanças climáticas acrescida de situações de ondas de calor.

Quadro 7-4 – Coeficientes técnicos da dessedentação animal sob condições normais, sob cenário de emissões SSP2-4.5 no ano de 2045 e sob ondas de calor

Espécie	Conceituação	Coeficiente adotado (litros por cabeça por dia)		
		Padrão	Mudanças climáticas	Ondas de Calor
Bovino	Total de mamíferos das espécies <i>Bos indicus</i> (boi indiano) ou <i>Bos taurus</i> (boi europeu), independentemente de sexo, idade, raça ou finalidade (corte, leite ou trabalho).	50,00	52,09	71,44
Vacas Ordenhadas	Vacas mestiças ou de raça (de corte, de leite ou de dupla aptidão) existentes no município e que foram ordenhadas em algum período no ano de referência da pesquisa, quer seja para autoconsumo, transformação em queijos, manteiga etc. quer seja para venda.	127,50	132,82	182,17
Suíno	Total de mamíferos da espécie <i>Sus scrofa</i> (porcos e porcas), independentemente de sexo, idade ou finalidade da produção.	18,70	19,02	28,05

Espécie	Conceituação	Coeficiente adotado (litros por cabeça por dia)		
		Padrão	Mudanças climáticas	Ondas de Calor
Bubalino	Total de mamíferos da espécie <i>Buballus buballis</i> , independentemente de sexo, idade ou finalidade (corte ou leite).	50,00	52,09	71,44
Equinos	Total de mamíferos da espécie <i>Equus caballus</i> (cavalos, éguas, potros e potrancas).	40,00	41,67	57,15
Ovino	Total de mamíferos da espécie <i>Ovis aries</i> (ovelhas, carneiros e borregos), independentemente de sexo, idade ou finalidade (lã, corte ou leite).	10,00	10,17	15,00
Caprino	Total de mamíferos da espécie <i>Capra aegagrus hircus</i> (bodes, cabras e cabritos), independentemente de sexo, idade ou finalidade (corte ou leite).	10,00	10,17	15,00
Galináceos (aves de corte)	Total de aves da espécie <i>Gallus gallus</i> (galos, galinhas, frangas, frangos, pintos e pintainhas).	0,22	0,24	0,36
Galináceos - galinhas	Total de aves fêmeas da espécie <i>Gallus gallus</i> destinadas à produção de ovos, independentemente do destino da produção (consumo, industrialização ou incubação). Inclui poedeiras e matrizes.	0,27	0,29	0,44
Codornas	Total de aves da espécie <i>Coturnix coturnix</i> destinadas à produção de ovos e abate, independentemente de sexo ou idade.	0,18	0,20	0,29

Fonte: elaborado pelo Consórcio

O Quadro 7-5 apresenta os resultados consolidados por unidade de planejamento, oriundos da aplicação dos coeficientes de consumo mencionados anteriormente. Com base nos dados projetados para o ano de 2045, observa-se um aumento significativo nas demandas hídricas para dessedentação animal quando se considera exclusivamente o efeito das mudanças climáticas em comparação com a progressão econômica do setor, ambos sob o cenário de maior pressão. Na cena atual, a demanda total para dessedentação animal é de 3,20 m³/s. Sob a projeção econômica para 2045 (sem variações climáticas), esse valor sobe para 5,64 m³/s. Com a inclusão dos efeitos das mudanças climáticas, a demanda atinge 5,90 m³/s, representando um aumento de 5% em relação à progressão padrão. Em um cenário ainda mais crítico, com a ocorrência de ondas de calor, a demanda total chega a 8,08 m³/s, o que representa um acréscimo de 43%. Esse aumento reflete o impacto direto das mudanças climáticas sobre a demanda por água no setor pecuário, principalmente devido ao aumento da temperatura e da necessidade hídrica dos animais em cenários de estresse térmico.

Quadro 7-5 – Consolidação das demandas de criação animal (m³/s) sob cenário de emissões SSP2-4.5 e ondas de calor no ano de 2045

UP	Cena Atual		Demandas de dessedentação animal (m³/s) no ano de 2045																	
			Cenário de Menor Pressão						Cenário Tendencial						Cenário de Maior Pressão					
			Progressão padrão		Mudanças Climáticas		Onda de Calor		Progressão padrão		Mudanças Climáticas		Onda de Calor		Projeção padrão		Mudanças Climáticas		Onda de Calor	
	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup	Sub	Sup
1 - Alto Paraíba do Sul	0,17	0,43	0,22	0,56	0,23	0,59	0,31	0,80	0,25	0,65	0,26	0,68	0,36	0,94	0,30	0,77	0,31	0,80	0,43	1,10
2 - Rios Preto e Paraibuna	0,25	0,05	0,36	0,07	0,37	0,07	0,52	0,10	0,39	0,07	0,41	0,08	0,56	0,10	0,46	0,09	0,48	0,09	0,66	0,12
3 - Rios Pomba e Muriaé	0,26	0,49	0,35	0,65	0,38	0,69	0,51	0,94	0,41	0,76	0,44	0,81	0,60	1,10	0,54	1,00	0,57	1,05	0,78	1,43
4 - Médio Paraíba do Sul	0,00	0,32	0,00	0,41	0,00	0,43	0,00	0,59	0,00	0,48	0,00	0,50	0,00	0,68	0,00	0,56	0,00	0,58	0,00	0,80
5 - Piabanha	0,06	0,05	0,07	0,06	0,07	0,06	0,09	0,09	0,09	0,08	0,09	0,08	0,13	0,12	0,10	0,09	0,11	0,10	0,15	0,14
6 - Rio Dois Rios	0,00	0,26	0,00	0,33	0,00	0,35	0,00	0,48	0,00	0,37	0,00	0,39	0,00	0,53	0,00	0,44	0,00	0,46	0,00	0,63
7 - Baixo Paraíba do Sul	0,21	0,60	0,23	0,65	0,24	0,68	0,33	0,94	0,27	0,77	0,28	0,80	0,38	1,10	0,31	0,90	0,33	0,94	0,45	1,28
8 - Sub-bacia do Rio Pirai	0,00	0,05	0,00	0,06	0,00	0,06	0,00	0,08	0,00	0,07	0,00	0,08	0,00	0,11	0,00	0,09	0,00	0,09	0,00	0,13
Total	0,95	2,26	1,22	2,80	1,28	2,93	1,76	4,02	1,41	3,26	1,48	3,41	2,04	4,68	1,71	3,93	1,80	4,10	2,46	5,62
Total Geral	3,20		4,02		4,21		5,78		4,67		4,89		6,72		5,64		5,90		8,08	

Fonte: elaborado pelo Consórcio

7.3.4. Indústria e Termelétricas

Da mesma forma que para o setor de abastecimento humano, é plausível vislumbrar que haja pressão por aumento na demanda hídrica do setor industrial em decorrência do aumento das temperaturas médias e máximas em decorrência da mudança do clima. Usos assemelhados aos domiciliares, certamente, tenderão a ser incrementados devido aos fatores fisiológicos e de mudanças comportamentais anteriormente comentados. Os usos da água em processos industriais, por sua vez, e devido à heterogeneidade que caracteriza este setor usuário, são mais difíceis de serem quantitativamente previstos.

Indústrias intensivas em energia térmica devem apresentar correlação mais direta entre temperatura ambiente e consumo de água para resfriamento, sendo que tais processos na siderurgia e na petroquímica, por exemplo tendem a demandar mais água. Já processos de aquecimento industrial, paradoxalmente, podem vir a se beneficiar de temperaturas ambiente mais elevadas, com consequente redução de demanda. Setores como o de produção de alimentos e bebidas, ou de produtos farmacêuticos, por exemplo, possuem demandas hídricas mais relacionadas a processos específicos do que às condições térmicas externas. A adoção de tecnologias específicas também pode significar diferentes graus de dependência de temperatura externa, como a de circuito fechado: nela, e diferentemente da adoção de sistemas abertos, existe menor sensibilidade térmica. Em sistemas de reúso e de recirculação, ademais, as dinâmicas hídricas são basicamente desacopladas das condições térmicas externas.

O aumento das temperaturas, portanto, deve gerar efeitos contraditórios na demanda hídrica industrial, a depender do caso específico. Enquanto pode-se observar aumento da demanda para resfriamento industrial e climatização, pode-se ter uma redução da demanda devido ao menor aquecimento necessário em certos processos.

Um outro aspecto interessante, mas de difícil mensuração, é decorrente de mudanças na qualidade da água disponível. Maiores temperaturas podem, eventualmente, resultar em maiores custos de tratamento, mas também aqui a relação é variável a depender do contexto de aplicação da água na indústria. Mais relevante ainda é que a água detém elevada capacidade térmica, o que faz com que as variações de temperatura do ar tenham impacto muito menos proporcional que na temperatura da água, especialmente em rios com fluxo contínuo (inércia térmica da água).

A complexidade de consideração do efeito das temperaturas mais elevadas nas demandas industriais aumenta ainda mais quando se considera que muitas empresas implementaram ou devem implementar estratégias de redução de dependência hídrica. Segundo a publicação

intitulada "Água e Indústria: Experiências e Desafios", elaborada pelo Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços em parceria com a Confederação Nacional da Indústria (Lima, 2018), o setor industrial nacional tem demonstrado compromisso com a otimização do uso dos recursos hídricos, implementando estratégias para reduzir o consumo unitário de água nos processos produtivos. Em parte, a motivação para tais investimentos advém de situações de restrição hídrica efetiva ou potencial. Na publicação, elencam-se os riscos envolvidos na dependência hídrica, que abrangem: (i) questões operacionais (tal como o aumento dos custos de produção devido à diminuição da disponibilidade e o custo de tratamento devido à redução da qualidade da água); (ii) riscos financeiros (acesso restrito ou mais caro ao capital para empresas sem programas de gestão hídrica); e (iii) aspectos mercadológicos (como a perda de competitividade devido à crescente preocupação dos clientes com impactos ambientais, o que pode ser realizado via relatórios de sustentabilidade e adoção de padrões globais como o GRI 303 e o CDP Water).

Lima (2018) apresenta exemplos de redução da dependência hídrica no setor industrial, como o Aquapolo, o Projeto Água Viva da Cetrel/Braskem, o Polo Automotivo Fiat em Betim, o programa ReduZa da Raízen e a prática da ArcelorMittal em Tubarão, salientando a diversificação de fontes de abastecimento e projetos de reúso. De fato, o autor destaca os seguintes grupos de investimentos prioritários para as indústrias, em perspectivas futuras: (i) eficiência hídrica dos processos; (ii) busca por fontes alternativas de abastecimento, tal como o reúso, a dessalinização e a captação pluvial; e (iii) o engajamento da cadeia produtiva. O potencial de expansão das práticas de redução da dependência hídrica industrial é posto como significativo e promissor, uma vez que no Sudeste é utilizada uma fração de cerca de 18% do potencial estimado de reúso. Cita-se, ainda, o crescimento no número de provedores de soluções tecnológicas e, evidentemente, a existência de tecnologias cada vez mais apropriadas à gestão da demanda hídrica industrial.

Segundo a Trilha de Riscos Hídricos Empresariais, desenvolvida pelo Pacto Global da ONU (2024), é extenso o portfolio de medidas de eficiência hídrica que as industriais dispõem, indo desde o reúso (aproveitamento de condensados de vapor, por exemplo), redução de perdas e ganhos de eficiência (como a instalação de sistemas de dosagem automatizada, por exemplo), aumento da capacidade de reservação, mudanças de processos produtivos mais eficientes, até medidas de gestão e conscientização. A implementação dessas medidas visa reduzir a dependência da captação de água, reduzindo assim os riscos correlatos - ou seja, é de interesse intrínseco das empresas promovê-las.

Uma das medidas de maior grandeza na redução das demandas hídricas é o reúso de efluentes tratados. Estudo da Confederação Nacional da Indústria sobre o impacto econômico de tais investimentos revela um grande potencial de economia de água, mas que requer investimentos significativos (CNI, 2020): considerando diferentes cenários de implementação, o estudo estima em R\$ 1,9 bilhão o investimento (gastos de capital) para explorar o potencial dessa solução. Embora a soma seja expressiva, o estudo demonstra que esses investimentos podem gerar R\$ 5,9 bilhões em valor agregado à economia brasileira e criar aproximadamente 96 mil empregos.

Publicação conjunta entre a Federação das Indústrias de São Paulo – FIESP e a Confederação Nacional das Indústrias – CNI (2025), que aborda a economia circular na indústria, elenca a gestão hídrica e redução de demanda como perspectiva certa, baseando-se em tecnologias emergentes e políticas de incentivo. Destacam-se o desenvolvimento de parcerias público-privadas para viabilizar a implantação de projetos de reúso industrial, o potencial da dessalinização para cidades litorâneas, as inovações em tecnologias de reciclagem de água⁴ e a crescente adoção de sistemas de captação de água da chuva.

No caso das usinas termelétricas, o aumento das temperaturas pode intensificar a demanda hídrica desse setor, sobretudo nos processos de resfriamento, que concentram a maior parte do consumo de água desses empreendimentos. O desempenho dos sistemas de resfriamento é diretamente afetado pela temperatura do ar e da água disponível nos corpos hídricos utilizados, de modo que temperaturas mais altas devem reduzir a eficiência do resfriamento, exigindo uma maior captação de água ou, alternativamente, a adoção de tecnologias mais eficientes, porém frequentemente mais caras, como sistemas de recirculação ou torres secas. O processo físico que elevaria o consumo de água das usinas é, em grande parte, devido à elevação das temperaturas da água captada. Dada a capacidade e inércia térmica das águas, no entanto, mudanças em sua temperatura ocorrem de maneira mais lenta e menos expressiva que mudanças na temperatura do ar. Assim, as variações nas condições atmosféricas devem resultar em aquecimento proporcionalmente menor dos grandes corpos d'água, especialmente rios de maior vazão e profundidade. Dessa forma, não se vislumbram modificações quantificáveis para as demandas das usinas, muito embora estas possam, marginalmente, serem elevadas.

⁴ Embora similares em propósito, a reciclagem da água é obtida quando se mantém a água no mesmo ciclo produtivo, enquanto o reúso direciona a água tratada para aplicações distintas da original, representando uma cascata de usos com diferentes níveis de qualidade exigidos.

Dado o arrazoado, torna-se plausível supor que o setor industrial não terá suas demandas hídricas aumentadas especificamente devido ao aumento de temperatura. É clara a tendência de implementação de medidas de redução de dependência hídrica que, por menores que sejam em volume hídrico, tendem a compensar os eventuais aumentos trazidos pelas mais altas temperaturas. Indústrias em setores mais comprometidos tendem a ser as mais interessadas em monitoramento e atualização de práticas eficientes. Para fins de cálculo de balanço hídrico, portanto, as demandas industriais se mantêm inalteradas em relação àquelas cenarizadas para o período de 2045 sob os três cenários construídos no Produto 3.

7.3.5. Mineração

As demandas hídricas do setor de mineração são pouco suscetíveis às projeções de elevação nas temperaturas ambientais e até mesmo das águas. Retoma-se que na bacia do rio Paraíba do Sul, há predominância da atividade mineral de extração de pedra, brita e areia em leito de rio. Trata-se de um processo extrativo de cunho físico e mecânico que inclui etapas como dragagem, peneiramento, lavagem e classificação granulométrica, todas realizadas com equipamentos hidráulicos e mecânicos cuja eficiência não é sensível às condições térmicas atmosféricas. Os sistemas de refrigeração dos equipamentos independem da temperatura ambiente, e nota-se que os equipamentos de dragagem, particularmente, operam submersos.

O aumento da temperatura do ar, adicionalmente, não promove alterações diretas na composição mineralógica, tampouco na quantidade de material disponível nos depósitos aluviais, que são em parte abastecidos pelas dinâmicas de alteração no uso do solo, além de intemperismos. Além da atividade mineral de pedra, brita e areia em leito de rio, verifica-se também a extração de minerais para adubos e fertilizantes - vinculados à atividade agropecuária. Além de serem atividades que ocorrem em menor escala (e com consequência menor demanda pelo uso das águas), observa-se que a disponibilidade dos recursos extraídos, como fosfatos, potássio, enxofre e calcário, é determinada por fatores geológicos e não por condições climáticas superficiais. Adicionalmente, compostos minerais tendem a apresentar alta estabilidade química, mantendo suas propriedades mesmo com aumentos moderados de temperatura.

Em relação aos processos de extração de minerais para adubos e fertilizantes, novamente tem-se o emprego de métodos físicos e mecânicos - como a perfuração, desmonte, seleção, carregamento e transporte - que são muito pouco sensíveis às temperaturas ambientes. Em resumo, dado o uso de equipamentos pesados, grandes volumes de material e presença de água (no caso de agregados de construção civil) criam um ambiente no qual as variações previstas na temperatura do ar não devem se traduzir em

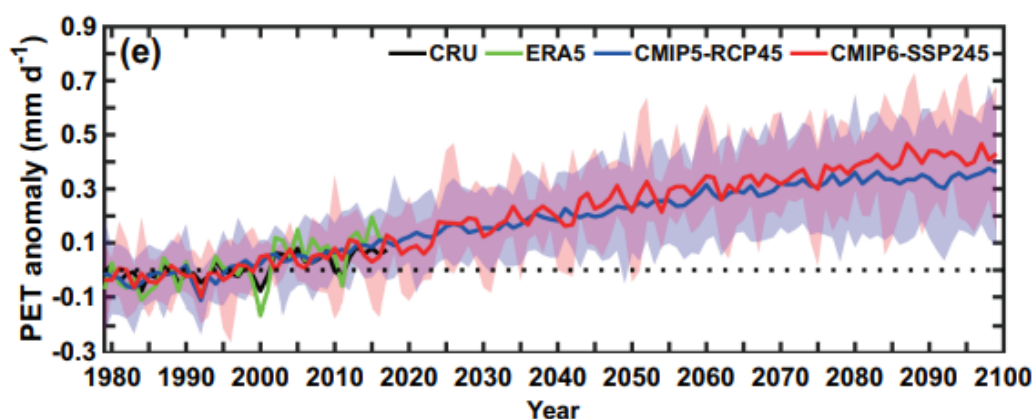
impactos operacionais significativos. Dessa forma, conclui-se que, de forma similar às demandas industriais, para fins de cálculo do balanço hídrico sob mudança do clima, mantêm-se as projeções dos três cenários para o ano de 2045.

7.3.6. Evaporação Líquida

Diversos estudos têm relatado que o aumento na temperatura global deve favorecer o aumento nas taxas evaporativas (Wang *et al.*, 2018; Woolway *et al.*, 2020). Considerando as projeções de impactos de mudanças climáticas nas tendências de evaporação, Wang *et al.* (2018) estimaram um aumento de 16% nas taxas de evaporação média anual global, até o ano de 2100, com tendências de aumento na evaporação principalmente em regiões de baixas latitudes (30° S a 30° N), que é o caso da BHPS.

No estudo de Liu *et al.* (2020), que comparou os conjuntos de modelos CMIP5 e CMIP6, as simulações sob o cenário de emissões RCP4.5 (CMIP5) e SSP2-4.5 (CMIP6) apontam que, para o horizonte de 2045, o aumento da evapotranspiração global situa-se em torno de 0,2 mm/dia, sendo ligeiramente maior nos modelos CMIP6 (Figura 7-2). Anomalias semelhantes foram observadas no estudo de Laîné *et al.* (2014) e Douville *et al.* (2021), os quais identificaram, para a região Sudeste do Brasil, um aumento na evaporação entre 0,1 e 0,25 mm/dia até 2100 - mais pronunciado durante a estação chuvosa em comparação com o período seco. Esses valores correspondem a alterações inferiores a 5% em relação à média do período de referência 1995–2014 (Douville *et al.*, 2021).

Figura 7-2 – Séries temporais das anomalias interanuais globais de evapotranspiração terrestre (mm/dia), para o hemisfério sul, para o conjunto de dados observados (preto) de 1979 a 2017, o conjunto de dados de reanálise ERA5 (verde) de 1979 a 2017 e as médias dos conjuntos CMIP5 (azul) e CMIP6 (vermelho) de 1979 a 2099



Fonte: Liu *et al.* (2020)

Embora evapotranspiração e evaporação representem processos distintos — sendo a primeira a soma da evaporação direta e da transpiração vegetal —, o uso da evapotranspiração como aproximação para estimar alterações na evaporação é justificável

em análises baseadas em modelos climáticos de grande escala. Isso se deve à resolução espacial típica desses modelos, que varia entre 50 e 100 km por célula da grade do modelo. Nessa escala, os valores simulados representam uma média integrada da superfície, combinando áreas de solo, vegetação e corpos d'água. Assim, os resultados de evapotranspiração em regiões que incluem lagos, reservatórios ou rios refletem um mosaico de fluxos superficiais, sendo compostos tanto pela evaporação de superfícies d'água quanto pela transpiração e evaporação do solo circundante. Portanto, nesse contexto, as projeções de evapotranspiração podem ser interpretadas como um indicador agregado da demanda evaporativa da atmosfera, servindo como uma estimativa representativa da tendência de aumento da evaporação regional, especialmente em cenários de aquecimento climático.

De forma a projetar o aumento da evaporação para as massas d'água da BHPS, no ano de 2045, sob alterações do cenário SSP2-4.5, foram utilizados dados da literatura e foi aplicado um acréscimo de 0,2 mm/dia em relação à evaporação atual (calculada no Produto 3) utilizando dados das Normais Climatológicas do Brasil das estações do INMET, bem como a área superficial das massas d'águas da ANA.

O Quadro 7-6 apresenta os resultados das projeções de evaporação líquida consolidados por unidade de planejamento. Em termos gerais, observa-se que as vazões de evaporação líquida aumentam ao longo do tempo, impulsionadas por dois principais fatores: a ampliação da área inundada devido à construção de novos reservatórios, que foram detalhados no Produto 3 (Cenário Progressão Padrão) e o aumento das taxas de evaporação associado ao aumento das temperaturas (Cenário Mudanças Climáticas). A demanda de evaporação líquida passa de 12,25 m³/s na cena atual para até 18,23 m³/s no cenário de maior pressão sob mudanças climáticas — um aumento de quase 50%.

Ressalta-se que a evaporação dos reservatórios atualmente presentes na bacia já está incorporada na estimativa da disponibilidade hídrica do estudo EDH-PS. O modelo chuva-vazão Modelo de Grandes Bacias (MGB), utilizado no referido estudo, considera o balanço vertical de água no solo, incorporando variáveis como vegetação, clima e umidade do solo para a simulação das séries hidrológicas. Contudo, nos cenários futuros de projeção de demandas hídricas, estão previstos novos reservatórios para contenção de cheias e novos aproveitamentos hidrelétricos na bacia. Portanto, a evaporação associada a esses empreendimentos futuros foi inserida no balanço hídrico como uma demanda adicional, e não como um fator já embutido na disponibilidade hídrica.

Quadro 7-6 – Comparação das demandas de evaporação líquida (m³/s), na cena atual e nos cenários de maior pressão (2045) e de mudança climática por unidade de planejamento

UP	Cena Atual	Demandas de Evaporação Líquida (m³/s) no ano de 2045					
		Cenário de Menor Pressão		Cenário Tendencial		Cenário de Maior Pressão	
		Progressão padrão	Mudanças Climáticas	Progressão padrão	Mudanças Climáticas	Progressão padrão	Mudanças Climáticas
1 - Alto Paraíba do Sul	6,55	6,55	6,55	6,55	6,56	6,55	6,56
2 - Rios Preto e Paraibuna	0,86	0,86	0,90	0,87	0,91	1,64	1,68
3 - Rios Pomba e Muriaé	1,09	1,09	1,13	1,19	1,23	2,00	2,05
4 - Médio Paraíba do Sul	0,87	0,92	0,92	0,97	0,98	0,97	0,98
5 - Piabanha	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,26	0,26
6 - Rio Dois Rios	0,17	0,18	0,23	0,29	0,34	1,31	1,36
7 - Baixo Paraíba do Sul	2,39	4,58	4,70	5,14	5,26	5,14	5,26
8 - Sub-bacia do Rio Pirai	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Total	12,25	14,50	14,77	15,34	15,60	17,96	18,23

Fonte: elaborado pelo Consórcio

7.3.7. Transposições

Não foram projetados aumentos nos valores de vazões transpostas em função de mudanças climáticas visto que, para o cenário de 2045 (maior pressão), as transposições já foram consideradas com sua vazão máxima, sendo:

- Transposição Jaquari-atibainha: passa de 5,15 m³/s (valor médio atual) para 8,5 m³/s (valor máximo), seguindo o estabelecido na Resolução ANA n° 1931/2017;
- Sistema Guandu: foi considerada a manutenção do valor atual de 119 m³/s para as cenas futuras. O valor máximo possível da transposição (de 160 m³/s) é indicado para situação de condições hidrológicas favoráveis na bacia (conforme Decreto 8.324/1971 e Decreto 81.436/1978), o que não é o caso das vazões mínimas de referência e nem cenários de redução da disponibilidade hídrica em função de mudanças climáticas.

Deve ser lembrado que o modelo hidrológico do estudo EDH-PS já considerou a incorporação das vazões transpostas nos barramentos que regularizam o rio Paraíba do Sul por meio de séries observadas de defluência dos principais reservatórios. No entanto, os valores de vazão das transposições consideradas no EDH-PS são representativos para a cena atual de demandas hídricas. Dessa forma, para os cenários futuros, como é o caso do cenário de maior pressão (2045), onde há uma previsão de aumento das vazões transpostas, as mesmas foram inseridas no balanço hídrico como a diferença de vazão entre a cena atual e as cenas futuras.

Embora não se possa assegurar que haverá disponibilidade hídrica suficiente para manter as demandas de transposição sob cenários de mudanças climáticas (Paiva, 2020), de forma conservadora, optou-se por adotá-los nas simulações do balanço hídrico.

O estudo de Paiva (2020) utilizou o modelo hidrológico distribuído do INPE (MHD-INPE) para simular os impactos hidrológicos das mudanças climáticas (cenários RCP 4.5 e RCP 8.5) e de uso do solo (cenários otimista, atual e pessimista) sobre a bacia do rio Paraíba do Sul. O cenário RCP 4.5, de mitigação moderada, foi acoplado a projeções de expansão urbana, silvicultura e agricultura no Vale do Paraíba Paulista. A simulação considerou o período de 2016 a 2055, dividido em dois intervalos (2016–2035 e 2036–2055), com análise da frequência de falhas nas regras de transposição e regularização dos reservatórios (Jaguari, Paraibuna, Santa Branca e Funil). As análises de segurança hídrica conduzidas por Paiva (2020) indicaram que a maioria dos cenários apontam que o reservatório de Jaguari conseguirá atender a transposição para o Sistema Cantareira e a sua produção de energia para todos os períodos simulados. Por outro lado, todos os cenários concordam em que a

transposição para o Sistema Guandu poderá ser comprometida em até 60% do tempo até meados do século.

7.3.8. Consolidação das demandas hídricas em cenário de mudança climática

Para resumir os resultados das demandas hídricas dos cenários futuros nos diferentes cenários, este item apresenta os valores consolidados das demandas hídricas da bacia do rio Paraíba do Sul (sem considerar transposições e a evaporação líquida de reservatórios), tal qual foi apresentado no Produto 3. O Quadro 7-7 apresenta os resultados consolidados para cada setor usuário e por Unidade de Planejamento, considerando o cenário de Maior Pressão - 2045. O Quadro 7-8 e o Quadro 7-9 apresentam as demandas separadas por fonte de captação, superficial e subterrânea, respectivamente. No Apêndice A são apresentados os mapas de demandas hídricas das cenários futuras por Ottobacia.

Os efeitos das mudanças climáticas e ondas de calor foram considerados para abastecimento humano (urbano e rural), dessedentação animal e irrigação. No caso dos setores industrial, mineração e termoeletricidade foi considerado que não terão suas demandas hídricas aumentadas especificamente devido ao aumento de temperatura, especialmente pela tendência de implementação de medidas de redução de dependência hídrica.

A análise da demanda hídrica total nos diferentes cenários (Quadro 7-7) revela um crescimento expressivo entre a situação atual e os cenários projetados para 2045. No cenário de maior pressão com mudanças climáticas e ondas de calor, a demanda total da BHPS atinge 88,83 m³/s, um aumento de 25,4 m³/s (40,3%) em relação à demanda atual de 63,02 m³/s e de 9,43 m³/s (11,87%) em relação à projeção padrão para 2045 (que é de 79,4 m³/s). Quando comparado ao cenário com apenas mudanças climáticas (sem ondas de calor), o aumento também é notável: um acréscimo de 5,48 m³/s (6,58%) em relação à projeção padrão para 2045. Esses dados evidenciam a relevância de incorporar aspectos climáticos futuros nas estratégias de gestão e alocação de recursos hídricos.

Quadro 7-7 – Valores consolidados de demanda hídrica total no cenário de maior pressão, por unidade de planejamento

Cenário de demanda	Setor Usuário	Demandas hídricas totais (m³/s) por Unidade de Planejamento								
		1 - Alto Paraíba do Sul	2 - Rios Preto e Paraíbauna	3 - Rios Pomba e Muriaé	4 - Médio Paraíba do Sul	5 - Piabanha	6 - Rio Dois Rios	7 - Baixo Paraíba do Sul	8 - Sub-bacia do Rio Pirai	Total por Setor
Cena Atual	Abastecimento Urbano	6,44	1,83	2,01	3,14	1,05	0,69	2,38	0,28	17,81
	Abastecimento Rural	0,32	0,1	0,22	0,08	0,15	0,08	0,23	0,02	1,2
	Dessedentação Animal	0,59	0,3	0,75	0,32	0,11	0,26	0,81	0,05	3,2
	Irrigação	4,82	0,14	1,55	0,3	0,92	0,46	2,41	0,02	10,63
	Indústria	5,99	0,25	0,64	4,68	0,38	0,08	0,63	0,13	12,79
	Mineração	9,63	1,31	0,61	0,52	0,15	0,14	0,47	0,01	12,83
	Termoeletricidade	2,71	0,37	0,25	0,46	0,16	0,13	0,49	0	4,57
	Total por UP	30,5	4,29	6,02	9,51	2,92	1,84	7,42	0,51	63,02
Cena de Maior Pressão (2045)	Abastecimento Urbano	5,58	1,65	2,04	2,15	0,83	0,61	1,55	0,27	14,68
	Abastecimento Rural	0,42	0,07	0,17	0,09	0,21	0,11	0,28	0,02	1,36
	Dessedentação Animal	1,07	0,55	1,54	0,56	0,19	0,44	1,21	0,09	5,65
	Irrigação	7,75	0,39	4,32	0,42	1,67	0,73	5,25	0,03	20,55
	Indústria	7,18	0,31	0,78	5,44	0,49	0,1	0,69	0,17	15,17
	Mineração	12,07	1,61	0,76	0,63	0,17	0,16	0,54	0,01	15,94
	Termoeletricidade	2,82	0,37	0,25	0,46	0,16	0,13	1,85	0	6,04
Progressão Padrão	Total por UP	36,89	4,93	9,85	9,76	3,72	2,29	11,37	0,59	79,4
Cena de Maior Pressão (2045)	Abastecimento Urbano	5,74	1,69	2,11	2,22	0,85	0,63	1,58	0,28	15,11
	Abastecimento Rural	0,43	0,06	0,17	0,08	0,21	0,11	0,28	0,02	1,38
	Dessedentação Animal	1,11	0,57	1,62	0,58	0,21	0,46	1,27	0,09	5,9
	Irrigação	9,12	0,39	4,95	0,55	2,34	0,73	5,7	0,03	23,81
	Indústria	7,18	0,31	0,78	5,44	0,49	0,1	0,69	0,17	15,17
	Mineração	12,07	1,61	0,76	0,63	0,17	0,16	0,54	0,01	15,94
	Termoeletricidade	2,82	0,37	0,25	0,46	0,16	0,13	1,85	0	6,04
Mudanças Climáticas	Total por UP	38,47	5	10,64	9,96	4,43	2,32	11,91	0,6	83,35
Cena de Maior Pressão (2045)	Abastecimento Urbano	6,89	2,03	2,54	2,66	1,02	0,79	1,89	0,33	18,13
	Abastecimento Rural	0,51	0,07	0,2	0,1	0,26	0,13	0,33	0,02	1,66
	Dessedentação Animal	1,53	0,78	2,21	0,8	0,29	0,63	1,73	0,13	8,08
	Irrigação	9,12	0,39	4,95	0,55	2,34	0,73	5,7	0,03	23,81
	Indústria	7,18	0,31	0,78	5,44	0,49	0,1	0,69	0,17	15,17
	Mineração	12,07	1,61	0,76	0,63	0,17	0,16	0,54	0,01	15,94
	Termoeletricidade	2,82	0,37	0,25	0,46	0,16	0,13	1,85	0	6,04
Mudanças Climáticas e Ondas de Calor	Total por UP	40,12	5,56	11,69	10,64	4,73	2,67	12,73	0,69	88,83

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 7-8 – Valores consolidados de demanda hídrica superficial no cenário de maior pressão, por unidade de planejamento

Cenário de demanda	Setor Usuário	Demandas hídricas superficiais (m³/s) por Unidade de Planejamento								Total por Setor
		1 - Alto Paraíba do Sul	2 - Rios Preto e Paraíbauna	3 - Rios Pomba e Muriaé	4 - Médio Paraíba do Sul	5 - Piabanha	6 - Rio Dois Rios	7 - Baixo Paraíba do Sul	8 - Sub-bacia do Rio Pirai	
Cena Atual	Abastecimento Urbano	5,63	1,74	1,76	3,12	0,99	0,69	2,20	0,27	16,40
	Abastecimento Rural	0,09	0,04	0,00	0,04	0,06	0,05	0,14	0,02	0,44
	Dessedentação Animal	0,43	0,05	0,49	0,32	0,05	0,26	0,60	0,05	2,26
	Irrigação	4,78	0,14	1,48	0,30	0,92	0,43	2,38	0,02	10,44
	Indústria	3,00	0,21	0,46	4,57	0,21	0,06	0,57	0,13	9,20
	Mineração	3,52	1,31	0,61	0,52	0,14	0,14	0,47	0,01	6,71
	Termoeletricidade	2,71	0,37	0,25	0,46	0,16	0,13	0,49	0,00	4,57
	Total por UP	20,16	3,89	5,07	9,30	2,55	1,78	6,84	0,50	50,07
Cena de Maior Pressão (2045)	Abastecimento Urbano	4,79	1,55	1,78	2,14	0,79	0,60	1,42	0,26	13,33
	Abastecimento Rural	0,12	0,02	0,00	0,04	0,08	0,07	0,17	0,02	0,53
	Dessedentação Animal	0,77	0,09	1,00	0,56	0,09	0,44	0,90	0,09	3,93
	Irrigação	7,68	0,37	4,11	0,42	1,67	0,68	5,18	0,03	20,14
	Indústria	3,61	0,26	0,55	5,28	0,27	0,07	0,63	0,17	10,85
	Mineração	4,40	1,60	0,76	0,63	0,17	0,16	0,54	0,01	8,27
	Termoeletricidade	2,82	0,37	0,25	0,46	0,16	0,13	1,85	0,00	6,04
Progressão Padrão	Total por UP	24,21	4,30	8,47	9,50	3,25	2,17	10,68	0,58	63,15
Cena de Maior Pressão (2045)	Abastecimento Urbano	4,93	1,59	1,83	2,20	0,81	0,62	1,46	0,27	13,71
	Abastecimento Rural	0,12	0,02	0,00	0,04	0,08	0,07	0,17	0,02	0,54
	Dessedentação Animal	0,80	0,09	1,05	0,58	0,10	0,46	0,94	0,09	4,10
	Irrigação	9,04	0,38	4,71	0,55	2,34	0,68	5,61	0,03	23,34
	Indústria	3,61	0,26	0,55	5,28	0,27	0,07	0,63	0,17	10,85
	Mineração	4,40	1,60	0,76	0,63	0,17	0,16	0,54	0,01	8,27
	Termoeletricidade	2,82	0,37	0,25	0,46	0,16	0,13	1,85	0,00	6,04
Mudanças Climáticas	Total por UP	25,74	4,35	9,17	9,71	3,95	2,21	11,19	0,59	66,90
Cena de Maior Pressão (2045)	Abastecimento Urbano	5,92	1,91	2,20	2,64	0,97	0,74	1,75	0,32	16,45
	Abastecimento Rural	0,14	0,02	0,00	0,05	0,10	0,08	0,20	0,02	0,64
	Dessedentação Animal	1,10	0,12	1,43	0,80	0,14	0,63	1,28	0,13	5,62
	Irrigação	9,04	0,38	4,71	0,55	2,34	0,68	5,61	0,03	23,34
	Indústria	3,61	0,26	0,55	5,28	0,27	0,07	0,63	0,17	10,85
	Mineração	4,40	1,60	0,76	0,63	0,17	0,16	0,54	0,01	8,27
	Termoeletricidade	2,82	0,37	0,25	0,46	0,16	0,13	1,85	0,00	6,04
Mudanças Climáticas e Ondas de Calor	Total por UP	27,05	4,70	9,92	10,38	4,17	2,51	11,85	0,68	71,27

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 7-9 – Valores consolidados de demanda hídrica subterrânea no cenário de maior pressão, por unidade de planejamento

Cenário de demanda	Setor Usuário	Demandas hídricas subterrâneas (m³/s) por Unidade de Planejamento								Total por Setor
		1 - Alto Paraíba do Sul	2 - Rios Preto e Paraibuna	3 - Rios Pomba e Muriaé	4 - Médio Paraíba do Sul	5 - Piabanha	6 - Rio Dois Rios	7 - Baixo Paraíba do Sul	8 - Sub-bacia do Rio Pirai	
Cena Atual	Abastecimento Urbano	0,81	0,09	0,25	0,02	0,05	0,01	0,17	0,01	1,41
	Abastecimento Rural	0,23	0,06	0,21	0,04	0,09	0,03	0,09	0,00	0,76
	Dessedentação Animal	0,17	0,25	0,26	0,00	0,06	0,00	0,21	0,00	0,95
	Irrigação	0,05	0,00	0,08	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00	0,19
	Indústria	3,00	0,03	0,18	0,11	0,18	0,03	0,06	0,00	3,58
	Mineração	6,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,12
	Total por UP	10,35	0,45	0,98	0,17	0,39	0,09	0,57	0,01	13,01
Cena de Maior Pressão (2045)	Abastecimento Urbano	0,79	0,10	0,27	0,02	0,04	0,01	0,12	0,01	1,36
	Abastecimento Rural	0,30	0,04	0,17	0,04	0,13	0,04	0,11	0,00	0,83
	Dessedentação Animal	0,30	0,46	0,54	0,00	0,10	0,00	0,31	0,00	1,71
	Irrigação	0,07	0,01	0,21	0,00	0,00	0,05	0,07	0,00	0,42
	Indústria	3,57	0,04	0,22	0,16	0,23	0,03	0,07	0,00	4,32
	Mineração	7,67	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	7,68
	Total por UP	12,70	0,65	1,41	0,22	0,51	0,13	0,68	0,01	16,31
Cena de Maior Pressão (2045) Mudanças Climáticas	Abastecimento Urbano	0,81	0,10	0,28	0,02	0,04	0,01	0,12	0,01	1,40
	Abastecimento Rural	0,31	0,04	0,17	0,04	0,13	0,04	0,11	0,00	0,85
	Dessedentação Animal	0,31	0,48	0,57	0,00	0,11	0,00	0,33	0,00	1,80
	Irrigação	0,08	0,01	0,24	0,00	0,00	0,05	0,09	0,00	0,47
	Indústria	3,57	0,04	0,22	0,16	0,23	0,03	0,07	0,00	4,32
	Mineração	7,67	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	7,68
	Total por UP	12,75	0,67	1,48	0,22	0,52	0,13	0,72	0,01	16,52
Cena de Maior Pressão (2045) Mudanças Climáticas e Ondas de Calor	Abastecimento Urbano	0,97	0,12	0,34	0,02	0,05	0,05	0,14	0,01	1,68
	Abastecimento Rural	0,37	0,05	0,20	0,05	0,16	0,05	0,13	0,00	1,02
	Dessedentação Animal	0,43	0,66	0,78	0,00	0,15	0,00	0,45	0,00	2,46
	Irrigação	0,08	0,01	0,24	0,00	0,00	0,05	0,09	0,00	0,47
	Indústria	3,57	0,04	0,22	0,16	0,23	0,03	0,07	0,00	4,32
	Mineração	7,67	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	7,68
	Total por UP	13,09	0,88	1,78	0,23	0,60	0,18	0,88	0,01	17,63

Fonte: elaborado pelo Consórcio

7.4. BALANÇO HÍDRICO QUALITATIVO

O balanço hídrico qualitativo da BHPS está sendo desenvolvido pelo Estudo de Enquadramento das águas pela empresa Água e Solo. Os relatórios já publicados deste estudo estão disponíveis para consulta pública em <https://www.ceivap.org.br/instrumentos-de-gestao/enquadramento> (CEIVAP, 2025). Apesar de não estar incluído no escopo do presente estudo cenários de balanço hídrico qualitativo em contexto de mudança climática, deve-se destacar que o aumento da temperatura das águas é primeiro impacto esperado em função da mudança do clima (AdaptaClima, 2025).

Segundo o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (BRASIL, 2016), o aumento de temperatura ocasiona uma alteração nos processos químicos e biológicos, afetando a qualidade das águas. Com isso, um dos principais impactos é a redução nas concentrações de oxigênio dissolvido, interferindo na capacidade de autodepuração dos corpos d'água e na sua capacidade de manter a biodiversidade aquática. Ainda, a redução na disponibilidade hídrica também impacta a qualidade das águas uma vez que ocorre a diminuição da capacidade de diluição de cargas poluentes. O aumento da duração e intensidade das chuvas, por sua vez, pode acarretar em maior transporte de sedimentos, nutrientes e agrotóxicos.

De acordo com o estudo de Van Vliet *et al.* (2023), que fizeram uma revisão de literatura a respeito da qualidade da água dos rios sob mudanças climáticas e extremos hidroclimáticos, a qualidade da água piora em 68 % dos casos durante secas e ondas de calor, em 51 % durante eventos de chuva/intensificação de correntes, e em 56 % sob mudanças climáticas de longo prazo.

O resultado dessas alterações pode aumentar os custos de tratamento de águas destinadas ao abastecimento doméstico e ao uso industrial, além de afetar a viabilidade de uso para irrigação, reduzir a biodiversidade aquática e a pesca, aumentar a incidência de doenças de veiculação hídrica e ocasionar a perda de valores turísticos e paisagísticos (AdaptaClima, 2025; BRASIL, 2016).

7.5. BALANÇO HÍDRICO QUANTITATIVO

7.5.1. Balanço Hídrico Superficial

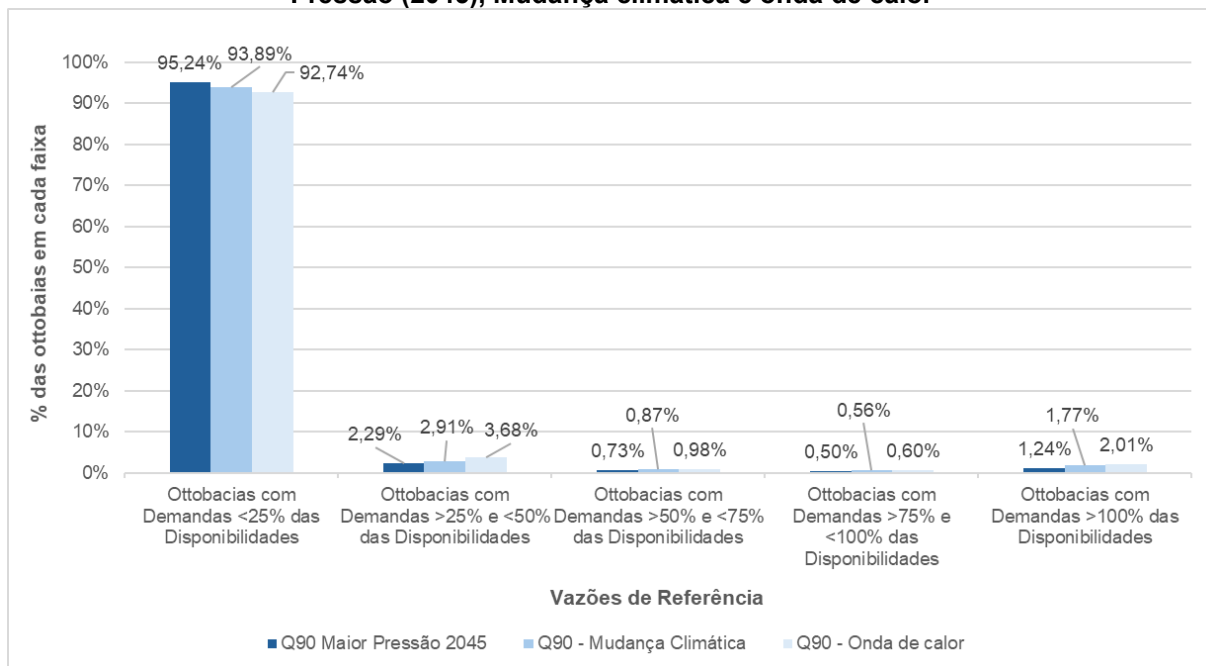
Análise geral da BHPS

A Figura 7-3, a Figura 7-4 e a Figura 7-5 apresentam o percentual de otobacias em cada faixa de Balanço Hídrico, fazendo a comparação entre os resultados de balanço hídrico anual da cena de maior pressão (2045) e os cenários de mudança climática e de onda de calor, obtidos para as três vazões de referência. Dentre as principais alterações em relação à cena de maior pressão (2045), citam-se a diminuição da disponibilidade e o incremento das demandas, naturalmente ocasionando uma diminuição do conforto hídrico na bacia como um todo.

Observa-se um aumento constante no nível de criticidade em relação aos cenários de mudanças climáticas e onda de calor, sendo o último mais crítico. Neste cenário, o percentual de otobacias fora da faixa de conforto hídrico (demandas menores que 25% da disponibilidade) é de cerca de 7% para a Q_{90} , 10% para a Q_{95} e 15% para a $Q_{7,10}$. Apesar de grande parte da bacia do rio Paraíba do Sul se encontrar em conforto hídrico, o aumento progressivo da criticidade nos cenários de mudanças climáticas e ondas de calor deve ter atenção e planejamento de ações para ser evitado.

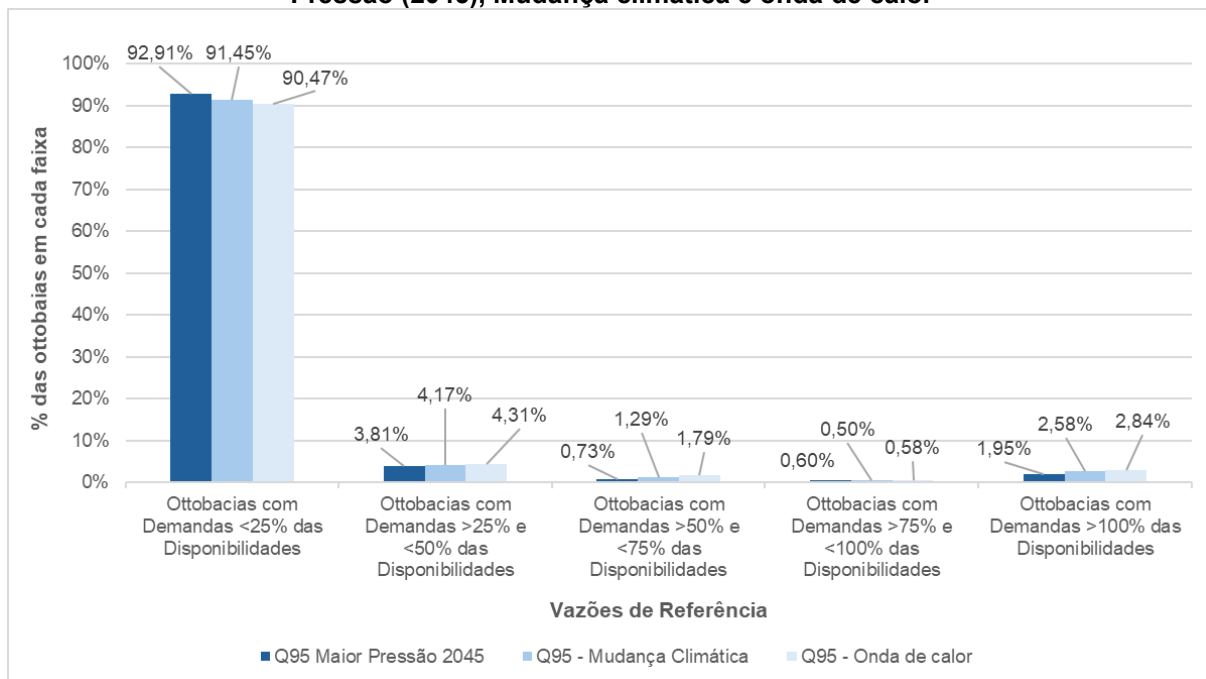
Dentre as vazões de referência, a $Q_{7,10}$ apresenta o maior nível de criticidade relativa, com aumentos principalmente nas faixas mais críticas (maior que 75% de comprometimento e déficit) em comparação às demais. Destaca-se principalmente a faixa de déficit hídrico, que atinge 4,8% das otobacias no cenário de mudança climática e 5,9% para onda de calor, aumentos de 35% e 66% em relação ao cenário de maior pressão 2045, respectivamente. Esses saltos significativos em termos percentuais podem indicar áreas com potencial risco de escassez e conflitos de uso, muitas vezes em localidades já sinalizadas como críticas nas cenas atuais. Em síntese, o aumento da criticidade nos balanços hídricos aponta para a urgência de estratégias de gestão mais resilientes e adaptativas às mudanças climáticas, capazes de mitigar déficits e garantir a sustentabilidade dos múltiplos usos da água.

Figura 7-3 – Percentual de ottobacias em cada faixa de Balanço Hídrico, Q₉₀ – Cenário de Maior Pressão (2045), Mudança climática e onda de calor



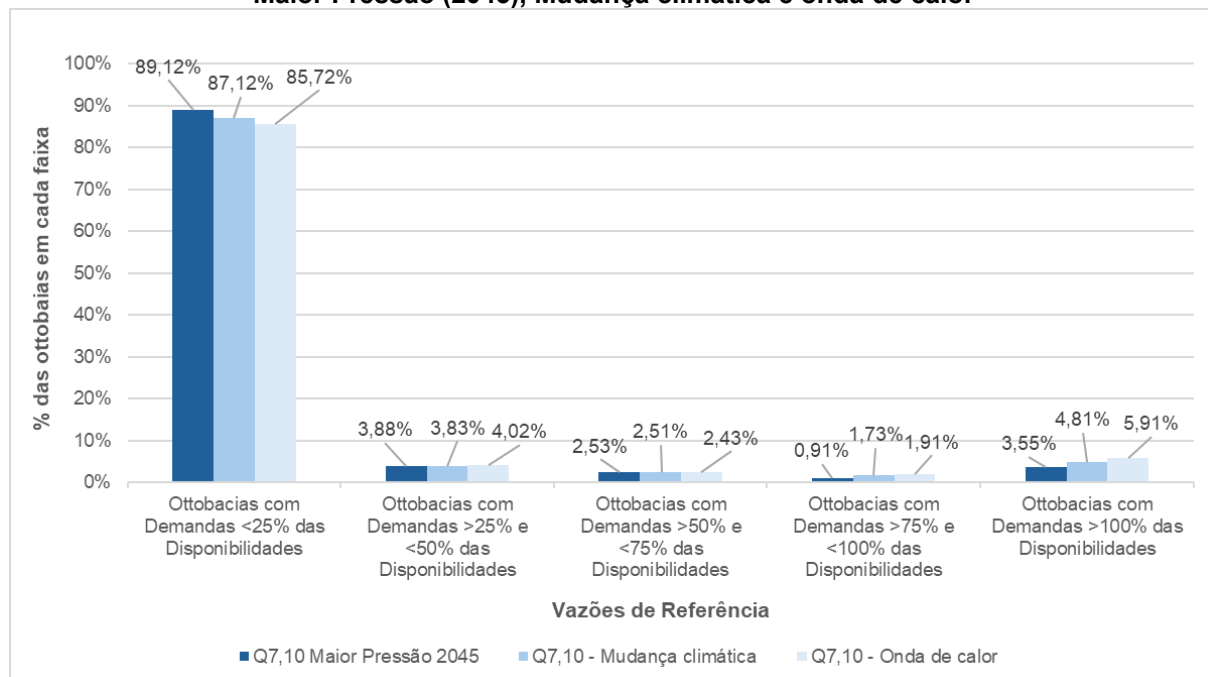
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 7-4 – Percentual de ottobacias em cada faixa de Balanço Hídrico, Q₉₅ – Cenário de Maior Pressão (2045), Mudança climática e onda de calor



Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 7-5 – Percentual de ottobacias em cada faixa de Balanço Hídrico, Q_{7,10} – Cenário de Maior Pressão (2045), Mudança climática e onda de calor



Fonte: elaborado pelo Consórcio

A seguir, da Figura 7-6 até a Figura 7-8 são apresentados os resultados espacializados de balanço hídrico anual no cenário de mudanças climáticas para as vazões Q₉₀, Q₉₅ e Q_{7,10}, respectivamente. Nota-se que as regiões com altos índices de comprometimento possuem pouca variação entre as diferentes vazões de referência, alterando basicamente sua intensidade e extensão.

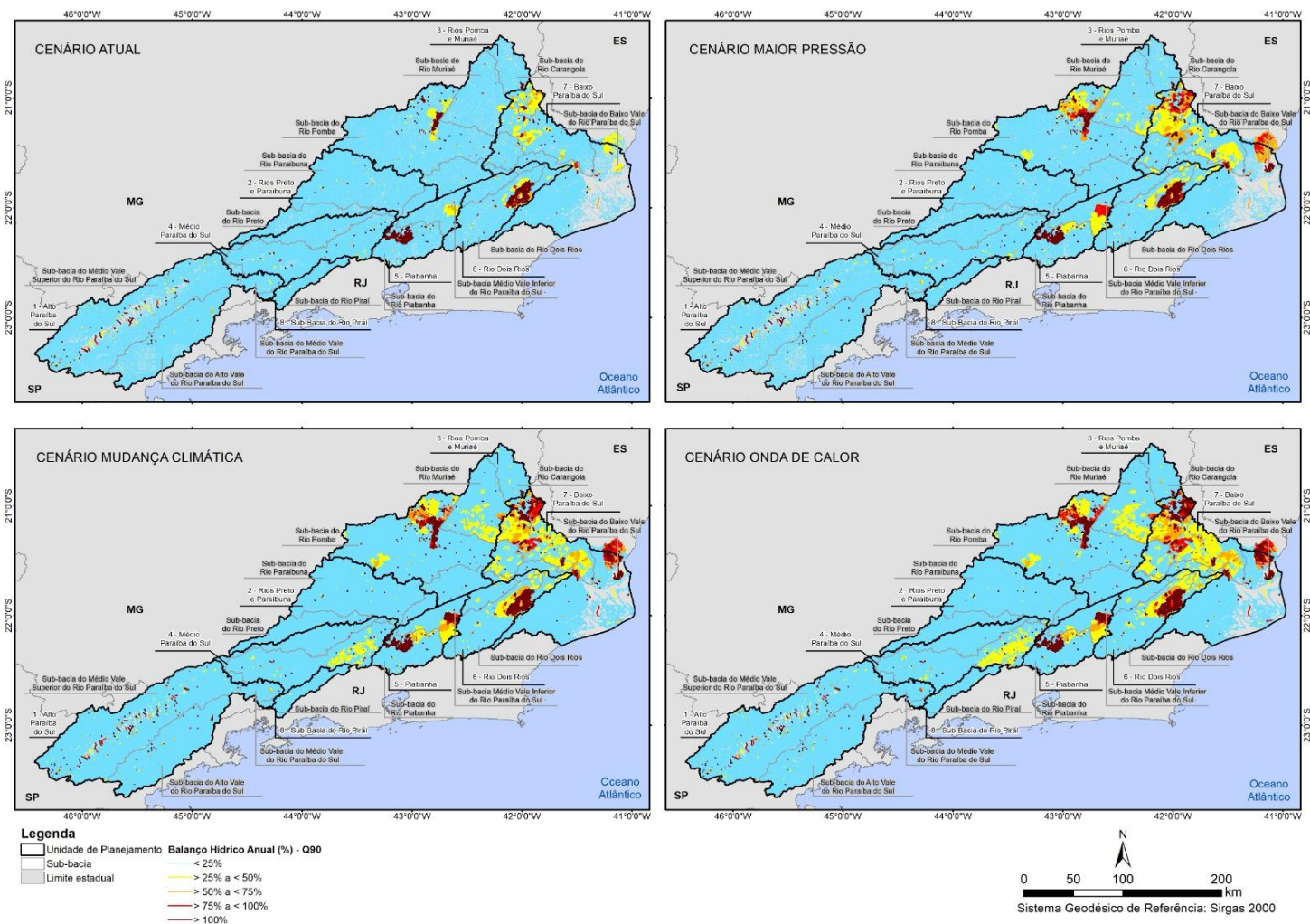
Especificamente para as UPs Piabanha e Dois Rios, cabe lembrar dos resultados do balanço hídrico para a cena atual já apresentados no Produto 4, que mostravam uma condição bastante crítica em determinados trechos. Nesses casos, foi feita análise específica, identificando que podem estar relacionados aos baixos valores de disponibilidade hídrica advinda do Estudo de Disponibilidade Hídrica (EDH). Assim, devido aos baixos valores de vazão de referência nas bacias em questão, relacionados aos reduzidos rendimentos específicos identificados para as vazões de referência adotadas para a região, os balanços hídricos já se mostravam críticos para a cena atual, mesmo com valores reduzidos de demanda

Assim, para os cenários futuros de mudanças climáticas, é natural que tal criticidade seja apresentada ainda mais evidente. Dessa forma, deve-se ressaltar que tais UPs já partem de

um quadro de balanços críticos em determinadas regiões na cena de Maior Pressão 2045⁵, fato que é agravado nos cenários de mudança climática por conta dos aumentos de demandas (entre elas, destaca-se a irrigação) e reduções de disponibilidades. No Piabanha, sob Q_{95} , nota-se uma manutenção relativa em praticamente todas as faixas, exceto entre 25%-50% e 50%-75%, havendo um deslocamento da primeira para a segunda. Na $Q_{7,10}$, há uma diminuição significativa na faixa de maior conforto hídrico e um aumento nas faixas mais críticas. Para a bacia do rio Dois Rios, tanto na Q_{95} quanto na $Q_{7,10}$ há um aumento distribuído entre todas as faixas, com a diminuição da parcela de ottobacias em conforto hídrico. Ressalta-se que tal UP possui o maior índice de criticidade na cena de maior pressão 2045, havendo a manutenção dessa relação para o cenário de mudanças climáticas.

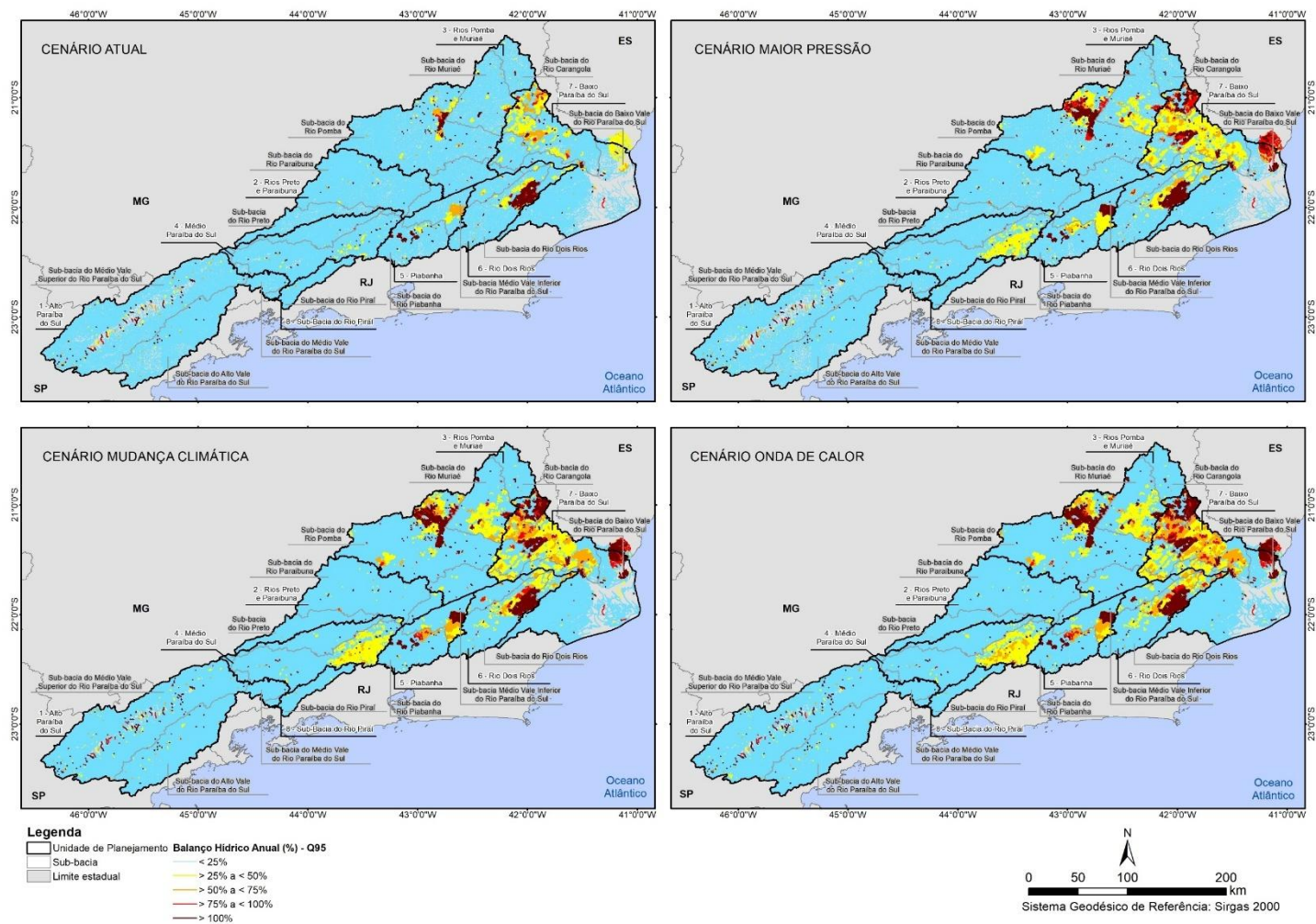
⁵ Conforme mencionado no Produto 04, grande parte dos trechos críticos ocorre em ottotrechos de primeira ordem, com disponibilidades hídricas ínfimas

Figura 7-6 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q₉₀, Mudanças climáticas – Bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul



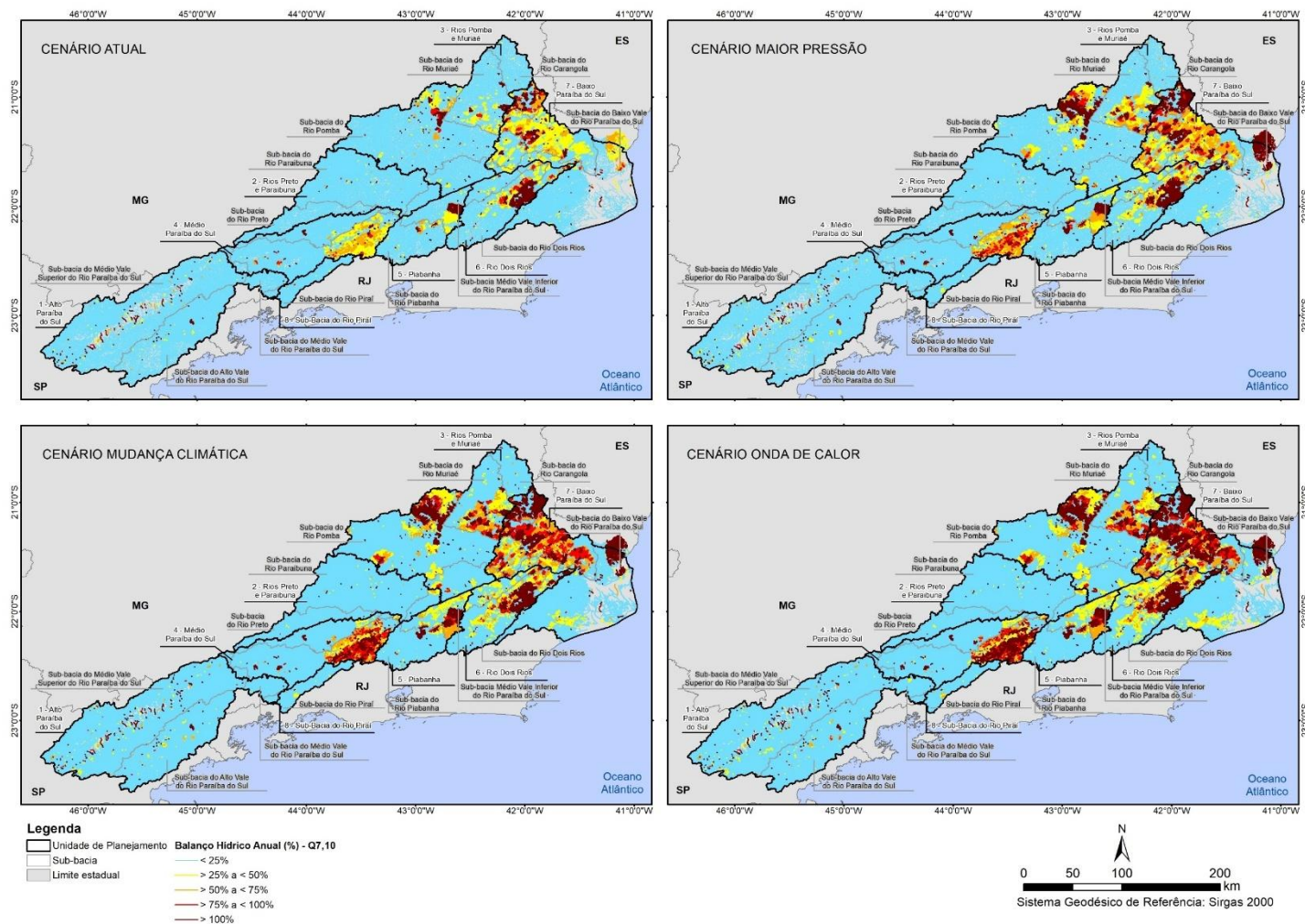
Fonte: elaborado pelo Consórcio.

Figura 7-7 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q₉₅, Mudanças climáticas – Bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul



Fonte: elaborado pelo Consórcio.

Figura 7-8 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q_{7,10}, Mudanças climáticas – Bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul



Fonte: elaborado pelo Consórcio

Análise dos resultados por Unidade de Planejamento

A seguir são apresentados os resultados da distribuição percentual das ottobacias por classes de comprometimento hídrico em cada Unidade de Planejamento, sendo o Quadro 7-10 e o Quadro 7-11 referentes à Q_{90} , o Quadro 7-12 e o Quadro 7-13 relacionados à Q_{95} e o Quadro 7-14 e o Quadro 7-15 tratando da $Q_{7,10}$. São indicados nos quadros o cenário de maior pressão 2045, assim como os cenários de mudanças climáticas e ondas de calor, permitindo uma comparação evolutiva do nível de criticidade em cada situação. Os resultados espacializados são apresentados da Figura 7-9 até a Figura 7-19, distribuídos por Unidade de Planejamento.

As Unidades de Planejamento Alto Paraíba do Sul, Rios Preto e Paraibuna e a sub-bacia do rio Piraí permanecem, em todos os cenários simulados, com a maior parte de suas ottobacias na faixa de conforto hídrico, e apresentam variações mínimas de criticidade nos quadros de mudança climática e de onda de calor. Essa estabilidade evidencia elevada resiliência hidrológica, associada a relações favoráveis entre disponibilidade e demanda e à presença de reservatórios que atenuam oscilações de vazão.

No Médio Paraíba do Sul, o comportamento difere conforme a vazão de referência. Na Q_{95} observam-se ganhos progressivos nas faixas intermediárias sem, contudo, elevar substancialmente a participação de ottobacias nas faixas mais críticas. Contudo, em relação à $Q_{7,10}$, o acréscimo de comprometimento desloca-se para os intervalos superiores a 75 % de balanço hídrico, refletindo vulnerabilidade em episódios de maior escassez hídrica. A UP dos rios Pomba e Muriaé, por sua vez, mostra crescimento distribuído em praticamente todas as faixas de comprometimento, mantendo percentuais intermediários de ottobacias em déficit e sinalizando pressão constante, ainda que menos concentrada.

As UPs Piabanha e Rio Dois Rios, que já partem de quadro crítico na cena de Maior Pressão 2045 apresentam comportamentos distintos. No Piabanha, sob Q_{95} , nota-se uma manutenção relativa em praticamente todas as faixas, exceto entre 25%-50% e 50%-75%, havendo um deslocamento da primeira para a segunda. Na $Q_{7,10}$, há uma diminuição significativa na faixa de maior conforto hídrico e um aumento nas faixas mais críticas. Para a bacia do Rio Dois Rios, tanto na Q_{95} quanto na $Q_{7,10}$ há um aumento distribuído entre todas as faixas, com a diminuição da parcela de ottobacias em conforto hídrico. Ressalta-se que tal UP possui o maior índice de criticidade na cena de maior pressão 2045, havendo a manutenção dessa relação para o cenário de mudanças climáticas.

Especificamente para as UPs Piabanha e Dois Rios, cabe lembrar dos comentários apresentados no balanço hídrico realizado no Produto 4, que mostravam uma condição bastante crítica em determinados trechos. Nesses casos, foi feita análise específica,

identificando que podem estar relacionados aos baixos valores de disponibilidade hídrica advinda do Estudo de Disponibilidade Hídrica (EDH). Assim, devido aos baixos rendimentos específicos identificados para as vazões de referência adotadas para a região, os balanços hídricos se mostram críticos, mesmo com valores reduzidos de demandas.

Por fim, o Baixo Paraíba do Sul demonstra alta sensibilidade em relação à disponibilidade-demanda, o que pode ser observado pela alta variação (e aumento) entre os valores das faixas mais críticas no cenário de mudanças climáticas: para a Q_{90} , apresenta cerca de 3% das ottobacias em déficit, enquanto para a vazão $Q_{7,10}$ este valor salta para 12,3%. Apesar de representar um evento passageiro, no cenário de onda de calor (especificamente na $Q_{7,10}$) tal UP possui o maior percentual em déficit hídrico de toda a bacia: 16%, indicando a alta suscetibilidade dessa região a condições extremas.

Em síntese, a comparação mostra que, embora a bacia ainda apresente boa parcela de áreas em conforto hídrico, o aumento da quantidade de ottobacias em faixas de comprometimento mais altas é claro e consistente ao incluir os efeitos das mudanças climáticas no balanço hídrico. Logo, é necessário o planejamento de medidas adaptativas — sejam estruturais ou não-estruturais — já que o aumento constante de criticidade e déficits hídricos tende a ocasionar o aumento dos conflitos de uso da água, assim como consequências socioeconômicas.

Após as tabelas indicando os percentuais em cada UP, são apresentados os resultados espacializados, sendo apresentados em todas as UPs para a vazão de referência Q_{95} , pois trata-se da vazão de referência utilizada pela ANA. Além disso, nas UPs que possuem como vazão de referência a $Q_{7,10}$ (Alto Paraíba do Sul, Preto e Paraibuna e Pomba e Muriaé), também são apresentados tais resultados.

Observa-se um agravamento dos desequilíbrios já identificados na cena de Maior Pressão 2045: ottobacias que apresentavam sinais de instabilidade evoluem para níveis mais elevados de comprometimento no cenário de mudança climática. Além disso, há o surgimento de pontos esporádicos com criticidade variada, assim como o surgimento dos seguintes focos: balanços na faixa 25%-50% na UP Rio Pomba e Muriaé para vazão Q_{95} nas proximidades do município de Santo Antônio do Aventureiro e nos afluentes do rio Novo (entre os municípios de Descoberto e Itamarati de Minas), e para a vazão $Q_{7,10}$ no rio Pardo (proximidades do município de Argirita); no Baixo Paraíba do Sul, o córrego Bom Jardim apresenta igual faixa de comprometimento em suas regiões mais a montante.

Com o intuito de amenizar os resultados críticos observados nesse cenário de mudanças climáticas, é imprescindível a adoção de medidas de curto e médio prazo que combinem

medidas estruturais e não-estruturais. Os resultados obtidos, tanto para a cena atual, cena futura e cena de mudanças climáticas sinalizam as regiões prioritárias e, portanto, oferecem subsídios para a implementação de ações de gestão hídrica direcionadas.

Quadro 7-10 – Percentual de ottobacias em cada faixa de Balanço Hídrico, Q₉₀ - Cenário de maior pressão (2045), mudanças climáticas e onda de calor – Alto Paraíba do Sul, Rios Preto e Paraibuna, Pomba e Muriaé e Médio Paraíba do Sul

Faixas de Balanço Hídrico	Unidades de Planejamento											
	Alto Paraíba do Sul			Rios Preto e Paraibuna			Rios Pomba e Muriaé			Médio Paraíba do Sul		
	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor
Ottobacias com Demandas <25% das Disponibilidades	99,67%	99,65%	99,62%	99,92%	99,91%	99,91%	96,48%	95,01%	94,12%	99,64%	98,02%	96,43%
Ottobacias com Demandas >25% e <50% das Disponibilidades	0,09%	0,09%	0,11%	0,03%	0,04%	0,03%	1,70%	2,73%	3,32%	0,17%	1,77%	3,34%
Ottobacias com Demandas >50% e <75% das Disponibilidades	0,05%	0,06%	0,07%	0,00%	0,01%	0,01%	0,72%	0,75%	0,66%	0,03%	0,02%	0,04%
Ottobacias com Demandas >75% e <100% das Disponibilidades	0,04%	0,04%	0,04%	0,01%	0,01%	0,00%	0,29%	0,35%	0,60%	0,01%	0,03%	0,03%
Ottobacias com Demandas >100% das Disponibilidades	0,14%	0,16%	0,17%	0,04%	0,04%	0,05%	0,81%	1,17%	1,31%	0,15%	0,16%	0,17%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 7-11 – Percentual de ottobacias em cada faixa de Balanço Hídrico, Q_{90} - Cenário de maior pressão (2045), mudanças climáticas e onda de calor – Piabanha, Rio Dois Rios, Baixo Paraíba do Sul e Sub-bacia do rio Pirai

Faixas de Balanço Hídrico	Unidades de Planejamento											
	Piabanha			Rio Dois Rios			Baixo Paraíba do Sul			Sub-bacia do Rio Pirai		
	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor
Ottobacias com Demandas <25% das Disponibilidades	84,41%	81,71%	81,63%	87,56%	85,30%	82,64%	87,08%	83,68%	80,19%	99,94%	99,96%	99,94%
Ottobacias com Demandas >25% e <50% das Disponibilidades	7,60%	6,73%	6,59%	4,10%	5,13%	7,20%	7,17%	8,41%	10,38%	0,04%	0,04%	0,04%
Ottobacias com Demandas >50% e <75% das Disponibilidades	0,47%	2,61%	2,75%	1,07%	1,88%	2,04%	2,80%	2,51%	3,14%	0,02%	0,00%	0,02%
Ottobacias com Demandas >75% e <100% das Disponibilidades	2,30%	1,16%	1,17%	0,54%	0,50%	0,64%	1,63%	2,31%	2,13%	0,00%	0,00%	0,00%
Ottobacias com Demandas >100% das Disponibilidades	5,23%	7,79%	7,86%	6,73%	7,20%	7,47%	1,31%	3,08%	4,15%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 7-12 – Percentual de ottobacias em cada faixa de Balanço Hídrico, Q₉₅ - Cenário de maior pressão (2045), mudanças climáticas e onda de calor – Alto Paraíba do Sul, Rios Preto e Paraibuna, Pomba e Muriaé e Médio Paraíba do Sul

Faixas de Balanço Hídrico	Unidades de Planejamento											
	Alto Paraíba do Sul			Rios Preto e Paraibuna			Rios Pomba e Muriaé			Médio Paraíba do Sul		
	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor
Ottobacias com Demandas <25% das Disponibilidades	99,68%	99,65%	99,59%	99,87%	99,81%	99,77%	93,93%	92,16%	91,29%	96,05%	93,12%	91,85%
Ottobacias com Demandas >25% e <50% das Disponibilidades	0,10%	0,12%	0,15%	0,04%	0,10%	0,13%	3,18%	4,11%	4,53%	3,79%	6,57%	7,26%
Ottobacias com Demandas >50% e <75% das Disponibilidades	0,06%	0,05%	0,06%	0,02%	0,03%	0,02%	0,65%	0,93%	1,01%	0,04%	0,18%	0,73%
Ottobacias com Demandas >75% e <100% das Disponibilidades	0,03%	0,03%	0,03%	0,02%	0,01%	0,01%	0,70%	0,58%	0,50%	0,02%	0,02%	0,04%
Ottobacias com Demandas >100% das Disponibilidades	0,14%	0,16%	0,17%	0,04%	0,05%	0,07%	1,53%	2,22%	2,67%	0,10%	0,11%	0,13%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 7-13 – Percentual de ottobacias em cada faixa de Balanço Hídrico, Q_{95} - Cenário de maior pressão (2045), mudanças climáticas e onda de calor – Piabanha, Rio Dois Rios, Baixo Paraíba do Sul e Sub-bacia do rio Pirai

Faixas de Balanço Hídrico	Unidades de Planejamento											
	Piabanha			Rio Dois Rios			Baixo Paraíba do Sul			Sub-bacia do Rio Pirai		
	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor
Ottobacias com Demandas <25% das Disponibilidades	85,70%	84,41%	84,27%	83,73%	81,44%	78,52%	79,83%	76,66%	74,20%	99,94%	99,94%	99,94%
Ottobacias com Demandas >25% e <50% das Disponibilidades	8,23%	4,25%	4,27%	5,34%	6,56%	7,80%	11,43%	11,25%	10,45%	0,02%	0,04%	0,04%
Ottobacias com Demandas >50% e <75% das Disponibilidades	0,41%	5,25%	5,23%	1,84%	2,00%	2,72%	2,46%	3,90%	6,13%	0,04%	0,02%	0,02%
Ottobacias com Demandas >75% e <100% das Disponibilidades	0,08%	0,42%	0,54%	0,49%	1,03%	1,57%	2,45%	1,64%	1,90%	0,00%	0,00%	0,00%
Ottobacias com Demandas >100% das Disponibilidades	5,58%	5,66%	5,70%	8,59%	8,97%	9,39%	3,83%	6,55%	7,33%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 7-14 – Percentual de ottobacias em cada faixa de Balanço Hídrico, $Q_{7,10}$ - Cenário de maior pressão (2045), mudanças climáticas e onda de calor – Alto Paraíba do Sul, Rios Preto e Paraibuna, Pomba e Muriaé e Médio Paraíba do Sul

Faixas de Balanço Hídrico	Unidades de Planejamento											
	Alto Paraíba do Sul			Rios Preto e Paraibuna			Rios Pomba e Muriaé			Médio Paraíba do Sul		
	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor
Ottobacias com Demandas <25% das Disponibilidades	99,43%	99,35%	99,21%	99,37%	99,31%	99,30%	89,90%	87,25%	86,06%	88,53%	85,37%	83,70%
Ottobacias com Demandas >25% e <50% das Disponibilidades	0,24%	0,28%	0,35%	0,56%	0,48%	0,50%	4,42%	5,29%	5,45%	4,34%	4,01%	4,17%
Ottobacias com Demandas >50% e <75% das Disponibilidades	0,06%	0,08%	0,13%	0,01%	0,14%	0,13%	1,82%	2,03%	2,33%	4,49%	3,86%	3,13%
Ottobacias com Demandas >75% e <100% das Disponibilidades	0,04%	0,04%	0,05%	0,01%	0,01%	0,02%	0,89%	1,32%	1,57%	1,60%	3,86%	3,56%
Ottobacias com Demandas >100% das Disponibilidades	0,23%	0,25%	0,26%	0,05%	0,06%	0,06%	2,97%	4,11%	4,58%	1,04%	2,90%	5,44%

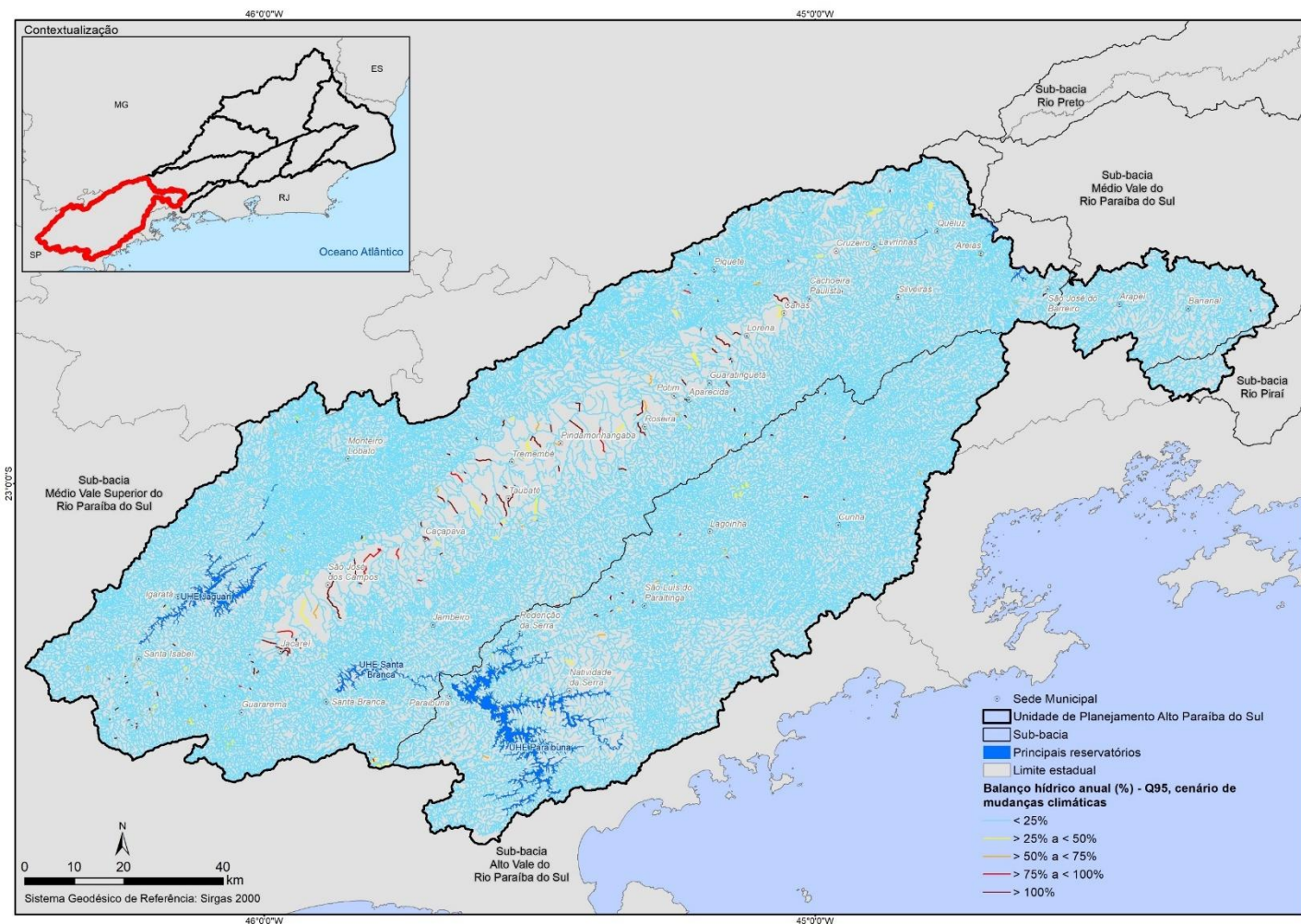
Fonte: elaborado pelo Consórcio.

Quadro 7-15 – Percentual de ottobacias em cada faixa de Balanço Hídrico, $Q_{7,10}$ - Cenário de maior pressão (2045), mudanças climáticas e onda de calor – Piabanha, Rio Dois Rios, Baixo Paraíba do Sul e Sub-bacia do rio Pirai.

Faixas de Balanço Hídrico	Unidades de Planejamento											
	Piabanha			Rio Dois Rios			Baixo Paraíba do Sul			Sub-bacia do Rio Pirai		
	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor	Maior Pressão-2045	Mudança climática	Onda de calor
Ottobacias com Demandas <25% das Disponibilidades	84,16%	79,06%	78,21%	76,28%	72,80%	68,25%	71,62%	68,25%	64,99%	99,48%	99,35%	99,12%
Ottobacias com Demandas >25% e <50% das Disponibilidades	5,43%	5,60%	6,19%	7,55%	8,94%	10,87%	9,15%	7,23%	6,87%	0,46%	0,62%	0,60%
Ottobacias com Demandas >50% e <75% das Disponibilidades	4,57%	3,78%	3,97%	2,68%	3,15%	4,03%	7,34%	7,28%	6,35%	0,02%	0,02%	0,27%
Ottobacias com Demandas >75% e <100% das Disponibilidades	0,51%	1,76%	1,81%	1,69%	1,67%	1,93%	2,35%	4,93%	5,75%	0,04%	0,00%	0,00%
Ottobacias com Demandas >100% das Disponibilidades	5,33%	9,81%	9,82%	11,81%	13,44%	14,92%	9,53%	12,31%	16,03%	0,00%	0,02%	0,02%

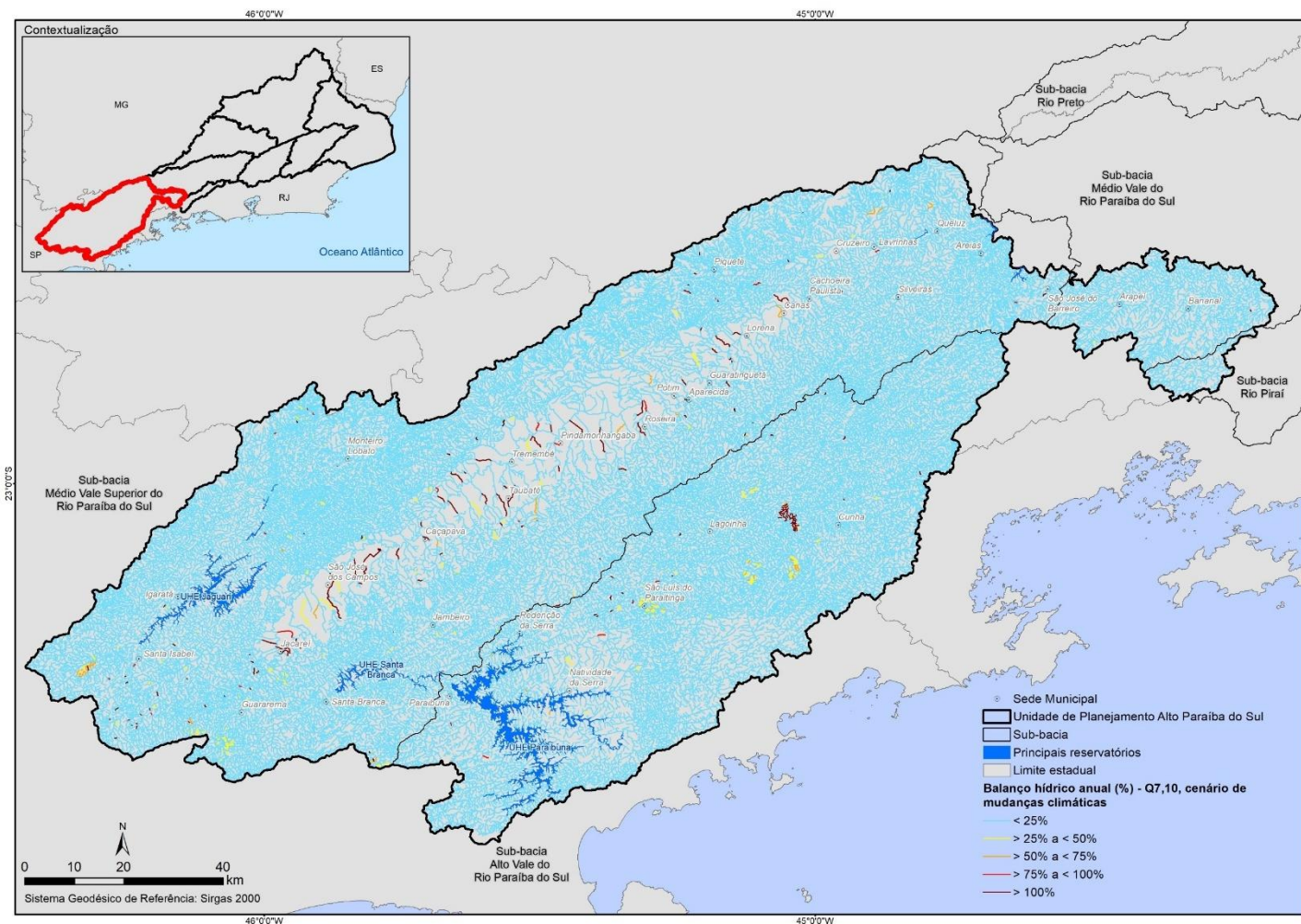
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 7-9 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q₉₅, mudanças climáticas – UP Alto Paraíba do Sul



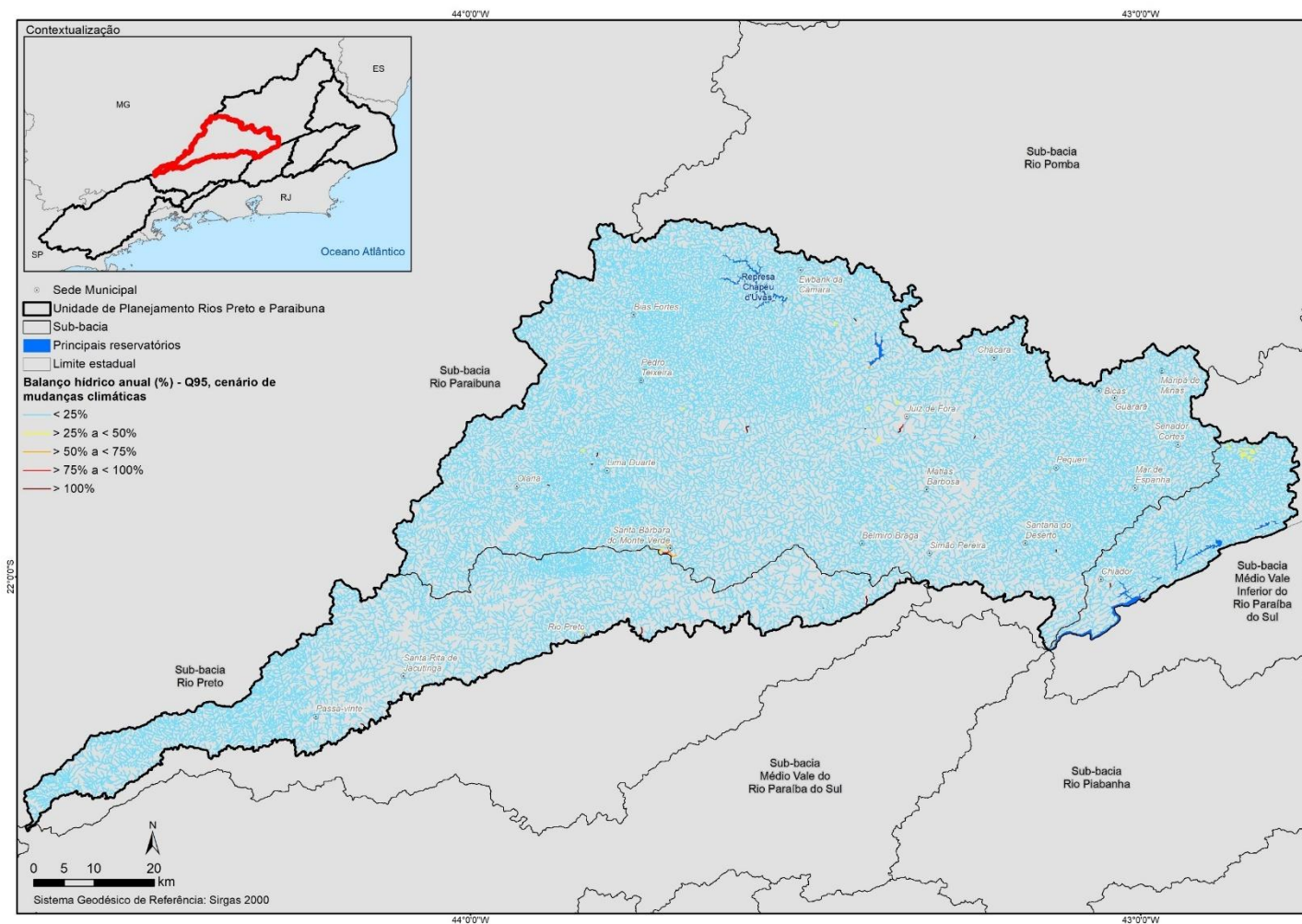
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 7-10 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q_{7,10}, mudanças climáticas – UP Alto Paraíba do Sul



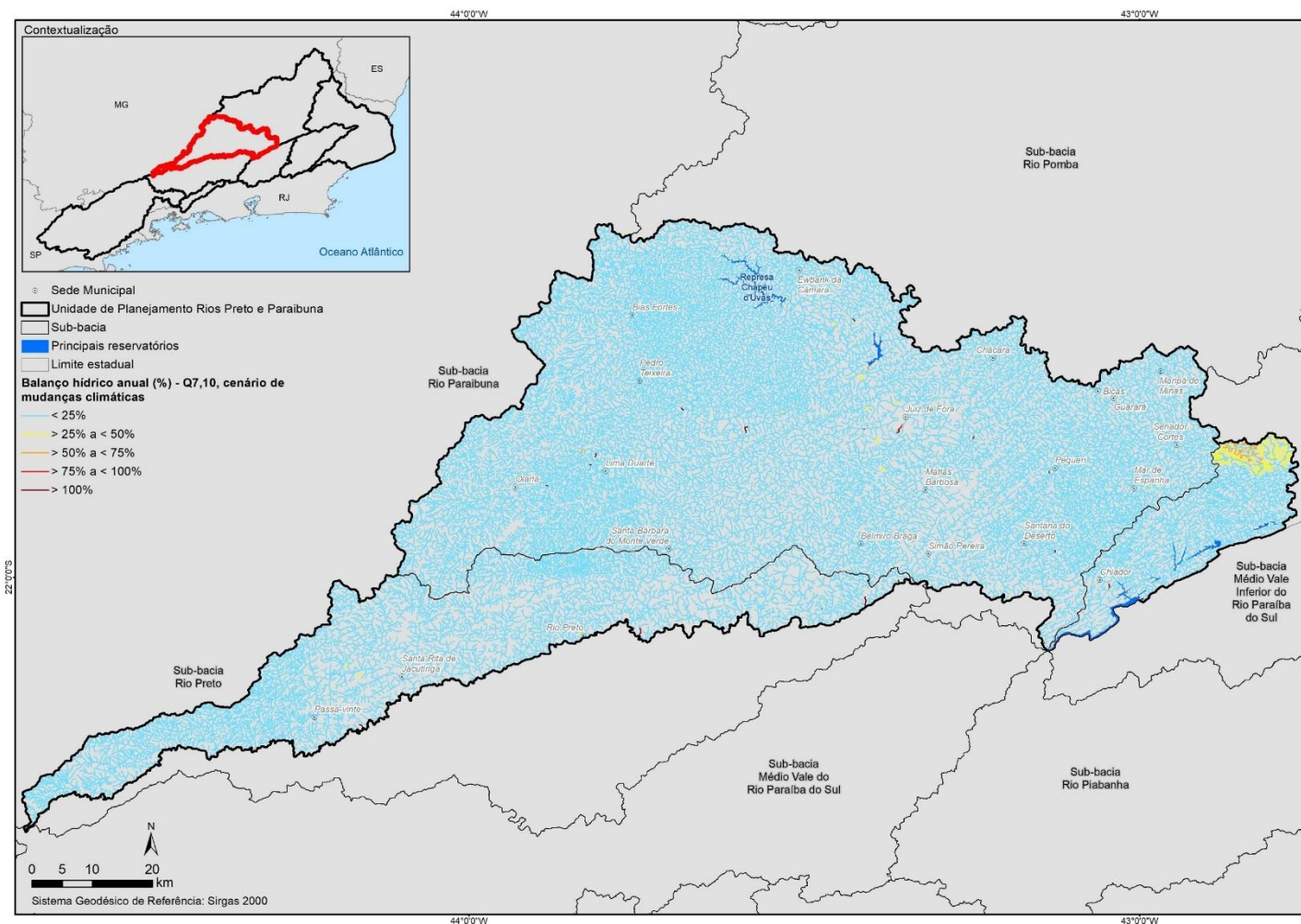
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 7-11 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q₉₅, mudanças climáticas – UP Preto e Paraíba



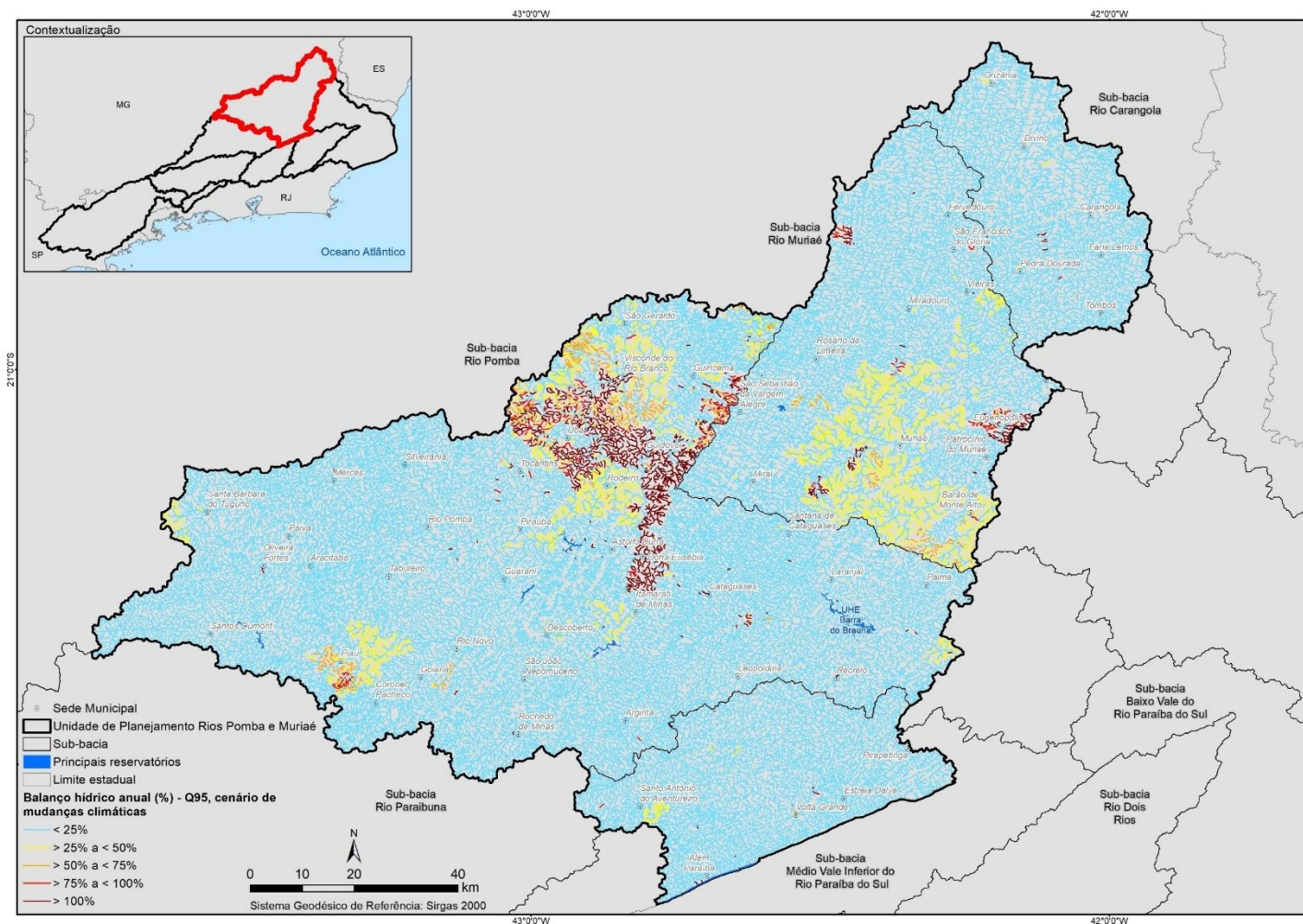
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 7-12 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q_{7,10}, mudanças climáticas – UP Preto e Paraíba



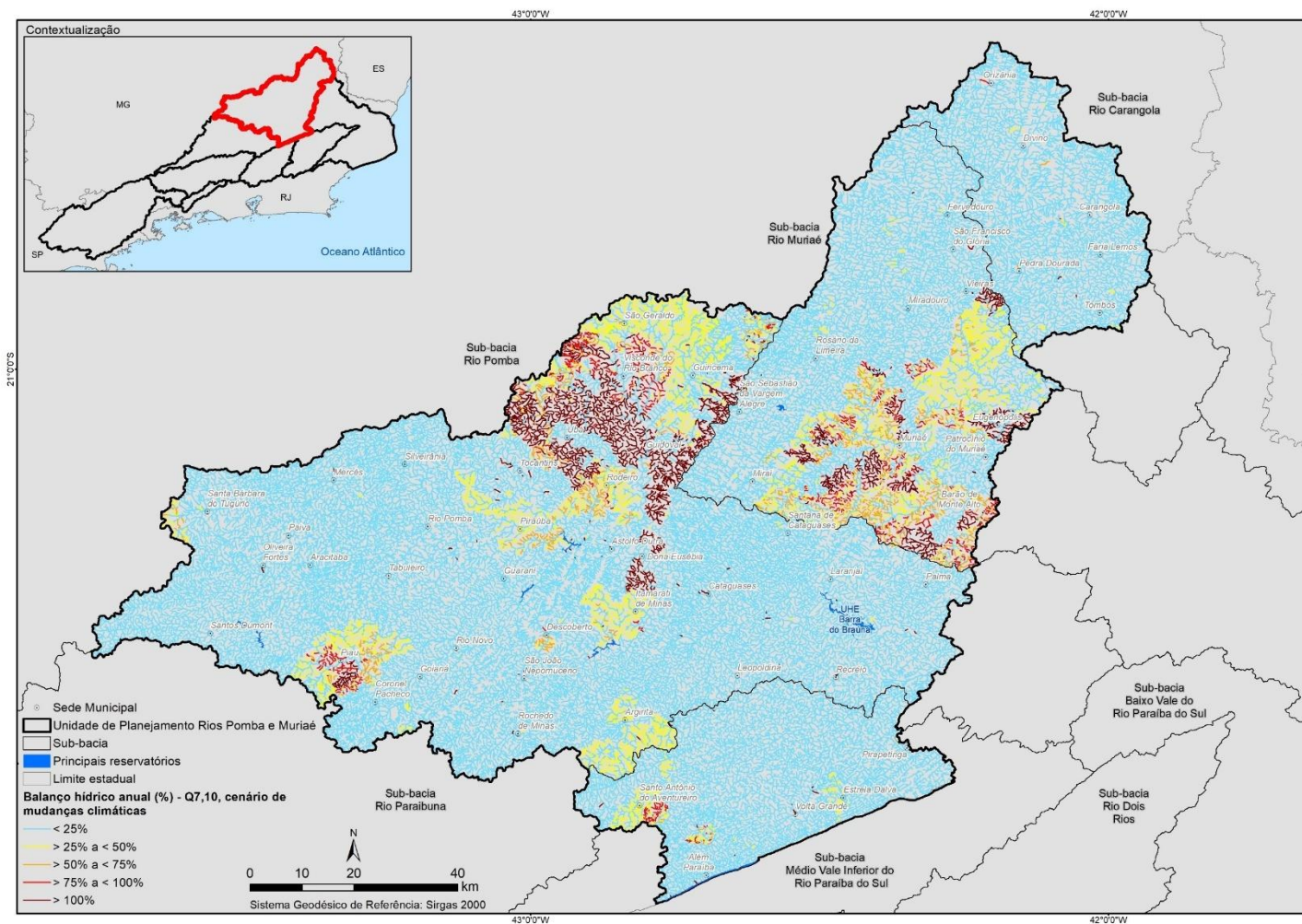
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 7-13 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q_{95} , mudanças climáticas – UP Pomba e Muriaé



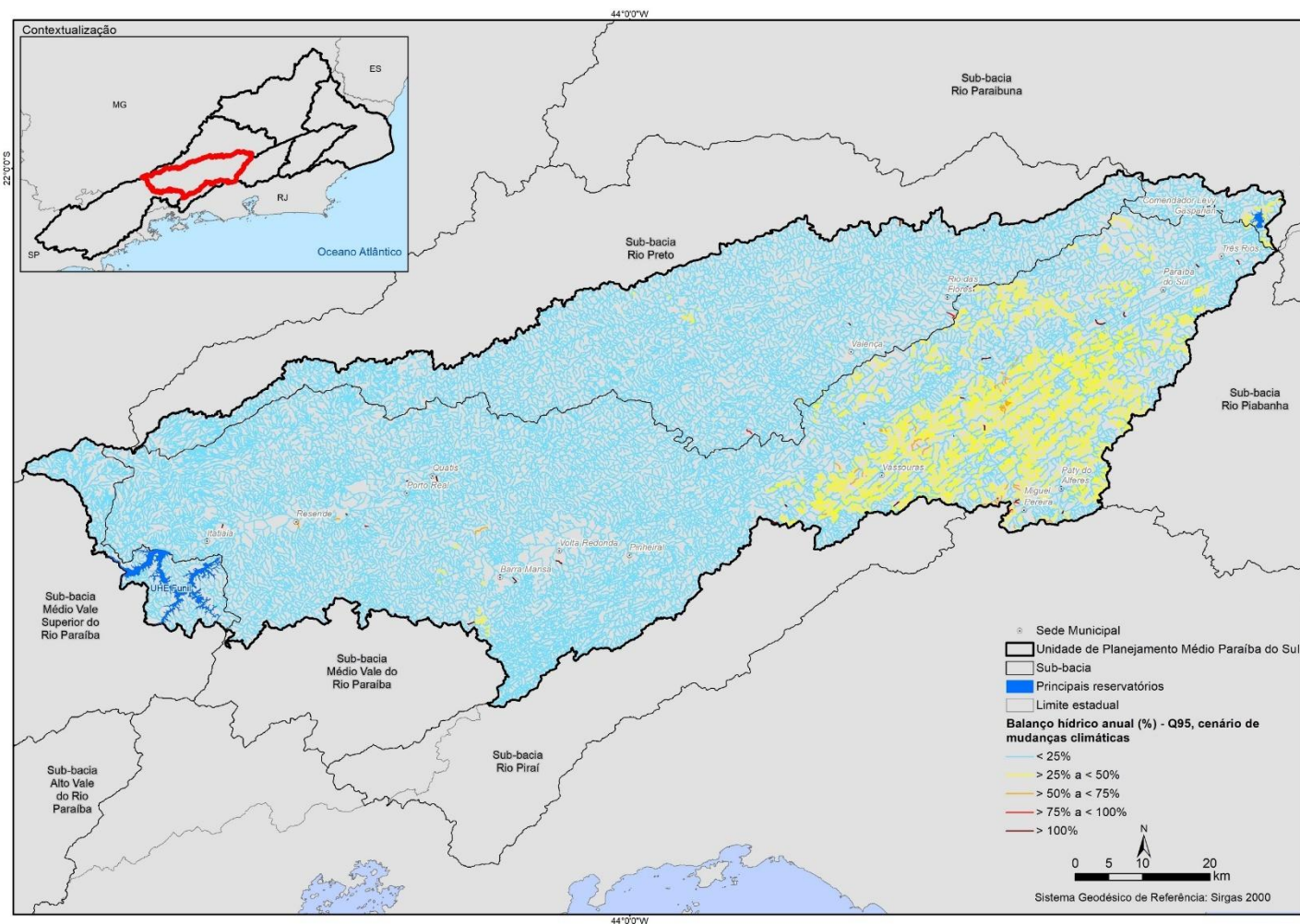
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 7-14 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q_{7,10}, mudanças climáticas – UP Pomba e Muriaé



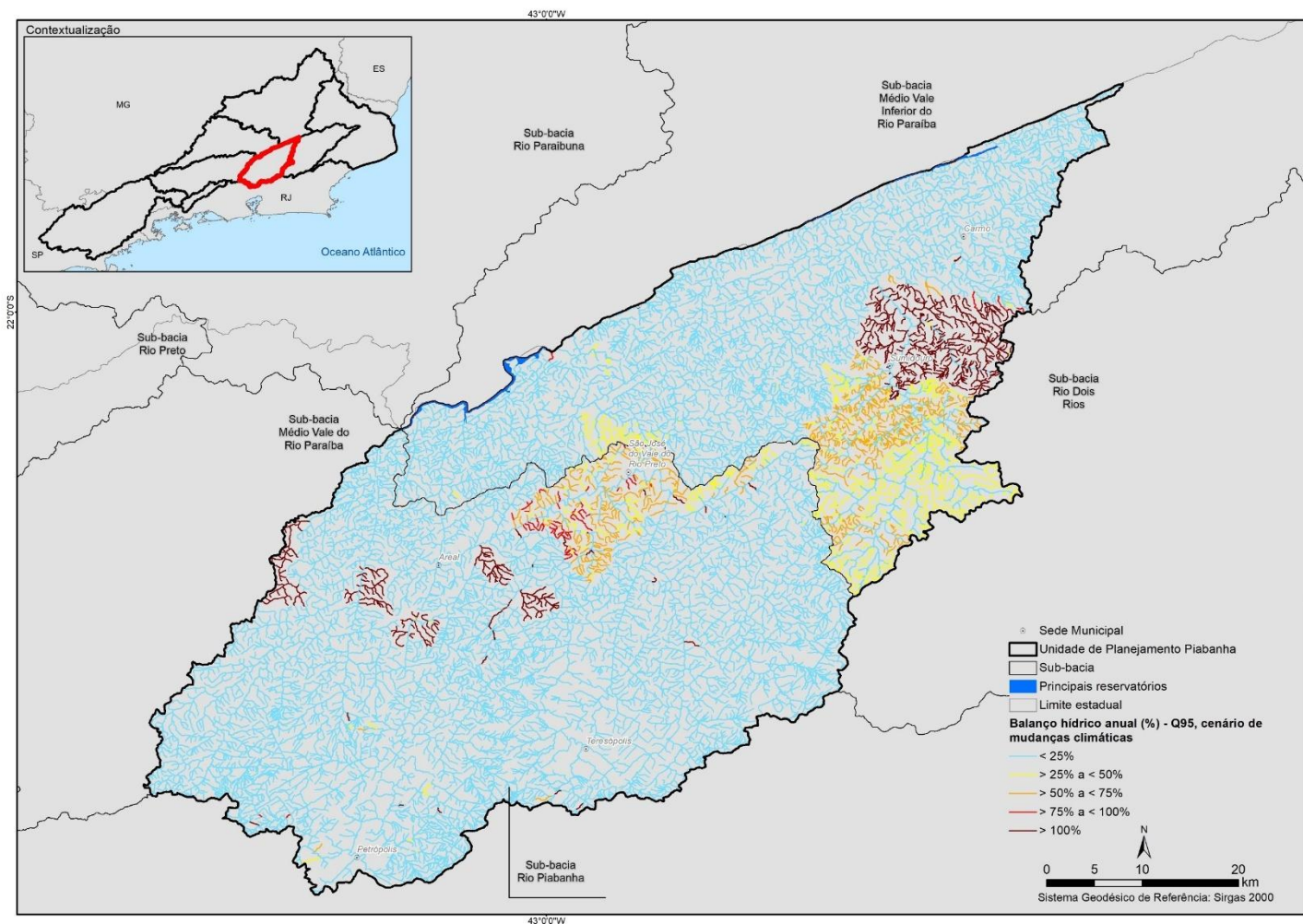
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 7-15 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q₉₅, mudanças climáticas – UP Médio Paraíba do Sul



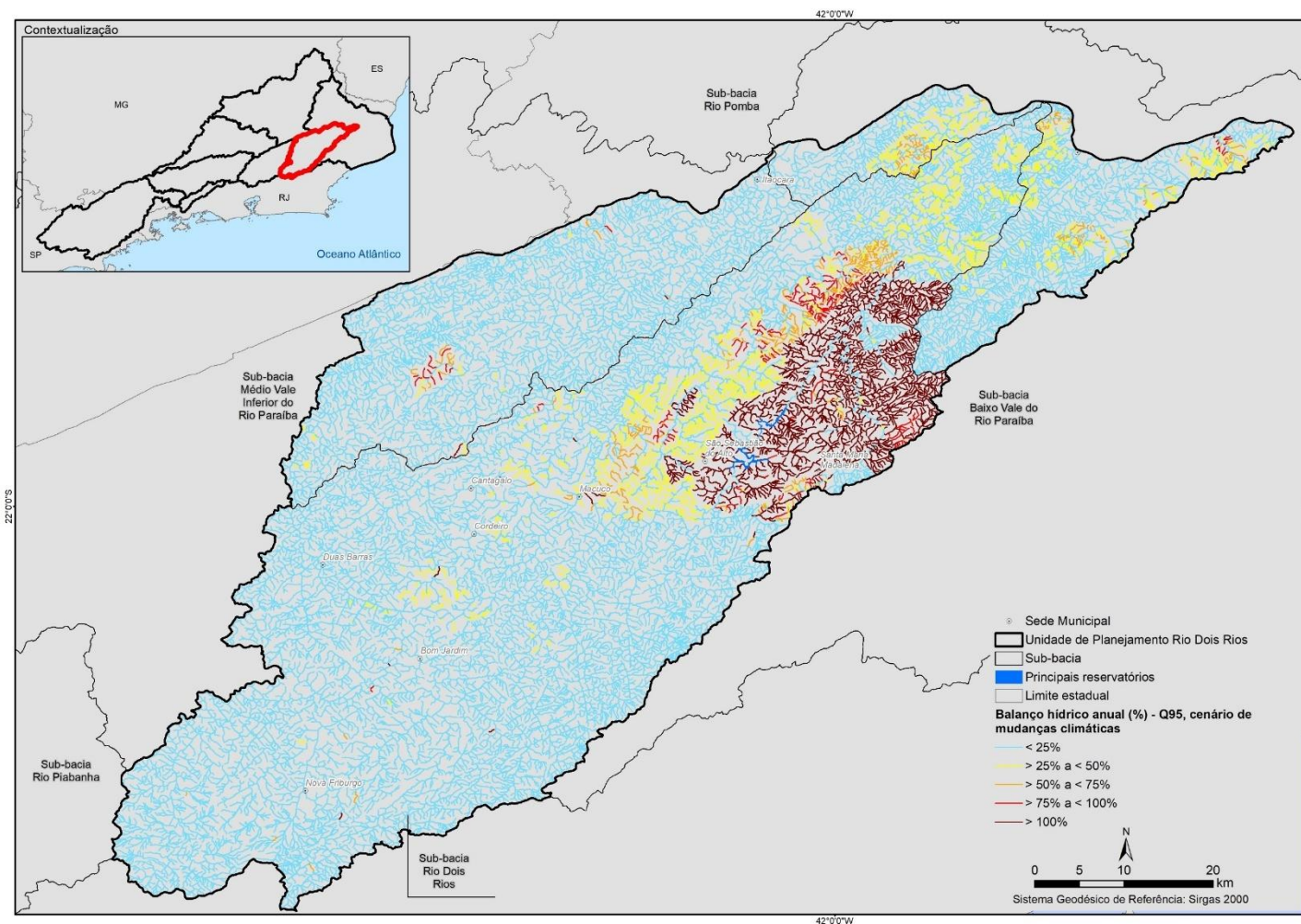
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 7-16 – Balanço Hídrico Superficial Anual, mudanças climáticas – Q₉₅– UP Piabanha



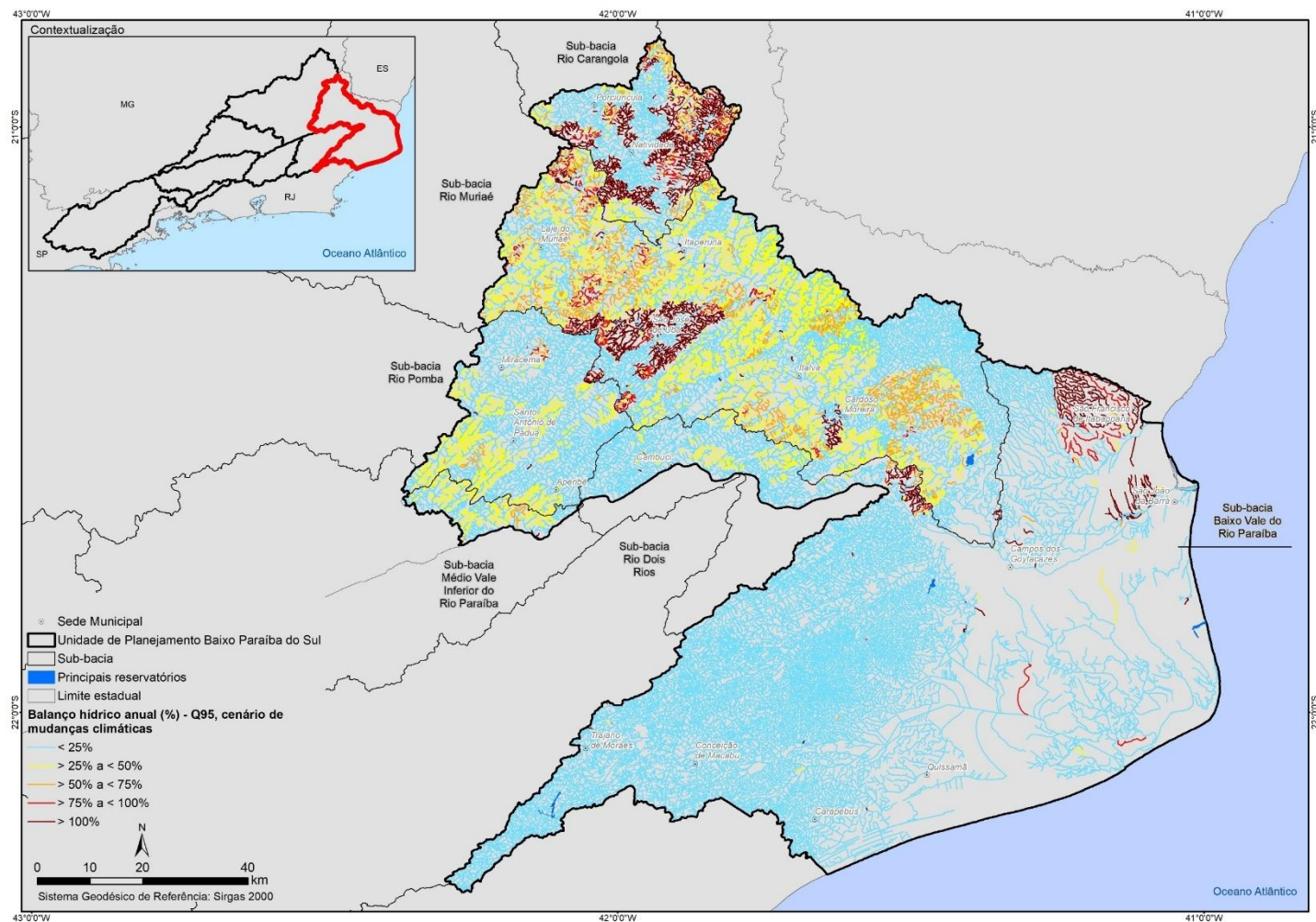
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 7-17 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q₉₅, mudanças climáticas – UP Rio dos Rios



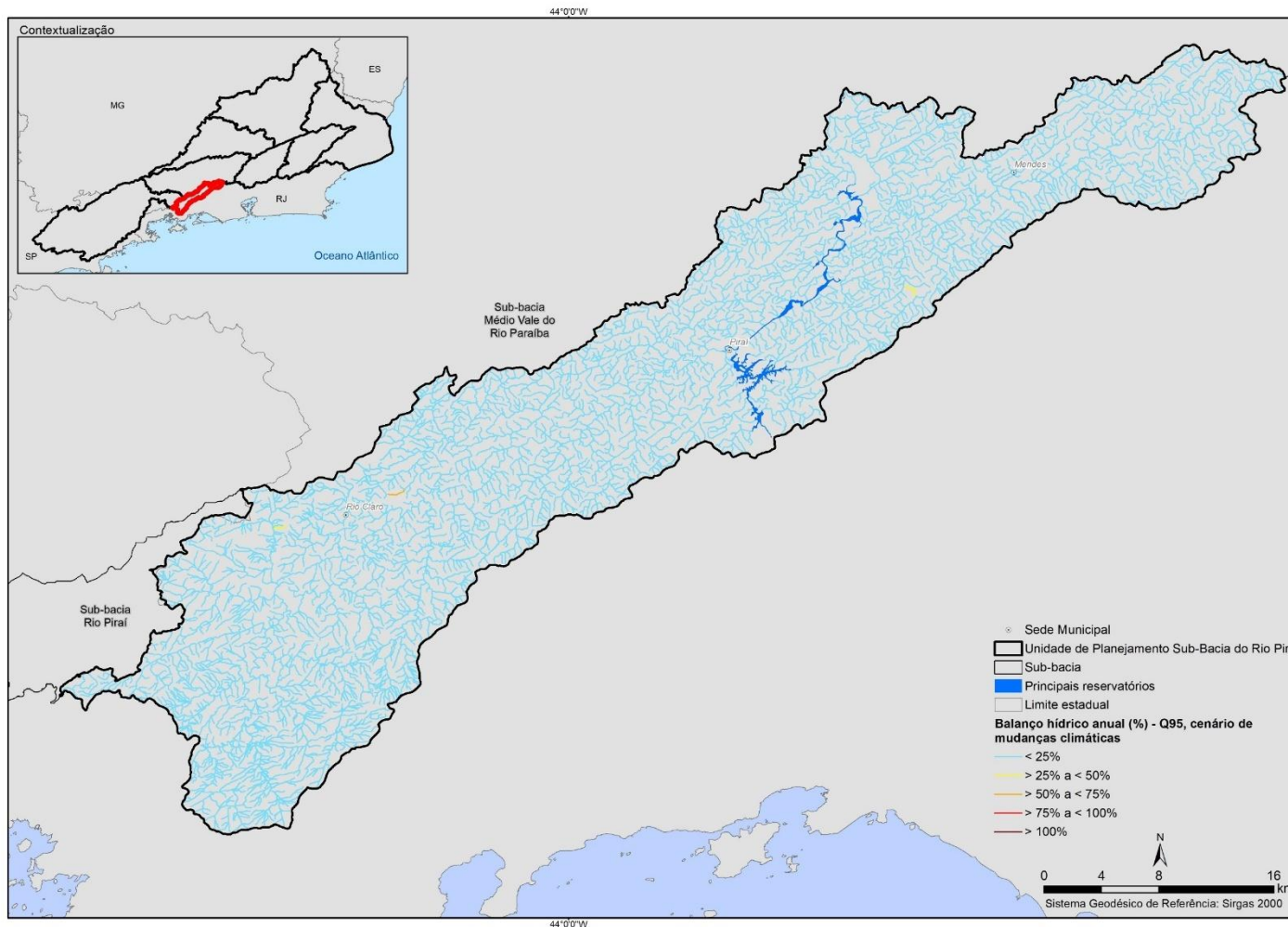
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 7-18 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q₉₅, mudanças climáticas – UP Baixo Paraíba do Sul



Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 7-19 – Balanço Hídrico Superficial Anual – Q₉₅, mudanças climáticas – UP Rio Pirai



Fonte: elaborado pelo Consórcio

O Quadro 7-16 (Q_{95} , para todas as UPs) e o Quadro 7-17 ($Q_{7,10}$, para as UPs que a possuem como vazão de referência) apresentam uma síntese dos resultados de balanço hídrico no cenário de mudanças climáticas por Unidades de Planejamento, apresentados em pontos chave da bacia e contrastados com as demandas superficiais.

Em relação às demandas, nota-se um pequeno incremento nos valores de abastecimento urbano humano e rural, em função de maiores níveis de consumo em cenários de mudança climática. Além disso, as demandas de dessedentação de animais e evaporação de reservatórios também sofrem incrementos variados. Por fim, o setor de irrigação possui os maiores aumentos projetados nos cenários de mudanças climáticas, especialmente nas UPs Alto Paraíba do Sul, Pomba e Muriaé e Piabanha.

As UPs que possuem como principal setor contribuinte o industrial e/ou a mineração são as menos afetadas nos cenários de mudanças climáticas, tendo em vista que tais demandas não apresentam projeções de incremento por conta de mudanças climáticas. É o caso das UPs rios Preto e Paraíba e Médio Paraíba do Sul, que possuem determinada manutenção em suas faixas de comprometimento hídrico observadas para a Q_{95} (Quadro 7-16).

Quadro 7-16 – Análise de resultados do balanço hídrico superficial integrada à disponibilidade hídrica, para o cenário de mudanças climáticas (vazão de referência Q_{95})

Unidades de planejamento	Demandas Superficiais		Trechos principais				Observações
	Total (m³/s)	Preponderantes	Ponto analisado	Área de drenagem do ponto (km²)	Disponibilidade hídrica no trecho para a vazão de referência (m³/s) ¹	Vazões remanescentes no trecho (m³/s)	
Alto Paraíba do Sul	29,09	Transposição: 8,5 m³/s; Irrigação: 9,0 m³/s; Ab. Urbano: 4,9 m³/s; Mineração: 4,4 m³/s; Indústria: 3,61 m³/s	Rio Paraíba do Sul, a jusante da UHE Paraibuna	4.279	24,83	24,7	Transposição de 8,5 m³/s para fora da BHPS (bacia do rio Piracicaba); Depende de regularização dos reservatórios de Paraibuna, Santa Branca e Jaguari
			Rio Paraíba do Sul próximo à entrada do reservatório Funil	13.023	108,15	94,87	
Rios Preto e Paraibuna	5,13	Mineração: 1,6 m³/s; Ab. Urbano: 1,6 m³/s; Evaporação de reservatórios: 0,82 m³/s	Rio Preto na confluência com o rio Paraibuna	3.435	24,52	23,84	
			Rio Paraibuna na entrega ao Paraíba do Sul	8.602	62,96	60,8	
Rios Pomba e Muriaé	10,09	Irrigação: 4,7 m³/s; Ab. Urbano: 1,8 m³/s; Dessedentação: 1,1 m³/s; Evaporação de reservatórios: 1,0 m³/s	Rio Pomba na entrega ao Paraíba do Sul	8.569	32,97	32,1	
			Rio Muriaé na entrega ao Paraíba do Sul	8.152	19,54	15,04	
Médio Paraíba do Sul	9,92	Indústria: 5,3 m³/s; Ab. Urbano: 2,3 m³/s	Rio Paraíba do Sul, no barramento de Santa Cecília	16.601	152,4	145,87	Transposição de 119 m³/s para a sub-bacia do rio Pirai
			Rio Paraíba do Sul, previamente ao encontro com os rios Paraibuna e Piabanha	19.487	65,06	63,9	
Piabanha	4,01	Irrigação: 2,3 m³/s; Ab. Urbano: 0,9 m³/s;	Rio Piabanha na entrega ao Paraíba do Sul	2.067	11,8	11,2	

Unidades de planejamento	Demandas Superficiais		Trechos principais				Observações
	Total (m³/s)	Preponderantes	Ponto analisado	Área de drenagem do ponto (km²)	Disponibilidade hídrica no trecho para a vazão de referência (m³/s) ¹	Vazões remanescentes no trecho (m³/s)	
			Rio Paquerer na entrega ao Paraíba do Sul	757	4,3	2,65	
Rio Dois Rios	3,32	Evaporação de reservatórios: 1,2 m³/s; Ab. Urbano: 0,6 m³/s; Irrigação: 0,7 m³/s;	Rio Dois Rios na entrega ao Paraíba do Sul	3.163	12,9	12,0	
Baixo Paraíba do Sul	14,16	Irrigação: 5,6 m³/s; Evaporação de reservatórios 2,9 m³/s Termoeletricidade: 1,8 m³/s;	Rio Paraíba do Sul próximo à divisa dos municípios de Campos dos Goytacazes, São João da Barra e São Francisco de Itabapoana	55.535	225,08	214,17	
Sub-bacia do Rio Pirai	0,5	Ab. Urbano: 0,26 m³/s; Indústria: 0,17 m³/s;	Rio Pirai na entrega ao Paraíba do Sul	1.116	10,01	9,9	Recebe 119 m³/s por transposição, que são enviados para fora da BHPS, para a bacia do rio Guandu

¹ Disponibilidades hídricas obtidas do EDH-PS alteradas por mudanças climáticas

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 7-17 – Análise de resultados do balanço hídrico superficial integrada à disponibilidade hídrica, para o cenário de mudanças climáticas (UPs com vazão de referência $Q_{7,10}$)

Unidades de planejamento	Demandas Superficiais		Trechos principais				Observações
	Total (m³/s)	Preponderantes	Ponto analisado	Área de drenagem do ponto (km²)	Disponibilidade hídrica no trecho para a vazão de referência (m³/s) ¹	Vazões remanescentes no trecho (m³/s)	
Alto Paraíba do Sul	29,09	Transposição: 8,5 m³/s; Irrigação: 9,0 m³/s; Ab. Urbano: 4,9 m³/s; Mineração: 4,4 m³/s Indústria: 3,61 m³/s	Rio Paraíba do Sul, a jusante da UHE Paraibuna	4.279	19,01	18,88	Transposição de 8,5 m³/s para fora da BHPS (bacia do rio Piracicaba); Depende de regularização dos reservatórios de Paraibuna, Santa Branca e Jaguari
			Rio Paraíba do Sul próximo à entrada do reservatório Funil	13.023	74,37	61,57	
Rios Preto e Paraibuna	5,13	Mineração: 1,6 m³/s Ab. Urbano: 1,6 m³/s; Evaporação de reservatórios: 0,82 m³/s	Rio Preto na confluência com o rio Paraibuna	3.435	18,25	17,6	
			Rio Paraibuna na entrega ao Paraíba do Sul	8.602	48,84	48,58	
Rios Pomba e Muriaé	10,09	Irrigação: 4,7 m³/s; Ab. Urbano: 1,8 m³/s; Dessedentação: 1,1 m³/s; Evaporação de reservatórios: 1,0 m³/s	Rio Pomba na entrega ao Paraíba do Sul	8.569	24,12	23,07	
			Rio Muriaé na entrega ao Paraíba do Sul	8.152	11,25	7,0	

¹ Disponibilidades hídricas obtidas do EDH-PS alteradas por mudanças climáticas.

Fonte: elaborado pelo Consórcio

7.5.2. Balanço Hídrico Subterrâneo

A partir da metodologia descrita no Item 7.1.2, foram estimadas as reservas exploráveis da bacia e estas foram comparadas às demandas subterrâneas para determinar o grau de comprometimento. O Quadro 7-18 apresenta uma síntese dos resultados de balanço hídrico subterrâneo em pontos chave da bacia (foram considerados os exutórios de cada sub-bacia) e contrastados com as demandas de águas subterrâneas.

A análise das demandas hídricas subterrâneas (dados apresentados anteriormente no Quadro 7-9) revela um aumento expressivo no consumo projetado até o cenário de maior pressão em 2045, comparado à cena atual. O uso total passa de 13,01 m³/s para 16,31 m³/s, representando um acréscimo de aproximadamente 25% quando considerada a projeção econômica padrão. Ao se considerar cenários agravados por mudanças climáticas, a demanda hídrica subterrânea total eleva-se ainda mais, chegando a 16,52 m³/s (aumento de 27% em relação à cena atual). Já no cenário mais extremo — Mudanças Climáticas associadas a Ondas de Calor — o consumo total atinge 17,63 m³/s, representando um crescimento de cerca de 35% em relação à situação atual.

Os resultados do balanço hídrico subterrâneo (apresentados no Quadro 7-18), mostram que, apesar do crescimento projetado da demanda até 2045 em cenário de mudança climática, nenhuma das sub-bacias avaliadas atinge condição de escassez crítica ou muito crítica, conforme os critérios da Deliberação CRH nº 146/2012 (CRH, 2020). Mesmo no cenário de mudanças climáticas acrescidas de ondas de calor os valores de comprometimento se mantêm abaixo de 50% da reserva explotável em todas as sub-bacias. Contudo, algumas áreas já apresentam percentuais de comprometimento relevantes e merecem atenção, destacando-se:

- **Sub-bacia Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul (UP Alto Paraíba do Sul):** apresenta o maior grau de comprometimento em todos os cenários. – 27,1% na cena atual (situação potencialmente preocupante) e 33,2% na progressão Padrão de 2045 (situação preocupante). No cenário de mudanças climáticas, o balanço hídrico projetado é de 36,80%, enquanto, no cenário de acréscimo associado a ondas de calor, o balanço hídrico é de 37,70%. Esse comportamento reflete a elevada concentração de demandas industriais, minerárias e de abastecimento urbano na sub-bacia. O aumento verificado nos cenários de mudanças climáticas e de ondas de calor reforça o destaque dessa sub-bacia em relação ao comprometimento hídrico;
- **Sub-bacias dos rios Pombo e Carangola (UP Rios Pombo e Muriaé):** estão na faixa considerada como situação potencialmente preocupante (comprometimento de 5 a

30%) nos cenários avaliados. Juntas possuem uma demanda subterrânea no cenário de maior pressão – Progressão Padrão (2045) de 1,22 m³/s frente a uma reserva explorável de 11,4 m³/s. A análise do balanço hídrico indica que a sub-bacia do Rio Pomba mantém o nível de comprometimento estabelecido pela Deliberação CRH nº 146/2012, apresentando aumento de 10,90% no cenário de Progressão Padrão 2045 para 12,70% no cenário de mudanças climáticas e 14,90% sob a influência de ondas de calor. Já a sub-bacia do rio Carangola registra comprometimento de 10,60% no cenário de mudanças climáticas associado a ondas de calor, permanecendo, assim como o rio Pomba, distante do intervalo de transição de classe de comprometimento (30%–50%), mesmo considerando os acréscimos projetados. Esse comprometimento pode ser relacionado à hidrogeologia da região, a qual indica que estas sub-bacias ficam situadas em uma unidade hidrogeológica fraturada de produtividade muito baixa;

- **Sub-bacia do rio Muriaé (UP Rios Pomba e Muriaé):** O comprometimento da sub-bacia evolui de 3,10% na condição atual para 4,40% na projeção de progressão padrão para 2045. Sob o efeito de mudanças climáticas, eleva-se para 4,60% e, em cenários de ondas de calor, atinge 5,90%, configurando situação potencialmente preocupante quanto à disponibilidade hídrica. Trata-se da única sub-bacia que apresenta alteração de enquadramento nos cenários futuros segundo os critérios da Deliberação CRH nº 146/2012;
- **Sub-bacia do rio Piabanha (UP Piabanha):** salta de 10,5% na cena atual para 13,1% no cenário de maior pressão – Progressão Padrão (2045), tornando-se uma sub-bacia que merece acompanhamento por apresentar crescimento proporcional expressivo em relação a sua disponibilidade. Apesar das demandas subterrâneas nessa sub-bacia não serem elevadas (0,41 m³/s no cenário de Progressão Padrão), as reservas explotáveis são baixas (3,1 m³/s), o que justifica o comprometimento hídrico apresentado. A sub-bacia apresenta acréscimo em relação ao cenário de Progressão Padrão (2045), passando de 13,10% para 13,50% no cenário de mudanças climáticas e para 14,85% sob efeito de ondas de calor. A UP Piabanha tem sua maior porção localizada em uma unidade aquífera fraturada com pouca produtividade, o que justifica os índices de comprometimento obtidos.

Por outro lado, sub-bacias como o **Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul, Rio Pirai, Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul e Rio Dois Rios** permanecem com baixos índices de comprometimento (<5%) mesmo em cenário de mudanças climáticas acrescidas de ondas de calor, o que sugere maior resiliência quanto ao uso dos recursos subterrâneos. Como pode

ser observado no Quadro 7-18, para o Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul, passa-se de um comprometimento hídrico médio de 0,80% na cena atual para 1,20% no horizonte final para o cenário mais extremo de Onda de Calor. Para a bacia do rio Piraí, a alteração do índice de comprometimento hídrico é baixa, mantendo-se por volta de 0,30% de comprometimento hídrico. No caso do rio Dois Rios, o comprometimento hídrico médio passa de 2,30% para 3,80% para o pior cenário, de Onda de Calor. Situação semelhante ocorre também para o Médio Vale Inferior do Paraíba do Sul, que passa de 0,50% de comprometimento para a cena atual para 1,10% para o cenário mais crítico, de Onda de Calor.

Destaca-se que o maior incremento do índice de comprometimento hídrico ocorre no cenário de ondas de calor, eventos de caráter pontual e temporário, configurando, portanto, uma condição crítica, porém de duração limitada.

Quadro 7-18 – Demandas subterrâneas em relação às reservas exploráveis nos cenários avaliados.

Sub-bacia*	Cena atual			Maior Pressão (2045)								
				Progressão padrão			Mudança climática			Ondas de Calor		
	Demandas subterrâneas (m³/s)	Reserva Explotável (m³/s)	Balanco Hídrico (%)	Demandas subterrâneas (m³/s)	Reserva Explotável (m³/s)	Balanco Hídrico (%)	Demandas subterrâneas (m³/s)**	Reserva Explotável (m³/s)**	Balanco Hídrico (%)	Demandas subterrâneas (m³/s)	Reserva Explotável (m³/s)	Balanco Hídrico (%)
Alto Vale do Rio Paraíba do Sul	0,12	5,7	2,20%	0,19	5,7	3,40%	0,20	5,8	3,40%	0,25	5,8	4,30%
Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul	10,2	37,6	27,20%	12,5	37,6	33,20%	12,5	34,0	36,80%	12,8	34,0	37,70%
Rio Preto	0,11	6	1,80%	0,16	6	2,60%	0,16	6,3	2,60%	0,21	6,3	3,35%
Rio Paraibuna	0,36	14,5	2,50%	0,53	14,5	3,60%	0,54	14,1	3,80%	0,69	14,1	4,90%
Rio Pomba	0,74	9,9	7,40%	1,08	9,9	10,90%	1,12	8,9	12,70%	1,32	8,9	14,90%
Rio Carangola	0,08	1,5	5,60%	0,12	1,5	8,00%	0,12	1,4	8,50%	0,15	1,4	10,60%
Rio Muriaé	0,26	8,5	3,10%	0,38	8,5	4,40%	0,38	8,3	4,60%	0,49	8,3	5,90%
Médio Vale do Rio Paraíba do Sul*	0,16	16,7	1,00%	0,21	16,7	1,30%	0,21	15,9	1,30%	0,21	15,9	1,30%
Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul	0,17	32,3	0,50%	0,24	32,3	0,80%	0,24	28,3	0,80%	0,31	28,3	1,10%
Rio Piabanha	0,33	3,1	10,50%	0,41	3,1	13,10%	0,41	3,0	13,50%	0,45	3,0	14,85%
Rio Dois Rios	0,09	3,8	2,30%	0,11	3,8	3,00%	0,12	3,4	3,50%	0,13	3,4	3,80%
Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul	0,42	54,9	0,80%	0,47	54,9	0,80%	0,48	48,7	1,00%	0,57	48,7	1,20%
Rio Piraí	0,01	3,3	0,30%	0,01	3,3	0,20%	0,01	3,2	0,30%	0,01	3,2	0,30%

*Todos os resultados foram gerados no exutório de cada sub-bacia, com exceção da sub-bacia Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, onde a disponibilidade hídrica subterrânea apresentada é a montante da transposição do barramento de Santa Cecília devido à influência da transposição nos resultados a jusante.

** Algumas variações associadas ao cenário de mudanças climáticas ocorrem a partir da segunda ou terceira casa decimal, podendo, devido ao arredondamento, não aparentar diferenças no quadro de demandas.

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul, Rio Piraí, Médio Vale do Rio Paraíba do Sul e Rio Dois Rios

8. O VALOR DA ÁGUA E OS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Conforme observado nos capítulos precedentes, o impacto das mudanças climáticas é multifacetado, especialmente quando se observam as repercussões na média, na variância e/ou na distribuição de secas e cheias, bem como nas alterações dos balanços hídricos. De forma a compreender esse impacto, é importante reconhecer o valor econômico da água, pois é na sua falta ou na sua alteração que a leitura emerge como representativa. Afinal, a mudança do clima se repercute, fundamentalmente, em um maior risco hidrológico. O presente capítulo aborda, primeiramente, como a mudança do clima vem se integrando em processos de planejamento do país (item 8.1), para depois tratar do valor econômico da água (item 8.2), e da revelação de tal valor nos eventos críticos, principalmente períodos de escassez que não são marcados por danos físicos, mas sim por prejuízos ainda pouco contabilizados (item 8.3).

8.1. AS MUDANÇAS DO CLIMA NO PLANEJAMENTO SETORIAL

A mudança do clima é um determinante transversal do risco hídrico e, por isso, está sendo incorporada ao planejamento setorial dos recursos hídricos, incluindo aqueles conduzidos pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). A publicação de 2024, que aborda explicitamente o "Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos no Brasil" (ANA, 2024), tem os objetivos de diagnosticar o clima (presente e futuro) e traduzir seus efeitos potenciais na oferta de água. Com isso, a publicação aponta repercussões na segurança hídrica e em estratégias de adaptação setorial e territorial. Reconhece, ainda, que a variabilidade hidroclimática é sujeita às incertezas "profundas", que inviabilizam o uso exclusivo de abordagens tradicionais de risco que presumem estacionariedade.

O intervalo pretérito com o qual se baseiam as análises hidrológicas deve ser contrastado com as perspectivas de cenários plausíveis, de forma a adicionar robustez decisória, buscando soluções que funcionem sob múltiplos futuros verossímeis, em alinhamento com a literatura internacional sobre decisão informada por risco climático. Conforme propõe Quay (2015), deve-se abraçar a incerteza inerente ao exercício de se planejar para o futuro, de forma a incorporá-la no processo de decisão subjacente, criando, assim, sistemas mais versáteis e, conseqüentemente, mais resilientes. A utilização de cenários exploratórios para antecipar possíveis trajetórias climáticas e capacidades de resposta, assim, torna-se instrumental para o desenvolvimento de estratégias adaptativas.

Em termos de planos de bacia hidrográfica, a ANA incorporou cenários de mudança climática nas metodologias de projeção hidrológica e análises de risco dos Planos de Bacia Hidrográfica

dos rios Piancó-Piranhas-Açu, Grande, Paraguai e Doce. Nestes casos, além de utilizar projeções para diferentes horizontes temporais e cenários de emissões, buscou-se explicitar as incertezas, propor medidas de robustez e incluir medidas de adaptação como parte do portfólio recomendado para cada bacia. No caso do plano do rio Grande, por exemplo, o estudo faz uso de projeções climáticas para gerar séries prospectivas de vazão sob risco hídrico. Já na bacia do rio Piancó-Piranhas-Açu, a análise também incorporou a proposição de medidas de adaptação analisadas mediante método de custo-benefício - que trabalha com o valor pecuniário da água. Na região hidrográfica do rio Paraguai, múltiplos modelos e cenários foram utilizados para subsidiar recomendações frente à maior frequência de extremos hidrológicos previstos. Por fim, a revisão e atualização do plano do rio Doce estimou as repercussões das maiores temperaturas nas demandas de irrigação, importantes vetores de uso dos recursos hídricos no território.

Além do âmbito do planejamento e gestão dos recursos hídricos, observa-se a incorporação dos riscos da mudança do clima em instrumentos setoriais de planejamento do Brasil, mesmo que em diferentes estágios de desenvolvimento. No âmbito do **setor de saneamento básico**, por exemplo, não se observa um plano setorial específico na estrutura nacional de adaptação às mudanças climáticas, embora o tema seja abordado como componente dos planos de recursos hídricos. Além disso, o setor enfrenta vulnerabilidades específicas, incluindo danos à infraestrutura por eventos extremos, escassez hídrica, inundações em estações de tratamento e comprometimento da qualidade da água (Instituto Trata Brasil, 2024).

Destacam-se, outrossim, duas publicações de interesse, a primeira da Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento intitulado "Saneamento e Mudança Climática: Diretrizes das Companhias de Água e Esgoto para o enfrentamento de eventos anormais", que estabelece diretrizes específicas para preparar empresas do setor frente aos desafios climáticos de secas, chuvas anormais e ondas de calor (AESBE, 2025). De forma a garantir o abastecimento de água, tratamento de esgoto e proteção das infraestruturas nessas situações, abordam-se planos de contingência, tecnologias e infraestruturas resilientes, aprimoramento de estações de tratamento e monitoramento e alerta climático contínuo. A publicação ainda destaca o papel de ações comunitárias e parcerias, além de educação ambiental e campanhas de uso racional de água.

A segunda publicação de destaque é a do Instituto Água e Saneamento, intitulada "Adaptação e Saneamento – Por um setor resiliente às mudanças climáticas", que identifica estratégias de adaptação (IAS, 2025), tais como infraestrutura combinada entre sistemas tradicionais e soluções baseadas na natureza, parques lineares, jardins de chuva e telhados verdes,

sistemas de reúso e dessalinização, e integração com políticas urbanas de drenagem e gestão de águas pluviais. As orientações também abrangem o papel de medidas não estruturais (alerta precoce, gestão comunitária) para o enfrentamento a eventos extremos, além de clareza na priorização de atendimentos, como a de comunidades vulneráveis e áreas de saneamento precário. Abordam-se, ainda, as lacunas de capacitação e financiamento, assim como as demandas de monitoramento e avaliação.

No **setor agropecuário**, destaca-se o Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária (ABC+), principal instrumento setorial brasileiro (Brasil, MAPA, 2021). Coordenado pelo Ministério da Agricultura e Pecuária, a versão atual do plano vigora no período de 2020-2030 e tem como objetivo promover a adaptação à mudança do clima e o controle das emissões de gases de efeito estufa (mitigação), concomitante ao incremento na produtividade. Um dos importantes pilares de adaptação climática é a abordagem integrada da paisagem, que reconhece as diferentes escalas dos territórios e os aspectos diversificados, sistêmicos e dinâmicos que contemplam o aumento da resiliência dos sistemas produtivos, conservação da biodiversidade e proteção dos polinizadores, manutenção da oferta e qualidade da água, e atenuação de extremos climáticos.

Também com vistas à resiliência e aumento de produtividade, o plano aborda diversos sistemas, práticas, produtos e processos de produção sustentáveis, cujo portfólio tecnológico abrange as seguintes tecnologias: Sistema de Plantio Direto (SPD), Recuperação de Pastagens Degradadas (RPD), Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), Sistemas Agroflorestais (SAFs), Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN), Florestas Plantadas, Sistema de Plantio Direto para Hortaliças (SPDH), Terminação Intensiva de Bovinos, Sistemas Irrigados e Sistemas Agroflorestais ampliados. Conforme Assad *et al.* (2019), no entanto, é necessário aumentar significativamente o investimento e a adoção de modalidades indicadas no plano de forma a reduzir a vulnerabilidade do produtor rural à variabilidade do clima e dos eventos climáticos extremos.

No **setor industrial**, o plano estratégico governamental de adaptação à mudança do clima e gestão de riscos está, no momento, em elaboração pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC)⁶, e é denominado de "Plano Clima Adaptação – Setorial Indústria". Contemplará diretrizes para adaptação da indústria até 2035 e 2050,

⁶ Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202404/plano-do-mdic-adaptara-setor-industrial-a-efeitos-das-mudancas-climaticas>

considerando as diferentes realidades dos segmentos industriais e as distintas regiões climáticas, com estratégias que devem contemplar a criação de condições técnicas, institucionais e financeiras para gestão do carbono, promoção da eficiência energética, e desenvolvimento de políticas específicas para setores de maior volume de emissões.

Destaca-se, outrossim, a publicação da Confederação Nacional das Indústrias intitulada "Indústria Resiliente - um guia para a indústria se adaptar aos impactos da mudança do clima - diretrizes gerais" (CNI, 2020), cujo foco é tornar os processos industriais mais resilientes, eficientes e preparados para eventos extremos. Como motivadores para a ação, está uma abrangente listagem de impactos específicos do clima às indústrias, como: (i) danos à infraestrutura e equipamentos; (ii) interrupção parcial ou total da operação industrial; (iii) impactos no fornecimento de energia elétrica; (iv) redução do fornecimento de matérias-primas; (v) comprometimento da saúde dos colaboradores; e (vi) redução da disponibilidade e qualidade da água. A publicação conclui que a adaptação climática exige planejamento estruturado, ações multidisciplinares e melhoria contínua, cujo ciclo de planejamento deve envolver opções de adaptação (medidas físicas, tecnológicas, organizacionais e comportamentais), priorização das ações, parcerias e formas de captação de recursos. Observa-se, ainda, a integração com normas internacionais (ISO 14090, ISO 14091).

O **setor de mineração** possui um dos pioneiros planos climáticos setoriais, intitulado "Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação à Mudança do Clima na Mineração - Plano MBC", desenvolvido pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2013). Abordando levantamento detalhado das emissões do setor, por tipo de minério e processo, o instrumento estabelece metas graduais para diminuir as emissões até 2020, que infelizmente não foram cumpridas ou mesmo revisadas, como se havia previsto. Mesmo assim, o documento aborda três grandes eixos de ação: (i) alteração de fontes energéticas, substituindo combustíveis fósseis por renováveis; (ii) otimização de ativos e processos, mediante uso de veículos híbridos e aumentos de eficiência em equipamentos; e (iii) adoção de novas tecnologias, como o uso de correias transportadoras e britagem na mina.

Já o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) também editou material de apoio setorial, intitulado "Guia sobre adaptação às mudanças climáticas para o setor de mineração" (IBRAM, 2021), fornecendo orientações específicas para incorporação da adaptação climática na tomada de decisões. Segundo o documento, as empresas mineradoras devem evoluir do simples monitoramento de riscos para a formulação de planos robustos de adaptação ao clima, adotando uma abordagem iterativa e sistêmica para mitigar impactos e fornecer resiliência. A adaptação à mudança do clima é abordada como tema de prioridade estratégica,

especialmente frente a eventos extremos. O guia orienta empresas do setor mineral a integrar o tema climático à gestão de riscos, além de planejar medidas de adaptação em todo o ciclo de vida das minas (do projeto ao fechamento). O documento sugere plataformas de dados climáticos, sistemas de alerta, matrizes de risco, normas internacionais (ISO 14090, ISO 14091) e guias de planejamento estratégico adaptativo.

Por fim, no **setor de geração de energia**, está sendo desenvolvido pelo Ministério de Minas e Energia o "Plano Clima Adaptação - Setor Energia", com metas e ações específicas para o período entre 2024 e 2035⁷. Além disso, o Plano Decenal de Expansão de Energia (EPE, 2025) incorpora critérios de sustentabilidade socioambiental incluindo vulnerabilidade e adaptação climática. Observa-se que o setor, embora dependente do clima de forma ímpar, vem incorporando o risco climático de forma tímida, pois apenas no PDE 2031 (EPE, 2022) é que se menciona, ainda de forma declaratória e sem consideração nas modelagens, as eventuais modificações nas séries hidrológicas futuras. No PDE 2034, no entanto, foram realizados testes quantitativos acerca do papel das “restrições operativas” das hidrelétricas (resultantes dos usos múltiplos da água e, sobretudo, das mudanças climáticas). Estas reduzem a amplitude real de operação das usinas hidrelétricas frente ao que as séries hidrológicas históricas sugeriam, tanto que, ao se substituir a série padrão de 90 anos por séries “críticas” (como a de 2012–2021, por exemplo), os custos operacionais do sistema sobem substancialmente e aumentam o despacho térmico, sinalizando maior risco hidrológico, necessidade de reservar água em reservatórios e, portanto, de reorientar a função de parte da hidráulica para resiliência sistêmica em detrimento da maximização energética de curto prazo. Em termos práticos, isso leva o planejamento para duas frentes integradas: (i) incorporar séries e cenários climáticos no cálculo de energias asseguradas e fatores de capacidade; e (ii) testar o sistema com estresses hidrológicos recorrentes, calibrando reservas de potência e o papel de fontes não hídricas no atendimento seguro.

A análise da incorporação e tratamento do risco e da adaptação às mudanças do clima no planejamento setorial salienta diferentes níveis de maturidade e complexidade técnica. Torna-se claro, outrossim, a preocupação intersetorial acerca da necessidade de planejamento integrado, monitoramento contínuo e gestão adaptativa frente às incertezas climáticas, demonstrando o amadurecimento da agenda no Brasil.

⁷ Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/plano-clima-adaptacao-consulta-publica-aberta-para-o-setor-de-energia>

8.2. A IMPORTÂNCIA DE SE CONHECER O VALOR DA ÁGUA

A quantificação física e monetária das contribuições dos recursos hídricos ganha relevância na medida em que eventos extremos ameaçam as reservas, impactam as atividades econômicas e intensificam os conflitos pelo uso da água, exigindo instrumentos de valoração que permitam instrumentar decisões de investimento, de priorização e outros correlatos à construção de sistemas resilientes. Os recursos hídricos fornecem, afinal, uma gama de benefícios. Segundo a Classificação Internacional Comum de Serviços Ecosistêmicos para Contabilidade Ambiental e Econômica Integrada (EEA, 2018), os ecossistemas aquáticos são responsáveis por serviços de: (i) provisão de água potável e matéria-prima; (ii) regulação, associada à decomposição de poluentes em águas superficiais e subterrâneas, e; (iii) culturais como os associados ao lazer e às práticas culturais. No que concerne o serviço de provisão, tal classificação diferencia as águas superficiais e subterrâneas utilizadas pelas atividades econômicas para fins de produção descrevendo as seguintes classes de uso: (i) águas superficiais e subterrâneas para fins potáveis; (ii) águas superficiais e subterrâneas utilizadas como matéria-prima para fins não potáveis; (iii) águas superficiais e subterrâneas usadas como fonte de energia; e (iv) água costeira e marinha usada como fonte de energia.

A necessidade em considerar a água como um bem econômico tem sido reconhecida como um componente essencial da gestão integrada de recursos hídricos (UN, 1992). Simultaneamente, no contexto da governança, a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997) reconhece a água como um recurso natural limitado dotado de valor econômico, e estabelece a cobrança pelo direito de uso como um dos instrumentos para a remuneração pela gestão e manutenção do serviço de provisão de água. Nesse sentido, se compreende a importância da valoração da água de modo a quantificar, em termos físicos e monetários, a contribuição do fluxo de provisão do recurso natural água para o bem-estar e o desenvolvimento econômico. O Sistema de Contas Nacionais publicado em 2008 (UN, 2008) também reconhece que os recursos hídricos precisam ser valorados, pois constituem uma parte importante da base do capital natural.

Diante da demanda crescente para o reconhecimento da água como bem econômico e a importância de sua valoração, a ONU desenvolveu um sistema de contabilidade satélite dos recursos naturais vinculada ao Sistema de Contas Nacionais, resultando, primeiramente, na publicação do Sistema de Contabilidade Econômica Ambiental da Água (UN, 2012) e, na sequência, na publicação do Quadro Central de Contabilidade Econômica Ambiental (UN, 2014). Ambos os manuais apresentam a metodologia para incorporação da água como fator de produção, isto é, relacionando o fluxo de produção das atividades econômicas ao fluxo de

uso da água em termos físicos, assim como apresentam os métodos de valoração da água usualmente aplicados.

No Brasil, a contabilidade proposta acima foi adotada e denominada Contas Econômicas Ambientais da Água – CEAAAs (IBGE e ANA, 2023), integrando dados físicos (volumes de água, estoques, fluxos) e econômicos (valores de produção, receita, custos de prestação de serviços) em uma estrutura estatística única. As CEAAAs se integram à contabilidade de outros recursos naturais, como energia, florestas e biodiversidade, e envolvem medição dos estoques de água, dos fluxos de retirada do meio ambiente para a economia, observação dos usos e retornos da água ao meio ambiente, e a avaliação dos valores monetários associados. Os resultados das CEAAAs são organizados em três grandes blocos:

- Tabelas de estoques, que apresentam o total de recursos hídricos renováveis, o volume captado como proporção desse volume, e os índices de consumo e razão de dependência;
- Tabelas de recursos e usos físicas, que detalham os volumes de retirada, uso, fornecimento e retorno da água para cada setor econômico e para as famílias; e
- Tabelas de recursos e usos híbridas, que relacionam os valores monetários da produção, consumo e custos associados à atividade de água e esgoto, eficiência de consumo por setor e famílias, além de custos unitários por volume captado ou tratado.

Como exemplo, em 2020 (último ano com dados publicados), para cada R\$ 1,00 gerado pela economia brasileira, foram consumidos 6,2 litros de água - indicador da intensidade hídrica do crescimento econômico. A abrangência da publicação é nacional e por grandes regiões.

No contexto de impacto de eventos de escassez hídrica, a valoração da água é importante para compreender a geração de renda das atividades econômicas subjacentes, permitindo estimar o valor em risco. Com base nesse conhecimento pode-se traçar medidas precisas de adaptação, que não resultem em elevados riscos remanescentes, mas tampouco cause má-adaptação, que é quando recursos escassos são direcionados de forma exagerada ou equivocada para esses esforços.

Embora existam diferentes técnicas para a valoração da água, há inúmeras dificuldades nesse exercício, não menos porque o valor da água é determinado por características locais e regionais específicas à bacia hidrográfica e suas tipologias de uso. Por exemplo, a água como insumo para a agricultura geralmente varia sazonalmente, pelo tipo do solo, do clima, da disponibilidade hídrica no solo e da pluviosidade, mas também pela demanda de mercado e o valor de produção da cultura específica. A disponibilidade, diversidade de tipologias de uso e a qualidade da água são importantes determinantes de seu valor. Essa natureza específica

a nível local implica que estimativas para uma dada situação podem não representar os valores para outras regiões.

8.3. EVENTOS DE CRISE HÍDRICA E PERDAS ECONÔMICAS

Após um evento extremo, qualquer alteração na disponibilidade de recursos naturais repercute tanto sobre a produtividade do estoque de capital (natural, físico ou humano) quanto sobre a capacidade das pessoas de utilizá-los e capturar seus benefícios. Segundo os dados do Atlas de Desastres Naturais no Brasil (MDR, 2025), entre 1991 e 2024 foram identificados, para o conjunto de municípios da bacia do rio Paraíba do Sul, um total de 303 eventos de inundação que geraram, a preços de 2024, um total de R\$ 2,65 bilhões em perdas econômicas, contabilizando danos materiais e prejuízos econômicos por atividades públicas e privadas interrompidas. Os eventos de inundação são vinculados explicitamente aos recursos hídricos, uma vez que se trata do processo em que ocorre a submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água, decorrentes geralmente de chuvas torrenciais. As inundações geram perdas relativas à produção agrícola comprometida, aos danos materiais aos bens móveis e imóveis que ficam submersos, além das atividades econômicas interrompidas pela presença das águas.

Na somatória dos municípios da bacia do rio Paraíba do Sul, também entre os anos de 1991 e 2024, foram também registrados 378 eventos de enxurrada, que causaram perdas econômicas de R\$ 14,47 bilhões. O alto valor das perdas é decorrente dos efeitos diretos das enxurradas, que costumam acontecer em áreas com relevo acidentado e podem, devido à alta energia do escoamento superficial que ocorre de forma brusca, arrastar pessoas, veículos e destruir infraestruturas. Embora não seja evento estritamente vinculado ao transbordamento da calha de um corpo d'água, pois pode também ser fruto de escoamento superficial em áreas urbanas (vinculado, portanto, à rede de drenagem), trata-se evidentemente de um fenômeno com repercussões bastante materiais, o que se evidencia pelo alto valor registrado em danos e prejuízos.

Eis que as crises hídricas decorrentes de escassez também geram prejuízos econômicos. Esses eventos são associados, mesmo que parcialmente, a períodos de precipitação abaixo da média histórica e geralmente incluem a elevação das temperaturas e das taxas de evapotranspiração, exatamente como se prevê aumentar em frequência e magnitude na bacia do rio Paraíba do Sul. Nota-se, no entanto, que os municípios da bacia registraram entre 1991 e 2024 (MDR, 2025) um total de 50 eventos de categoria "estiagem e seca". No total declarado de perdas, tem-se R\$ 452 milhões: embora montante relevante em termos absolutos, se apequena frente aos R\$ 17,58 bilhões registrados nos eventos de inundação e enxurradas.

Os eventos de escassez representam apenas 2,6% das perdas totais de desastres naturais hidrológicos, e não contemplam as perdas econômicas efetivas da escassez, tal como demonstra a aplicação de métodos adequados para tal.

Nos casos da escassez, estimar as perdas econômicas é fundamental para dimensionar a intensidade do impacto sofrido e, a partir disso, propor e implementar medidas que evitem prejuízos semelhantes no futuro - reconhecendo assim o risco hídrico. Essa análise, ao revelar os custos da escassez, implicitamente indica o valor da água pela sua ausência, e é importante para o planejamento frente às mudanças do clima e das perspectivas de agravamento de tais eventos. Os episódios de falta de água, afinal, apresentam características próprias: em geral, não ocorrem de forma isolada no tempo, mas como processos contínuos que podem se estender por meses ou até anos (Wilhite *et al.*, 2007; Ding *et al.*, 2010). Muitas vezes, não é simples determinar seu início e término, ainda mais por poderem abranger extensas áreas geográficas. Além disso, as crises hídricas por escassez raramente produzem danos materiais evidentes, especialmente sobre infraestrutura física.

Por esses motivos, a mensuração de perdas econômicas resultantes da escassez tende a ser mais complexa do que em outros tipos de desastres naturais. A literatura, mesmo em escala internacional, apresenta poucos trabalhos dedicados a quantificar tais impactos, e quando existentes, os esforços são pontuais e fragmentados. A definição de “crise hídrica” ou “seca” também varia de acordo com o contexto, sem uma uniformidade conceitual (Logar e Bergh, 2011). Consequentemente, há pouca uniformidade de práticas e base empírica para categorizar perdas diretas, indiretas, tangíveis e intangíveis decorrentes de um evento de escassez hídrica.

No contexto internacional, Banerjee *et al.* (2013) estimaram os custos da chamada Millennium Drought (Seca do Milênio) ocorrida no sudeste da bacia Murray-Darling, na Austrália, de 1997 a 2010. Utilizando relatórios governamentais com dados sobre gastos de recuperação, custos evitados e valores de mercado, explorando ainda a existência de um mercado de direitos de água na região, que possibilitou compras por parte do governo para atender usos prioritários, os autores identificaram um custo total de AUS\$ 810 milhões, considerando apenas despesas diretas de mitigação, recuperação e adaptação, com a cifra total superando em ordens de grandeza o valor encontrado.

De forma semelhante, Martin-Ortega e Markandya (2009) avaliaram os impactos econômicos da crise hídrica de 2007 e 2008 na Catalunha, Espanha, com ênfase na área metropolitana de Barcelona. Reconhecendo as dificuldades na estimação de perdas por estiagens, compilaram custos referentes a ações efetivamente implementadas como representativos da

ordem de grandeza das perdas, estimadas em cerca de 1% do Produto Interno Bruto – PIB regional em um ano, somando efeitos tangíveis e intangíveis; apenas para os tangíveis, o custo foi equivalente a 0,45% do PIB.

No Brasil, destaca-se o levantamento de Khan *et al.* (2005), que analisaram as secas de 1998 e 2001 no estado do Ceará, registrando queda de aproximadamente 70% nas receitas agrícolas em relação ao potencial estimado. De Nys *et al.* (2016) também analisaram as secas na região Nordeste do país, encontrando que, entre 1979 e 1983, estas provocaram reduções expressivas na produção agrícola: 72% no feijão, 82% no milho, 52% no arroz e 70% no algodão. Os autores desenvolveram um modelo econométrico com base em dados de produção para estimar a retração do valor bruto da produção agrícola na região em função de anos secos, cujos resultados apontaram quedas médias de 6,7% em 2010, 16,9% em 2012, 31% em 2013 e 13,6% em 2014. No triênio 2012-2014, as perdas corresponderam a cerca de 20% da receita agropecuária típica, com efeitos mais intensos sobre culturas temporárias que sobre perenes. Para a pecuária, a seca reduziu os rebanhos bovinos em aproximadamente 8% no período.

Constata-se, portanto, que a prática de estimar perdas decorrentes de crises hídricas ainda é pouco consolidada e permeada por limitações. Mesmo quando existem dados sobre medidas efetivamente executadas, seu uso envolve considerável margem de interpretação e decisão metodológica por parte do analista. Destaca-se, ainda, que são raras as publicações nacionais que estimem os custos de eventos climáticos em setores outros que não a agropecuária. Nesse contexto, dois estudos que realizaram tais estimativas são apresentados na sequência.

8.3.1. A crise hídrica no Sudeste - exemplo do Sistema Cantareira

O Sistema Cantareira, responsável por abastecer cerca de 47% da população da Região Metropolitana de São Paulo, enfrentou, nos anos de 2014 e 2015, uma severa crise hídrica que levou sua operação ao limite e gerou prejuízos econômicos relevantes, além de afetar diretamente a qualidade de vida da população. Nesse contexto, a *The Nature Conservancy* (TNC, 2024) conduziu um estudo voltado à quantificação dos benefícios hidrológicos e econômicos provenientes do fortalecimento da segurança hídrica por meio de investimentos em Soluções Baseadas na Natureza (SbN) nas áreas de mananciais que compõem o Cantareira. Como passo necessário para mensurar os benefícios das SbN, estimou-se o custo da crise hídrica mediante o uso corrente de ocupação do solo.

O trabalho partiu da premissa de que a proteção e recuperação das áreas de captação - por meio da conservação e restauração de ecossistemas naturais, combinadas a um ordenamento territorial adequado - são fundamentais para garantir sistemas de abastecimento

resilientes no longo prazo. Com essa base, o estudo realizou modelagens de cenários hidrológicos alternativos que incluíam diferentes níveis de adoção de SbN, apontando ganhos de resiliência durante períodos de estiagem e vazões reduzidas no sistema. A partir desses resultados, foi realizada uma valoração econômica para estimar os custos associados à baixa disponibilidade de água em eventos críticos e, assim, mensurar o benefício financeiro advindo da maior resiliência, mesmo que apenas conceitual.

A lógica seguida consistiu em, primeiramente, estimar as perdas econômicas decorrentes da crise hídrica de 2014-2015 e, em seguida, calcular o custo potencialmente evitado caso houvesse acréscimo nas vazões, emergindo da diferença entre essas perspectivas, os benefícios econômicos dos investimentos em SbN. Para o cálculo do custo da crise, foram analisadas variações no excedente do produtor, expresso pela renda líquida, em dois setores: indústria e serviços de água e esgoto. Como indicadores, utilizaram-se: (i) o Valor Adicionado Bruto (VAB) para a indústria; e (ii) o Valor Adicionado Líquido (VAL) para o setor de água e esgoto, este obtido subtraindo depreciação e amortização. A escolha do VAL para esse último setor ocorreu porque oferece medida mais próxima ao excedente econômico efetivo, enquanto, para a indústria, optou-se pelo VAB diante da falta de dados locais sobre depreciação e amortização.

A análise contemplou dois recortes territoriais: (i) o primeiro avaliou as perdas da indústria nos oito municípios integrantes do Sistema Cantareira, quais sejam: Bragança Paulista, Caieiras, Franco da Rocha, Joanópolis, Mairiporã, Nazaré Paulista, Piracaia e Vargem; e (ii) o segundo recorte englobou os municípios abastecidos pelo sistema para consumo humano: Caieiras, Francisco Morato, Franco da Rocha, Guarulhos, Osasco, Santo André, São Caetano do Sul e a capital paulista. Para cada cidade, foi ajustado o peso relativo da dependência hídrica, dado que algumas são parcialmente atendidas por outros sistemas integrados, enquanto outras fazem uso exclusivo do sistema avaliado.

As perdas de VAB e VAL foram calculadas com base em um cenário contrafactual, isto é, simulando a situação sem restrição hídrica. Para isso, consideraram-se as séries históricas: indústria (2002-2013) e setor de água e esgoto (2008-2013). Modelos de regressão projetaram o que seria o desempenho econômico em 2014 e 2015 sem a seca severa, e a diferença entre os valores estimados e os efetivamente observados foi definida como a perda líquida decorrente da crise.

Os resultados indicaram uma perda econômica total de R\$ 1,61 bilhão nos dois anos, sendo R\$ 1,08 bilhão (67%) atribuíveis ao setor industrial e R\$ 526,8 milhões (33%) ao de água e esgoto. No caso da indústria, 95% das perdas se concentraram em 2015, enquanto, no

segmento de serviços de água e esgoto, 2014 teve registrada a maior parcela, com 53% das perdas totais. Houve também concentração geográfica: em Caieiras, que abriga indústrias de papel e celulose, têxtil, plásticos e metalurgia, ocorreu cerca de 50% das perdas industriais; já São Paulo concentrou 75% das perdas de VAL no setor de água e esgoto.

8.3.2. A crise hídrica no Nordeste - exemplo dos rios Piancó-Piranhas-Açu

A Fundação Getúlio Vargas realizou, entre 2016 e 2018, uma completa análise do risco climático na bacia hidrográfica dos rios Piancó-Piranhas-Açu, abrangendo áreas dos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte (FGV, 2018). O estudo, realizado em parceria com a ANA, incorporou a proposição de medidas de adaptação à mudança do clima com base em análise de custo-benefício, valorando a água e o risco trazido pelas perspectivas de uma região hidrologicamente mais seca. Esse território, a exemplo de extensas áreas do semiárido, vivenciou uma acentuada redução na oferta de água entre junho de 2012 e junho de 2017, o que deu base para não apenas considerar cenários futuros, mas também avaliar o custo da crise hídrica que já havia se materializado. O levantamento fez uso de dados observados e os comparou com um cenário fictício no qual não haveria restrições hídricas, permitindo identificar como perdas econômicas o valor da produção que deixou de ser realizada em função da escassez.

A abordagem de valoração adotada se fundamentou, assim, no conceito de fator de produção, atribuindo à água o papel de insumo que sofreu variação devido à seca e que, por consequência, afetou elementos específicos dos sistemas produtivos dependentes desse recurso. O volume de água utilizado e as condições de produção influenciaram diretamente na receita obtida pelos setores usuários, tendo como base de valoração os preços de mercado. Para cada setor usuário, foram estabelecidas as relações de uso da água de forma específica, utilizando um método detalhado que quantifica apenas os prejuízos diretos dos sistemas analisados.

A modelagem hidrológica, que no semiárido é altamente dependente e determinada por reservatórios, apoiou-se na ferramenta de apoio à decisão AcquaNet, responsável por distribuir a água na bacia conforme suas características e prioridades de uso previamente estabelecidas - e alteradas para a realização de simulações de diferentes tipos de alocação. Foram realizadas simulações tanto com dados reais de vazão quanto com um contrafactual que presumiu inexistência de crise hídrica, permitindo calcular o valor que a falta da água acarretou.

Os resultados apontaram que, entre julho de 2012 e julho de 2017, a estiagem resultou em um prejuízo superior a R\$ 3 bilhões, cifra que representa 3,07% do Produto Interno Bruto da

bacia naquele período. Os principais achados incluem: (i) cerca de 40% da demanda hídrica projetada pela indústria não foi satisfeita; (ii) a irrigação respondeu por 62% do déficit hídrico, com aproximadamente 20% de sua demanda não atendida, destacando-se como o segmento com maior necessidade de água; (iii) o setor industrial concentrou 49% das perdas econômicas, em razão do alto valor de seu produto final; e (iv) o abastecimento animal figurou como o segundo segmento mais afetado do ponto de vista econômico, responsável por 21% dos prejuízos, mesmo com prioridade de atendimento garantida.

Ao se considerar impactos de segunda ordem, ou seja, os efeitos indiretos causados pelas perdas, o montante atingiria R\$ 21 bilhões - ou cerca de 20% do PIB local -, seis vezes e meia superior aos custos diretos apurados. Apesar de uma redução de 3% no PIB estimada em razão da seca, os dados revelam que o PIB da região não apresentou queda real. Após ajuste inflacionário pelo IPCA do IBGE, entre 2011 e 2012, os municípios da bacia observaram crescimento de 6,9%; no intervalo de 2012 a 2013, esse aumento foi de 4,4%; e de 2013 a 2014, de 6,3% (à época, último ano com dados disponíveis).

Mais que uma contradição, a diferença entre o elevado custo econômico da escassez hídrica e o resultado positivo do PIB local reflete, em grande parte, o êxito das estratégias implementadas para mitigar os impactos negativos. Afinal, de acordo com De Nys *et al.* (2016), as principais ações adotadas no enfrentamento à seca no Nordeste brasileiro foram: (i) o programa Garantia-safra, que transfere renda a agricultores afetados por eventos extremos; (ii) comercialização de milho subsidiado para a pecuária devido à perda de pastagens; (iii) distribuição de água via carro-pipa; (iv) perfuração de poços; (v) concessão de crédito emergencial e renegociação de dívidas do setor agrícola; e (vi) o Bolsa Estiagem, auxílio temporário destinado a famílias vulneráveis atingidas pela seca. Embora tais medidas, por si só, não ampliem de forma estrutural a renda, acabam por sustentar (ou até incrementar) o PIB regional. Grandes obras, como a Integração do Rio São Francisco e o reservatório de Oiticica, também contribuem para dinamizar a economia local.

Importante destacar que o desempenho econômico positivo da área estudada não implica ausência de custos provocados pela escassez hídrica; ao contrário, indica que tais perdas foram repartidas - e em certos casos compensadas - por transferências provenientes de outras regiões ou do governo. É possível que, mesmo sem a crise hídrica, essas transferências ocorressem, permitindo que tanto os moradores da bacia quanto de outras áreas do país estivessem em condição socioeconômica superior. O fato de o impacto da seca ter magnitude significativamente acima do verificado em estudos internacionais reforça a alta vulnerabilidade

da região e sublinha a relevância de aprofundar pesquisas sobre diferentes estratégias de adaptação hídrica.

9. IMPACTOS ECONÔMICOS E SOCIAIS NA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL

Conforme observado nos capítulos precedentes, a mudança do clima é um fenômeno multifacetado - principalmente quando se avalia sua influência a partir das repercussões nos recursos hídricos. O conceito-chave para a identificação, quantificação e valoração dos impactos econômicos hidrológicos é a noção de risco, que permeia toda a mecânica adotada. Conforme Cardona *et al.* (2012), o risco se dá no cruzamento entre:

- Uma ameaça, evento ou perigo: ocorrência de eventos físicos, naturais ou induzidos pelo homem, que possam ter efeitos adversos sobre elementos vulneráveis e expostos;
- A exposição à ameaça: sistemas naturais, humanos ou econômicos em uma área em que a ameaça ou evento ou perigo de risco pode ocorrer; e
- A vulnerabilidade frente à ameaça: a propensão dos sistemas expostos a sofrer efeitos adversos quando impactados pela ameaça, característica dos processos sociais e ambientais que dão a susceptibilidade ou resiliência para lidar com tal acontecimento.

Nota-se que é possível estar exposto a um determinado risco, porém não vulnerável. No entanto, para ser vulnerável, é condição necessária estar exposto.

Neste capítulo, são apresentadas análises relacionadas à avaliação da eficiência do uso da água envolvendo aspectos produtivos e relação de ganhos econômico-financeiros em relação a cada metro cúbico de água consumido por produto. Essas análises são subdivididas por setor produtivo em função de seus usos da água e por Unidade de Planejamento.

9.1. IMPACTOS RELACIONADOS AO DÉFICIT HÍDRICO

Conforme demonstra o Capítulo 7, a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul está sujeita à ocorrência de déficits hídricos, ocasiões nas quais a quantidade de água demandada por seus usuários supera a disponibilidade hídrica. Nesse contexto, a mudança do clima se torna um agravante da situação de risco já existente, que pode ser denominado de "risco de base". Evidentemente, o cálculo do risco precedente já inclui o efeito das mudanças do clima que se fazem inscritas nas séries pregressas que dão base para a análise; outrossim, tem-se nessa forma de análise o reconhecimento de um agravamento na situação conhecida, motivada pelas perspectivas de continuidade no agravamento da mudança do clima.

Conforme observado nos capítulos anteriores, o risco do clima se desdobra em ocorrências crônicas e agudas. No primeiro caso, tem-se mudanças paulatinas nas variáveis climáticas, de forma a configurar um "novo normal", no qual deve haver um agravamento permanente

das condições de risco. Especificamente para o risco hídrico, a interpretação das mudanças crônicas traça paralelo às novas condições de vazão de referência ($Q_{95\%}$ e $Q_{7,10}$), na qual as garantias são alteradas em linha com as alterações das demandas hídricas. Por sua vez, os desdobramentos agudos da mudança do clima retratam a ocorrência de um evento episódico, e não permanente no tempo. Ambos os efeitos (crônicos e agudos) geram potenciais aumentos no risco hídrico, mas são interpretados de forma distinta e complementar. Afinal, um episódio agudo de onda de calor se dá sobre o clima "normal" do futuro, que está sob influência das mais elevadas temperaturas e maiores concentrações de vapor d'água na atmosfera.

Ambos os efeitos (crônicos e agudos) são tratados na sequência, em contraste com o risco de base. Para todas as situações, os impactos econômicos e sociais relacionados ao déficit hídrico são estimados a partir do balanço hídrico. O presente item, portanto, subdivide-se na metodologia de mensuração, na estimativa dos impactos físicos (volumétricos), e posteriormente na tradução desse impacto em valores em risco econômicos e sociais, tanto na situação de base, quanto na situação crônica e aguda agravada pela continuidade da mudança do clima.

9.1.1. Metodologia para consideração dos impactos relacionados ao déficit hídrico

De forma a se compreender o impacto econômico e social do déficit hídrico previsto sob situação futura, aplica-se o seguinte roteiro metodológico:

- Quantifica-se o risco hídrico associado aos resultados do balanço hídrico superficial no cenário de Maior Pressão para o ano de 2045, ainda sem a inclusão dos efeitos da mudança do clima, à luz do risco hídrico desenvolvido no Plano Nacional de Segurança Hídrica – PNSH (ANA, 2019);
- Quantifica-se o valor econômico associado à captação de água superficial na bacia, a partir do Sistema de Contabilidade Econômica Ambiental da Água da ONU e sua aplicação nacional Contas Econômicas Ambientais da Água (IBGE e ANA, 2023), considerando as outorgas de uso de água superficial na bacia do rio Paraíba do Sul, segregadas nas classificações acerca da finalidade desse uso;
- Calcula-se o valor econômico e a quantidade de pessoas em risco hídrico superficial, sob cenário de Maior Pressão para o ano de 2045, sem os efeitos da mudança do clima (risco de base);
- Quantifica-se o risco hídrico adicional associado aos resultados do balanço hídrico superficial em 2045 devido aos efeitos da mudança do clima, tanto crônicos (situação futura permanente) quanto agudos (evento episódico de onda de calor);

- Calcula-se o valor econômico e a quantidade de pessoas em risco hídrico superficial adicional à situação de base, devido ao efeito previsto da mudança do clima no balanço hídrico.

A resultante dos passos metodológicos é a estimativa dos impactos econômicos e sociais do déficit hídrico de base e agravado pela mudança do clima. O roteiro acima é parcialmente derivado da metodologia desenvolvida no Plano Nacional de Segurança Hídrica – PNSH (ANA, 2019), que adota a seguinte definição de segurança hídrica: "*disponibilidade de água em quantidade e qualidade aceitáveis para atendimento a todos os usos com um aceitável grau de risco*", ou seja, que conceitua o risco hídrico diretamente pelo balanço hídrico.

Conforme o PNSH, os riscos hídricos podem ser dimensionados a partir da ótica humana e econômica. O risco hídrico humano é referente à parcela da população exposta à possibilidade de não ter sua demanda por água suprida, ou seja, ao risco de desabastecimento hídrico para consumo humano. Pode-se quantificar tanto os habitantes sujeitos à escassez, quanto o valor econômico associado ao uso do recurso hídrico pela população, espelhando as melhores práticas de valoração dos recursos naturais. Já o risco hídrico econômico diz respeito ao potencial de perdas econômicas associadas à insuficiência de água para atividades produtivas, especialmente agricultura irrigada, pecuária e uso industrial. A valoração do risco hídrico econômico é feita em termos monetários, associando o valor da produção em potencial comprometido por déficits hídricos.

A disponibilidade hídrica crítica de uma determinada ambiência é determinada com base nas vazões de restrição, que pode ser adotada como uma garantia de 95% do tempo, ou seja, pela vazão $Q_{95\%}$, ou ainda em métricas equivalentes, como a $Q_{7,10}$. A vazão de restrição representa a adoção de um grau de risco subjacente para o atendimento às demandas. Com base na $Q_{95\%}$ como exemplo, tem-se um risco aceitável de 5%, pois historicamente as vazões são maiores ou iguais a esta durante 95% do tempo. A partir da vazão disponível, adota-se como premissa a outorga para usos consuntivos de no máximo uma fração desse volume (tipicamente de 50%), considerando-se implicitamente que a fração resultante deva permanecer no curso d'água para fins ecossistêmicos, sendo por vezes denominada de vazão mínima remanescente ou ecológica. Dada a disponibilidade hídrica e as quantidades demandadas para cada um dos usuários, o resultado do balanço hídrico (demanda sobre disponibilidade) atesta o grau de atendimento.

Segundo o PNSH (2019), quanto mais abundante o recurso hídrico for, menor é o risco hídrico associado, muito embora se compreenda que qualquer exposição detenha, inerentemente, um componente de vulnerabilidade intrínseca. Dessa forma, mesmo que o resultado do

balanço hídrico seja inferior a 100% (ou seja, que haja mais água disponível, dada a vazão de referência, frente às demandas), tem-se uma situação de insegurança que reflete as incertezas inerentes às projeções hidrológicas e de demanda, bem como a possibilidade de ocorrência de eventos extremos não contemplados na vazão de referência utilizada no dimensionamento. O PNSH denomina esse risco de "inerente", e propõe que sua mensuração se dê de forma progressivamente maior à medida que o resultado do balanço hídrico se aproxima da unidade (100%), em função de potência. Ou seja, quanto mais próximo ao limiar do déficit hídrico, mas mesmo antes de sua ocorrência, identifica-se uma parcela crescente de "risco inerente", como demonstra a Figura 9-1.

Figura 9-1 – Relação entre o balanço hídrico e o risco hídrico inerente



Fonte: elaborado pelo Consórcio a partir do PNSH (ANA, 2019)

Como se nota, o risco inerente pode ser computado pela função de proximidade do balanço hídrico ao limite do pleno atendimento (100%), e quanto mais próximo a ele, observam-se riscos que aumentam mais que proporcionalmente (função geométrica). A título de exemplo da leitura da relação aposta, tem-se as seguintes associações entre os resultados de balanço hídrico e os graus aproximados de risco hídrico inerente: com 55% de balanço, o risco é de aproximadamente 0,09; com 65%, é de 0,18; um resultado de 75%, de 0,32; já um resultado de 85% indica um grau de risco de cerca de 0,52; e por fim, um de 95% indica risco de cerca de 0,81. Para fins de simplificação, adota-se como critério que apenas resultados de balanço hídrico superiores a 50% passam a estar sob risco inerente, haja vista que os graus de risco inferiores a esse limiar são bastante próximos a zero.

A partir da ocorrência de um balanço hídrico com resultado superior à 100%, o grau de risco passa a ser 1, pois há a materialização de uma demanda hídrica que está prestes a não ser mais atendida (mediante a vazão de referência adotada). Essa situação configura, portanto,

uma insegurança maior do que aquela inerente, sendo denominada, a partir desse momento, de "risco pós-déficit" (ANA, 2019). Dessa maneira, definem-se os dois componentes do risco hídrico, que se dá pela situação de risco inerente ou de risco pós-déficit (balanço superior a 100%).

A definição da curva de risco hídrico é crescente, mas não linear, permitindo calcular, para cada nível de balanço hídrico até 100%, a gravidade de ocorrência oriunda da materialização do risco de escassez. Observa-se, outrossim, que a curva não lida de forma explícita com a permanência do evento de escassez, apenas com a magnitude em caso de ocorrência. Não há, inclusive, uma medida probabilística que embute no balanço hídrico esse essencial aspecto da materialização do risco, tal como foi abordado no Capítulo 8. De forma a manter a razoabilidade da análise e estimar a duração associada ao risco hídrico, pode-se realizar uma leitura dessa possível faceta a partir da própria magnitude prevista do déficit.

- Dada uma situação de balanço hídrico de 120%, por exemplo, sabe-se que a materialização do risco comprometerá toda a magnitude da demanda hídrica (ou seja, toda a demanda estará sob risco), pois é grau 1, ou seja, pós-déficit. Não obstante, o nível de superação das demandas em relação à disponibilidade sugere uma manifestação do risco com durabilidade potencialmente curta, que perdura - por exemplo - durante o trimestre mais seco do ano. Embora a situação seja de insegurança, o sistema ainda deve apresentar capacidade de se recuperar em períodos sequenciais mais úmidos, limitando as perdas decorrentes.
- Por outro lado, supondo a materialização do risco em uma otobacia na qual o resultado de balanço hídrico é de 250%, pode-se vislumbrar a ocorrência de um episódio mais duradouro e/ou mais grave, pois a resiliência em termos de reservação e capacidade de recuperação nos períodos úmidos sequenciais tende a ser prejudicada. Ou seja, nessas situações há pouca "folga" no balanço hídrico para absorver variações climáticas, o que leva à suposição de que a materialização da ameaça ocorra de forma mais duradoura nessa segunda situação (balanço hídrico de 250%) do que na primeira situação (balanço hídrico de 120%).

O racional apostado é de que um mesmo evento de escassez - de durabilidade desconhecida - deve trazer repercussões distintas para cada usuário a depender da condição de "folga" de balanço hídrico verificado em cada ambiência. Trata-se, evidentemente, de uma inferência de duração, pois o balanço hídrico é uma fotografia de uma garantia hidrológica e não representa, *per se*, a dinâmica temporal do déficit. Essa duração depende, além da variabilidade

hidrológica e climática, de regulações, transferências, reservas, e operação de sistemas, os quais são tratados em outras dimensões fora do próprio indicador de balanço.

De toda forma, enfim, assume-se que o resultado do balanço hídrico possa, também, funcionar como um indicativo da duração do risco, e não apenas de sua magnitude. Em termos práticos, adotam-se arbitrariamente, as seguintes associações em faixas de durabilidade: (i) para o risco que se manifesta de forma inerente (na situação pré-déficit), supõe-se um evento de durabilidade de um único mês; (ii) para o risco pós-déficit de 100% até 200% (ou seja, que chega até ao dobro de demanda para uma dada disponibilidade), supõe-se um evento de durabilidade de três meses; (iii) para o risco pós-déficit de até 300% (demanda 3 vezes superior à disponibilidade), supõe-se um evento de durabilidade de seis meses; e, finalmente, (iv) para o risco pós-déficit superior a 300%, supõe-se um evento de durabilidade de doze meses.

Em resumo, faz-se uso do resultado do balanço hídrico para se obter duas leituras complementares de risco hídrico, quais sejam: (i) a gravidade do risco, dada de forma direta pelo percentual da demanda hídrica que está estruturalmente sem atendimento garantido, dividida em risco inerente (antes do balanço atingir 100%) e risco pós-déficit que, como o nome indica, ocorre com a superação da disponibilidade; e (ii) a duração do risco, medida de forma indireta pela magnitude da demanda que está, em uma situação pós-déficit, descoberta.

9.1.2. Risco hídrico de base (sem efeito das mudanças do clima)

Estimativa do risco físico de base

Depois de definida a mensuração do risco hídrico em seus aspectos complementares de gravidade e de duração da ocorrência, torna-se possível realizar a leitura do balanço hídrico sob cenário de Maior Pressão para o ano de 2045, pelo qual se identificam os graus de atendimento à demanda. Para fins de mensuração do valor em risco da demanda hídrica, compilou-se o grau de atendimento de cada uma das mais de três mil e quatrocentas outorgas de uso de recursos hídricos superficiais que compuseram o Produto 3 do presente estudo, cuja vazão máxima totaliza 48,71 m³/s. Essas interferências, que são associadas a um curso d'água específico e avaliadas pelo balanço hídrico a nível de ottobacia, são discretas não apenas espacialmente, como também pela finalidade de uso. Retoma-se que, pela base de outorgas dos órgãos competentes, as finalidades são classificadas como: abastecimento humano urbano; abastecimento humano rural; consumo industrial; dessedentação animal; irrigação; mineração; e outros. Há, ainda, uma classe de finalidades não informadas.

Torna-se possível calcular a quantidade de interferências por finalidade de uso - dentre as que têm outorga para captação superficial - que estão sob risco hídrico, segregando-se ainda a classificação de sua durabilidade. O Quadro 9-1 e o Quadro 9-2 apresentam esse quantitativo, que aponta para a existência do risco hídrico de base no cenário futuro de 2045 sob maiores pressões de crescimento. A nomenclatura "de base" se deve ao fato que ainda não estão articulados os efeitos da mudança do clima, que se sobrepõe a tal risco. Para a vazão de referência $Q_{95\%}$, verifica-se um total de 481 interferências sob alguma classe de risco hídrico, o que representa 14% do total. A finalidade de uso com a maior quantidade de interferências sob risco é a irrigação, com um total de 167, o que indica que de todas as outorgas desse importante setor usuário, 40% estão sob algum grau de risco (25% delas em risco inerente e 39% no oposto, risco pós-déficit superior a 300%). Verifica-se que a utilização da vazão de referência $Q_{7,10}$, que é mais restritiva, incrementa a quantidade de interferências sob risco.

Quadro 9-1 – Quantidade de interferências sob risco hídrico sob vazão $Q_{95\%}$, por finalidade de uso, no Cenário de Maior Pressão (2045) sem mudança do clima (risco de base)

Finalidade de uso	Total de interferências	Interferências sob risco na vazão $Q_{95\%}$			
		Risco Inerente	Pós-Déficit (até 200%)	Pós-Déficit (até 300%)	Pós-Déficit (>300%)
Abastecimento Humano Rural	576	47	9	3	5
Abastecimento Humano Urbano	344	9	10	0	4
Consumo industrial	262	18	12	4	33
Dessedentação animal	97	12	4	0	7
Irrigação	416	41	44	17	65
Mineração	493	15	18	27	54
Não informado	101	0	0	0	1
Outros	1130	9	7	1	5
TOTAL	3419	151	104	52	174

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 9-2 – Quantidade de interferências sob risco hídrico sob vazão $Q_{7,10}$, por finalidade de uso, no Cenário de Maior Pressão (2045) sem mudança do clima (risco de base)

Finalidade de uso	Total de interferências	Interferências sob risco na vazão $Q_{7,10}$			
		Risco Inerente	Pós-Déficit (até 200%)	Pós-Déficit (até 300%)	Pós-Déficit (>300%)
Abastecimento Humano Rural	576	41	20	2	10
Abastecimento Humano Urbano	344	8	12	1	11
Consumo industrial	262	12	20	3	37
Dessedentação animal	97	9	12	1	10
Irrigação	416	45	35	25	77
Mineração	493	15	18	23	66

Finalidade de uso	Total de interferências	Interferências sob risco na vazão $Q_{7,10}$			
		Risco Inerente	Pós-Déficit (até 200%)	Pós-Déficit (até 300%)	Pós-Déficit (>300%)
Não informado	101	3	1	0	1
Outros	1130	15	9	4	7
TOTAL	3419	148	127	59	219

Fonte: elaborado pelo Consórcio.

Para cada uma das interferências, as vazões outorgadas foram convertidas em volume anual de utilização do recurso hídrico, permitindo obter assim a quantidade absoluta de água que é demandada superficialmente na bacia do rio Paraíba do Sul por meio de outorgas. Para os usos econômicos da água, pressupõe-se que o volume efetivo de captação é equivalente ao volume outorgado, mesmo sabendo-se ser uma simplificação. Justifica-se essa premissa em função dos cálculos decorrentes serem pertinentes à gestão de risco, na qual é importante poder fazer uso estratégico das captações até os limites superiores das outorgas, de forma a manejar eventuais períodos de maior demanda (sejam motivadas por fins industriais-produtivos, mercadológicos, ou mesmo por fins de restrição hídrica).

Para calcular o volume hídrico sob risco, faz-se a leitura da ocorrência do risco inerente e do risco pós-déficit de cada interferência, associando-se para tanto o grau de risco respectivo do balanço hídrico no cenário de interesse - o de Maior Pressão pelos recursos hídricos no ano de 2045. Nota-se que esse mesmo cenário, nos itens a seguir, será lido com base no aumento da demanda e concomitante redução na disponibilidade gerada pelas mudanças do clima.

Em termos práticos, exemplifica-se com uma outorga de consumo industrial de 100 mil m^3 por ano (vazão de 3,17 L/s). Caso a captação dessa indústria esteja localizada em um manancial cujo resultado de balanço hídrico seja de 120%, tem-se um risco pós-déficit, ou seja, grau de risco 1. Isso significa que a totalidade de sua demanda por água (todo o volume) se encontra sob risco. Já caso a captação da indústria se encontre em uma otobacia cujo resultado de balanço hídrico seja de 70%, tem-se um grau de risco inerente de 0,24 (conforme leitura da Figura 9-1). Torna-se possível, nesse segundo caso, multiplicar o grau de risco pela demanda anual da indústria, estimando-se assim um volume sob risco inerente equivalente a 24 mil m^3 .

Fazendo esse uso do grau de risco, o mesmo cálculo é aplicado para as demais finalidades de uso das águas, permitindo computar os volumes totais demandados anualmente para captação superficial que estão sob alguma forma em situação de risco hídrico. A metodologia aqui desenvolvida permite realizar a associação de cada interferência ao resultado do balanço hídrico e, por meio deste, estimar o volume hídrico sob risco. Dessa forma, a materialização de um episódio de escassez resulta, potencialmente, em um evento de magnitude e

durabilidade conhecidas, o que permite realizar a multiplicação simples em relação ao volume sob risco - que está exposto e vulnerável ao evento (conforme introdução desse capítulo).

No Quadro 9-3, encontram-se os resultados obtidos para este que se define como o risco hídrico físico, ou seja, o volume de captação superficial que está sob risco. Na primeira coluna, somam-se os valores de captação superficial que estão expostos ao risco hídrico; já nas demais colunas, apresentam-se os resultados dos volumes (em valor absoluto e relativo) que estão efetivamente sob risco hídrico, pois não apenas estão expostos, mas sim vulneráveis. São apresentados os resultados para as vazões de restrição $Q_{95\%}$ e $Q_{7,10}$, de acordo com os resultados dos balanços hídricos apresentados no Capítulo 7.

Quadro 9-3 – Risco hídrico físico de captação superficial no Cenário de Maior Pressão (2045) sem mudança do clima (risco de base) - total de interferências

UP	Volume Captado Total (mil m ³ /ano)	Volume sob risco ($Q_{95\%}$)		Volume sob risco ($Q_{7,10}$)	
		mil m ³	%	mil m ³	%
1 - Alto Paraíba do Sul	622.448	72.332	11,62%	77.978	12,53%
2 - Rios Preto e Paraibuna	89.199	6.898	7,73%	7.586	8,50%
3 - Rios Pomba e Muriaé	242.831	21.913	9,02%	33.242	13,69%
4 - Médio Paraíba do Sul	286.966	3.510	1,22%	3.689	1,29%
5 - Piabanha	69.984	4.801	6,86%	6.404	9,15%
6 - Rio Dois Rios	24.734	2.463	9,96%	2.930	11,84%
7 - Baixo Paraíba do Sul	190.381	11.257	5,91%	11.915	6,26%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	10.178	1	0,01%	10	0,10%
Total Geral	1.536.721	123.175	8,02%	143.754	9,35%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

O Quadro 9-3 traz a mensuração do risco hídrico físico (volumétrico) total para captação superficial no Cenário de Maior Pressão (2045) sem mudança do clima, ou seja, o risco de base. Nos próximos itens, esse risco de base será majorado pela consideração da mudança do clima. Por enquanto, cabe observar que uma fração significativa do volume captado se encontra sob risco hídrico no cenário de 2045: na vazão de referência $Q_{95\%}$, tem-se um volume equivalente a 8,0% das demandas totais, e a vazão de referência $Q_{7,10}$, esse percentual sobe para 9,4%. Essa proporção é superior àquela de ottobacias que se encontram com balanços hídricos superiores a 100%, uma vez que aqui são consideradas as interferências de forma espacialmente discreta e ponderada pelo volume em risco. Ou seja, caso apenas uma ottobacia atenda a muitas interferências, ou a poucas, mas intensas interferências, e esteja sob risco, pesará proporcionalmente mais do que uma grande quantidade de ottobacias com balanço hídrico comprometido, mas que atendem apenas a uma ou outra captação, ou ainda à várias captções de pequeno volume. Além disso, é possível observar que as unidades de

planejamento não contemplam riscos equivalentes - enquanto a dos rios Pomba e Muriaé, por exemplo, apresentam as maiores frações sob risco, a do médio Paraíba do Sul conta com uma situação muito mais confortável, embora os volumes captados nessa última sejam superiores aos da primeira. Trata-se, evidentemente, do reflexo de uma maior disponibilidade hídrica, o que faz com que apenas em locais muito críticos haja risco de desabastecimento.

Os resultados apresentados acima são referentes à totalidade das interferências sob risco, podendo-se também segregá-los por finalidade de uso. Os quadros a seguir expostos apresentam esses resultados por setores usuários, quais sejam: indústria e mineração (Quadro 9-4), consumo humano (Quadro 9-5), agropecuária, que considera conjuntamente os usos de irrigação e dessedentação animal (Quadro 9-6), e os outros usos e outorgas não discriminadas (Quadro 9-7).

Quadro 9-4 – Risco hídrico físico de captação superficial no Cenário de Maior Pressão (2045) sem mudança do clima (risco de base) - indústria e mineração.

UP	Volume Captado Total (mil m ³ /ano)	Volume sob risco (Q _{95%})		Volume sob risco (Q _{7,10})	
		mil m ³	%	mil m ³	%
1 - Alto Paraíba do Sul	205.368	62.084	30,23%	63.521	30,93%
2 - Rios Preto e Paraibuna	47.878	3.926	8,20%	4.587	9,58%
3 - Rios Pomba e Muriaé	33.789	4.845	14,34%	5.609	16,60%
4 - Médio Paraíba do Sul	160.661	3.217	2,00%	3.251	2,02%
5 - Piabanha	10.942	4.079	37,28%	4.344	39,70%
6 - Rio Dois Rios	6.118	943	15,42%	1.058	17,30%
7 - Baixo Paraíba do Sul	32.732	2.479	7,57%	2.899	8,86%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	4.305	1	0,02%	5	0,13%
Total Geral	501.791	81.574	16,26%	85.275	16,99%

Fonte: elaborado pelo Consórcio.

Quadro 9-5 – Risco hídrico físico de captação superficial no Cenário de Maior Pressão (2045) sem mudança do clima (risco de base) - consumo humano.

UP	Volume Captado Total (mil m³/ano)	Volume sob risco (Q _{95%})		Volume sob risco (Q _{7,10})	
		mil m³	%	mil m³	%
1 - Alto Paraíba do Sul	210.112	383	0,18%	1.904	0,91%
2 - Rios Preto e Paraibuna	28.806	0	0,00%	24	0,08%
3 - Rios Pomba e Muriaé	131.428	11.110	8,45%	18.511	14,08%
4 - Médio Paraíba do Sul	120.055	141	0,12%	221	0,18%
5 - Piabanha	57.102	639	1,12%	1.977	3,46%
6 - Rio Dois Rios	16.930	1.142	6,74%	1.419	8,38%
7 - Baixo Paraíba do Sul	90.155	1.976	2,19%	2.159	2,40%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	5.411	1	0,01%	4	0,08%
Total Geral	659.998	15.391	2,33%	26.219	3,97%

Fonte: elaborado pelo Consórcio.

Quadro 9-6 – Risco hídrico físico de captação superficial no Cenário de Maior Pressão (2045) sem mudança do clima (risco de base) - agropecuária.

UP	Volume Captado Total (mil m³/ano)	Volume sob risco (Q _{95%})		Volume sob risco (Q _{7,10})	
		mil m³	%	mil m³	%
1 - Alto Paraíba do Sul	144.720	9.864	6,82%	12.549	8,67%
2 - Rios Preto e Paraibuna	2.140	344	16,07%	347	16,19%
3 - Rios Pomba e Muriaé	33.809	5.748	17,00%	7.267	21,49%
4 - Médio Paraíba do Sul	434	151	34,85%	208	47,97%
5 - Piabanha	317	83	26,13%	83	26,25%
6 - Rio Dois Rios	1.143	312	27,31%	361	31,62%
7 - Baixo Paraíba do Sul	54.683	6.802	12,44%	6.857	12,54%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	398	0	0,00%	0	0,03%
Total Geral	237.644	23.304	9,81%	27.673	11,64%

Fonte: elaborado pelo Consórcio.

Quadro 9-7 – Risco hídrico físico de captação superficial no Cenário de Maior Pressão (2045) sem mudança do clima (risco de base) - outros usos e não discriminados.

UP	Volume Captado Total (mil m³/ano)	Volume sob risco (Q _{95%})		Volume sob risco (Q _{7,10})	
		mil m³	%	mil m³	%
1 - Alto Paraíba do Sul	62.249	1	0,00%	4	0,01%
2 - Rios Preto e Paraibuna	10.376	2.628	25,33%	2.628	25,33%
3 - Rios Pomba e Muriaé	43.806	210	0,48%	1.855	4,24%
4 - Médio Paraíba do Sul	5.815	0	0,00%	8	0,14%
5 - Piabanha	1.623	0	0,00%	0	0,03%
6 - Rio Dois Rios	543	66	12,20%	91	16,72%
7 - Baixo Paraíba do Sul	12.811	0	0,00%	0	0,00%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	65	0	0,00%	0	0,00%
Total Geral	137.287	2.906	2,12%	4.587	3,34%

Fonte: elaborado pelo Consórcio.

A análise setorial dos volumes hídricos sob risco de escassez revela algumas disparidades: o setor de indústria e mineração apresenta a maior vulnerabilidade relativa, com 16,26% e 16,99% do volume captado sob risco nas vazões respectivas Q_{95%} e Q_{7,10}, totalizando aproximadamente 81,57 a 85,28 milhões de m³/ano em situação de risco. Em contrapartida, o consumo humano, que representa o maior volume absoluto de captação outorgada (660,00 milhões de m³/ano), demonstra menor exposição ao risco, com apenas 2,33% na vazão de referência Q_{95%} e 3,97% na Q_{7,10}. A agropecuária ocupa posição intermediária, com 9,81% a 11,64% do volume sob risco, representando cerca de 23,30 a 27,67 milhões de m³/ano nessa situação.

Do ponto de vista territorial, a unidade de planejamento Piabanha se destaca pela vulnerabilidade do setor industrial, com 37,28% a 39,70% dos volumes sob risco, seguida pela do Alto Paraíba do Sul, que concentra os maiores volumes absolutos em risco para indústria e mineração (62,08 a 63,52 milhões de m³/ano). Já no Médio Paraíba do Sul, a situação se apresenta mais crítica para a agropecuária, com 34,85% a 47,97% dos volumes sob risco, apesar do volume total ser relativamente pequeno. Nota-se que a UP do Rio Pirai se mantém como a menos vulnerável em todos os setores, com riscos próximos a zero.

Impacto econômico do risco hídrico de base

A partir da mensuração do risco físico, pode-se relacionar os volumes hídricos com a respectiva produtividade econômica que gerariam, dando origem à valoração do valor econômico sob risco. Conforme as notas metodológicas no início desse item, a forma de mensuração do valor econômico da água na economia foi desenvolvida pelo Sistema de Contabilidade Econômica Ambiental da Água da ONU (2012), sendo que a aplicação no Brasil

se dá pelo Contas Econômicas Ambientais da Água (CEAA), realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE em parceria com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (IBGE e ANA, 2023). O CEAA apresenta uma detalhada análise sobre a oferta e o uso da água no país, cobrindo os anos entre 2013 e 2020 e integrando dados físicos e monetários.

Dos diversos resultados apresentados pela contabilidade, destacam-se as Tabelas de Recursos e Usos Híbridas que, como sugere o nome, integram informações físicas e monetárias sobre os fluxos hídricos na economia brasileira e permitem a construção de indicadores de eficiência. Esses indicadores são construídos a partir da relação dos dados do Sistema de Contas Nacionais⁸ com as informações físicas sobre captação, fornecimento e uso da água dentro da economia, proporcionando uma análise combinada em uma única estrutura metodológica. As tabelas híbridas distinguem os conceitos de uso e de consumo de água, uma vez que representam fluxos distintos no sistema econômico: (i) o uso de água se refere ao volume total retirado do meio ambiente ou fornecido por outras atividades econômicas para atender às demandas produtivas, incluindo tanto a água que é efetivamente consumida quanto aquela que retorna ao sistema após utilização; (ii) já o consumo de água, por sua vez, representa especificamente a parcela do volume utilizado que não retorna ao meio ambiente ou ao sistema econômico, sendo incorporada aos produtos, evaporada ou perdida durante o processo produtivo.

Nas tabelas híbridas, os indicadores de eficiência do uso e do consumo de água permitem calcular a intensidade hídrica por unidade monetária produzida em cada uma das atividades econômicas, ou seja, qual o valor de uso e de consumo em R\$/m³. O nível de agregação das atividades econômicas é alto, sendo que sete setores englobam toda a atividade econômica. O Quadro 9-8 apresenta os resultados dos indicadores de eficiência do consumo e do uso de água específicos para a região Sudeste do país, na qual se localiza, integralmente, a bacia do rio Paraíba do Sul. Os resultados do CEAA para o ano 2020 foram corrigidos pelo Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), trazendo-os para valores referentes ao ano de 2024.

⁸ Sistema padronizado para medir a atividade econômica do país, incluindo métricas de valor agregado por setor de atividade econômica.

Quadro 9-8 – Indicadores híbridos de eficiência no consumo e no uso de água na região Sudeste do Brasil

Setor Econômico	Eficiência da água R\$/m ³ em 2020		Eficiência da água R\$/m ³ em 2024*	
	Consumo	Uso	Consumo	Uso
Agricultura, pecuária, produção florestal, pesca e aquicultura	1,11	0,69	1,42	0,88
Agricultura, pecuária, produção florestal, pesca e aquicultura (sem água do solo)	9,98	8,71	12,74	11,12
Indústrias extrativas	826,21	224,80	1.054,99	287,05
Indústrias de transformação e construção	373,26	199,43	476,62	254,65
Eletricidade e gás	2.002,25	0,03	2.556,67	0,04
Água e esgoto	19,16	0,89	24,47	1,14
Demais atividades	41.639,11	2.779,48	53.168,98	3.549,12
Total das atividades econômicas	38,68	1,66	49,39	2,12

* Aplicação de correção monetária pelo IPCA entre jan./2021 e dez./2024 (27,69%), arredondados à segunda casa decimal

Fonte: Contas Econômicas Ambientais da Água (IBGE e ANA, 2023).

Observa-se que os setores econômicos apresentam valores bastante distintos na eficiência da geração econômica a partir de um mesmo metro cúbico de água, condizente com o grau de agregação de valor que realizam. Essa relação é bastante evidente quando se compara os resultados do setor agropecuário com e sem a consideração da água no solo, permitindo compilar indicadores que se relacionam apenas à água captada (distinguindo, assim, agricultura de sequeiro da irrigada, por exemplo). Os valores de eficiência na conversão de água para produção econômica aumentam em cerca de dez vezes quando se tem o uso da água atrelado à captação própria. Em contrapartida, na comparação entre consumo e uso (sem considerar a água do solo), os valores de eficiência de consumo (R\$ 9,98/m³ em 2020) e de uso (R\$ 8,71/m³ em 2020) são relativamente próximos, o que indica que a maior parcela da água captada é de fato consumida, seja pela evapotranspiração das culturas ou pela incorporação na biomassa vegetal, não retornando ao sistema hídrico. Essa é a característica típica deste setor usuário consuntivo.

A diferença entre os indicadores de consumo e de uso, no entanto, é bastante destacada no setor de água e esgoto, por exemplo, que é um setor de prestação de serviços. A eficiência do consumo (R\$ 19,16/m³) é mais de 21 vezes superior à eficiência do uso (R\$ 0,89/m³). Isso ocorre porque a atividade é responsável pela captação de um grande volume de água (uso), mas a maior parte é distribuída a outros usuários da economia (famílias, indústrias), com apenas uma pequena fração sendo efetivamente consumida no processo (perdas físicas e lavagem, por exemplo). Essa disparidade é ainda mais acentuada no setor de eletricidade e gás, que apresenta a maior diferença entre os dois indicadores. A eficiência do consumo (R\$

2.002,25/m³) é drasticamente superior à do uso (R\$ 0,03/m³), explicado pela natureza da geração hidrelétrica: um grande volume de água é usado para produzir energia, mas quase todo é devolvido imediatamente ao curso d'água, característica típica de um usuário não-consuntivo.

Estes indicadores de eficiência se tornam particularmente pertinentes para estimar o valor econômico sob risco hídrico, pois traduzem o valor econômico associado a cada metro cúbico, permitindo quantificar o impacto potencial dos eventos de escassez hídrica. Ao multiplicar esses indicadores pela quantidade de água sob risco, obtém-se uma valoração monetária do prejuízo que se pode esperar, tal como a perda de valor adicionado bruto em setores dependentes. Levando em consideração as características dos indicadores híbridos de eficiência de consumo e de uso das águas, assim como o perfil de cada setor usuário dos recursos hídricos superficiais das águas da bacia do rio Paraíba do Sul, nota-se que existem diferentes formas de interação física e econômica com o recurso hídrico, que condicionam as métricas de eficiência.

Primeiramente, observa-se que as finalidades de uso de dessedentação animal e irrigação (setor primário, agropecuária), assim como indústria e mineração (setor secundário), são voltadas à produção econômica intermediária. Ou seja, as interferências com essas finalidades detêm características essencialmente produtivas, para as quais o volume de água captado atua como insumo produtivo. Dessa forma, o uso (retirada total) caracteriza-se como a métrica que melhor captura a relação entre o valor econômico e os recursos hídricos. Dessa forma, para as finalidades de uso agropecuário, utiliza-se o indicador de eficiência de uso de R\$ 11,13/m³ (a preços de 2024). Já para as interferências industriais, adota-se o indicador de eficiência de uso correspondente ao setor de indústrias de transformação e construção, de R\$ 254,65/m³.

A finalidade de uso da mineração, por fim, requer um ajuste devido à natureza preponderante da atividade na bacia do rio Paraíba do Sul, que é majoritariamente voltada à extração de areia, pedra e argila do leito de rio, atividade com menor grau de valor agregado. A produção desses agregados não condiz ao valor de uso do CEAA correspondente às indústrias extrativas (R\$ 287,05/m³), e utilizá-lo geraria uma drástica superestimativa do valor econômico gerado, distorcendo a análise de impacto econômico do risco hídrico. Dessa forma, optou-se pelo uso do indicador de eficiência de uso do CEAA correspondente ao do setor de eletricidade e gás (R\$ 0,04/m³). A escolha por esse indicador se justifica no fato de ambas as atividades (mineração de agregados e geração hidrelétrica) apresentarem características similares quanto ao uso não-consuntivo da água e baixo valor agregado por unidade de

recurso hídrico utilizado, proporcionando uma aproximação mais realista para a valoração econômica do risco hídrico na atividade mineral específica da bacia.

Para os usuários de abastecimento humano (seja em ambiente urbano ou rural), tem-se uma relação de uso da água distinta dos setores produtivos, relação que supera o setor de água e esgoto, por ser intermediário (prestação de serviços), e que se materializa na repercussão do consumo da água nas mais diversas atividades econômicas. Estas aplicações vão desde a simples higienização de frutas e legumes nas residências e restaurantes, até a higienização de materiais cirúrgicos em um hospital, passando por uma infinidade de situações características da complexidade econômica local que perpassa os usos que não são destacados por obterem outorgas próprias. Um outro exemplo é pertinente às indústrias, que quando são de maior porte e/ou requerem água em características específicas, tendem a ter captações próprias (usos outorgados); já as indústrias de menor porte e/ou de menor intensidade de consumo de água são abastecidas pela rede geral, compondo assim o rol de múltiplas atividades que decorrem a partir da captação de água, pelas companhias de água, nos corpos de água. Conclui-se que, para os usuários de abastecimento humano, a melhor representação do valor econômico que se espera derivar da água extraída é dada pelo indicador de eficiência de consumo das atividades econômicas totais (que representam a multiplicidade de usos), cujo valor unitário é de R\$ 49,39/m³ a preços de 2024. Adota-se, para fins de simplificação, a mesma métrica para as interferências denominadas de "outros usos", bem como para as interferências de finalidade de uso não determinado.

O uso dos indicadores de eficiência para cada finalidade de uso é referencial, mas útil para se ter uma noção da ordem de grandeza que está sob risco hídrico. Com a adoção dos indicadores unitários respectivos de cada finalidade de uso das águas, torna-se possível multiplicar as métricas de eficiência na conversão de água em atividade econômica (R\$/m³) pelo volume captado, obtendo-se assim a contribuição econômica total da água no âmbito das CEAA's.

Antes de prosseguir com a adoção dos indicadores para a mensuração dos valores econômicos sob risco, realizou-se a seguinte checagem de aderência das premissas adotadas: multiplicou-se os indicadores de eficiência respectivos a cada finalidade de uso, pelo respectivo volume de água outorgado, segregado entre captações superficiais e subterrâneas. O resultado econômico obtido pelas atividades agropecuárias, que somam as interferências de dessedentação animal e irrigação, é de R\$ 2,70 bilhões (98% deles oriundo de captações superficiais) em produção econômica diretamente vinculada ao uso das águas da bacia do rio Paraíba do Sul. Esse montante corresponde a 48% do valor agregado bruto

das atividades primárias nos municípios componentes, mensurada a partir das Contas Nacionais do IBGE a nível municipal para o ano de 2020 (compatível com os dados do CEAA) e trazidos a preços de 2024 pelo IPCA.

O Quadro 9-9 apresenta os resultados dessa checagem de aderência também para os setores secundário e terciário, comparados, respectivamente, às interferências de indústria e de mineração (secundário) e de abastecimento humano e outros usos (terciário).

Quadro 9-9 – Checagem de aderência das premissas de valoração do uso da água na bacia do rio Paraíba do Sul

Valor Agregado Bruto (VAB)* gerado nos municípios da bacia do rio Paraíba do Sul**		Valor econômico da produção vinculada às outorgas de uso de recursos hídricos			
		Superficial**	Subterrâneo **	Total** (sup. + sub.)	Fração do Total
VAB Primário (agropecuária)	5.606,33	2.642,60	55,30	2.697,90	48,12%
VAB Secundário (indústria)	144.604,32	73.904,83	28.820,87	102.725,70	71,04%
VAB Terciário (serviços)	201.740,52	39.377,95	9.145,21	48.523,16	24,05%
VAB Total	351.951,17	115.925,38	38.021,38	153.946,76	43,74%

* Aplicação de correção monetária pelo IPCA entre jan./2021 e dez./2024 (27,69%)

** x R\$ 1 milhão

Fonte: elaborado pelo Consórcio com base em IBGE, 2025

Verifica-se aderência dos resultados, mesmo reconhecendo-se tratar de uma estimativa que tem validade pelas ordens de grandeza levantadas. A alta correspondência identificada no setor secundário (71% do VAB) revela que a indústria da bacia é fortemente dependente dos recursos hídricos outorgados, o que é consistente com o fato de grandes indústrias operarem com captações próprias. Já a menor proporção no setor de serviços (24%) está alinhada ao fato que de as atividades terciárias são fruto de um efeito econômico em cascata que se dá a partir da captação e distribuição de água via rede geral, mas não é diretamente mensurável pelas outorgas.

Os valores econômicos encontrados revelam o efeito da água na economia regional, cuja estimativa total é de R\$ 153,95 bilhões, ou seja, 44% do valor agregado bruto somado dos 168 municípios cujas sedes estão inseridas na bacia do rio Paraíba do Sul⁹. Tem-se, pela metodologia adotada, uma medida evidente do recurso natural para as atividades econômicas. Em termos de importância relativa, observa-se que as captações superficiais são

⁹ O uso desse recorte de municípios, em detrimento à consideração da totalidade de municípios com áreas parcialmente inseridas na bacia, tem como justificativa o estabelecimento da devida comparação com os valores agregados brutos. A análise de risco hídrico, outrossim, contempla a totalidade da bacia.

responsáveis por 33% do VAB agregado, enquanto as subterrâneas representam uma fração de 11%.

Dadas as estimativas do impacto econômico de cada uma das interferências (cuja somatória dá origem aos valores agregados apresentados anteriormente), torna-se possível segregá-los por unidade de planejamento hídrico e por grupo de finalidades de uso. Além disso, é possível aplicá-los aos volumes hídricos sob risco de déficit, revelando enfim o impacto econômico caso o risco se materialize. O Quadro 9-10 apresenta os resultados obtidos para as vazões de restrição $Q_{95\%}$ e $Q_{7,10}$, ressaltando-se tratar apenas das interferências com captação superficial. Os valores são apresentados em milhões de reais a preços de 2024.

Quadro 9-10 – Risco hídrico econômico de captação superficial no Cenário de Maior Pressão (2045) sem mudança do clima (risco de base) - total de interferências

UP	Valor econômico da água (R\$, MM)	Valor sob risco ($Q_{95\%}$)		Valor sob risco ($Q_{7,10}$)	
		R\$, MM	%	R\$, MM	%
1 - Alto Paraíba do Sul	39.131	4.808	12,29%	5.010	12,80%
2 - Rios Preto e Paraibuna	3.665	477	13,01%	478	13,05%
3 - Rios Pomba e Muriaé	12.722	1.072	8,43%	1.553	12,21%
4 - Médio Paraíba do Sul	42.948	609	1,42%	621	1,45%
5 - Piabanha	4.557	991	21,75%	1.125	24,68%
6 - Rio Dois Rios	1.342	192	14,29%	207	15,45%
7 - Baixo Paraíba do Sul	10.245	525	5,13%	796	7,77%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	1.314	0	0,02%	2	0,12%
Total Geral	115.925	8.674	7,48%	9.791	8,45%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

A mensuração do risco hídrico econômico total para captação superficial varia entre R\$ 8,67 e R\$ 9,79 bilhões por ano (a depender da vazão de restrição $Q_{95\%}$ e $Q_{7,10}$, respectivamente), notando-se tratar do valor no Cenário de Maior Pressão (2045) ainda sem a consideração dos agravamentos trazidos pela mudança do clima. O risco de base revela percentuais do valor econômico total entre 7,48% e 8,45%, que representam percentuais respectivos de 2,46% e 2,78% do valor agregado bruto gerado nos municípios da bacia. Tem-se, portanto, a identificação de um risco de grande relevância para a economia regional, com impactos elevados.

Os resultados acima são referentes à totalidade das interferências, podendo-se segregá-los por finalidade de uso. Em linha com os indicadores do valor econômico e dos volumes captados, é a indústria que apresenta os maiores valores sob risco, como revela o Quadro 9-11. Já as atividades econômicas derivadas do consumo humano (Quadro 9-12), embora sejam inferiores às do setor industrial, apontam para um risco entre R\$ 0,76 e R\$ 1,30 bilhões.

O setor agropecuário também traz valores econômicos relevantes sob riscos, embora inferiores em valor absoluto (Quadro 9-13). Os outros usos e outorgas não discriminadas são apresentados, por fim, no Quadro 9-14.

Quadro 9-11 – Risco hídrico econômico de captação superficial no Cenário de Maior Pressão (2045) sem mudança do clima (risco de base) - indústria e mineração

UP	Valor econômico da água (R\$, MM)	Valor sob risco (Q _{95%})		Valor sob risco (Q _{7,10})	
		R\$, MM	%	R\$, MM	%
1 - Alto Paraíba do Sul	24.070	4.679	19,44%	4.776	19,84%
2 - Rios Preto e Paraibuna	1.706	343	20,13%	343	20,13%
3 - Rios Pomba e Muriaé	3.692	449	12,16%	466	12,63%
4 - Médio Paraíba do Sul	36.726	601	1,64%	607	1,65%
5 - Piabanha	1.653	958	57,99%	1.026	62,07%
6 - Rio Dois Rios	466	129	27,60%	129	27,60%
7 - Baixo Paraíba do Sul	4.552	352	7,74%	613	13,47%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	1.040	0	0,02%	1	0,13%
Total Geral	73.905	7.512	10,16%	7.962	10,77%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 9-12 – Risco hídrico econômico de captação superficial no Cenário de Maior Pressão (2045) sem mudança do clima (risco de base) - consumo humano

UP	Valor econômico da água (R\$, MM)	Valor sob risco (Q _{95%})		Valor sob risco (Q _{7,10})	
		R\$, MM	%	R\$, MM	%
1 - Alto Paraíba do Sul	10.377	19	0,18%	94	0,91%
2 - Rios Preto e Paraibuna	1.423	0	0,00%	1	0,08%
3 - Rios Pomba e Muriaé	6.491	549	8,45%	914	14,08%
4 - Médio Paraíba do Sul	5.930	7	0,12%	11	0,18%
5 - Piabanha	2.820	32	1,12%	98	3,46%
6 - Rio Dois Rios	836	56	6,74%	70	8,38%
7 - Baixo Paraíba do Sul	4.453	98	2,19%	107	2,40%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	267	0	0,01%	0	0,08%
Total Geral	32.597	760	2,33%	1.295	3,97%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 9-13 – Risco hídrico econômico de captação superficial no Cenário de Maior Pressão (2045) sem mudança do clima (risco de base) - agropecuária

UP	Valor econômico da água (R\$, MM)	Valor sob risco (Q _{95%})		Valor sob risco (Q _{7,10})	
		R\$, MM	%	R\$, MM	%
1 - Alto Paraíba do Sul	1.609	110	6,82%	140	8,67%
2 - Rios Preto e Paraibuna	24	4	16,07%	4	16,19%
3 - Rios Pomba e Muriaé	376	64	17,00%	81	21,49%
4 - Médio Paraíba do Sul	5	2	34,85%	2	47,97%
5 - Piabanha	4	1	26,13%	1	26,25%

UP	Valor econômico da água (R\$, MM)	Valor sob risco (Q _{95%})		Valor sob risco (Q _{7,10})	
		R\$, MM	%	R\$, MM	%
6 - Rio Dois Rios	13	3	27,31%	4	31,62%
7 - Baixo Paraíba do Sul	608	76	12,44%	76	12,54%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	4	0	0,00%	0	0,03%
Total Geral	2.643	259	9,81%	308	11,64%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 9-14 – Risco hídrico econômico de captação superficial no Cenário de Maior Pressão (2045) sem mudança do clima (risco de base) - outros usos e não discriminados

UP	Valor econômico da água (R\$, MM)	Valor sob risco (Q _{95%})		Valor sob risco (Q _{7,10})	
		R\$, MM	%	R\$, MM	%
1 - Alto Paraíba do Sul	3.074	0	0,00%	0	0,01%
2 - Rios Preto e Paraibuna	512	130	25,33%	130	25,33%
3 - Rios Pomba e Muriaé	2.164	10	0,48%	92	4,24%
4 - Médio Paraíba do Sul	287	0	0,00%	0	0,14%
5 - Piabanha	80	0	0,00%	0	0,03%
6 - Rio Dois Rios	27	3	12,20%	4	16,72%
7 - Baixo Paraíba do Sul	633	0	0,00%	0	0,00%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	3	0	0,00%	0	0,00%
Total Geral	6.781	144	2,12%	227	3,34%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Impacto social do risco hídrico de base

Para fins de estimativa do risco de abastecimento da população humana, é adotada uma forma de estimativa de pessoas atendidas a partir dos volumes outorgados, segregada para aqueles na área rural e os na área urbana, mas ambos fazendo uso das taxas de consumo per capita (litros por habitante por dia) apresentadas no Produto 3. Para a área rural, é associada uma fração de 60% do uso do volume outorgado para consumo humano propriamente dito, reconhecendo-se que diversas das captações no meio rural, embora tenham como finalidade majoritária o consumo humano, atendem a outros fins, como a irrigação de pequenas hortas e dessedentação de pequenos animais de criação. Além disso, essa fração contempla as eventuais perdas físicas de água que ocorrem entre a captação e o consumo. Com esse pressuposto, utilizou-se a taxa de consumo de 150 litros por habitante por dia para estimar a quantidade de pessoas atendidas por cada outorga. Como exemplo, tem-se que uma interferência de abastecimento humano rural de 2,0 mil m³ por ano de volume (cerca de 0,06 L/s) tenha 60% (volume de 1,2 mil m³) destinado ao atendimento efetivo de consumo. Uma vez dividindo-se tal volume efetivo pela taxa de consumo per capita, é possível estimar que essa interferência atenda 22 pessoas.

Para as interferências de abastecimento humano urbano, que ocorrem via rede geral de abastecimento, foram adotadas duas mecânicas, a partir da disponibilidade de detalhes das interferências. Para as emitidas em nome de companhias de abastecimento, foi adotada a população atendida por rede geral no respectivo município, fazendo uso das informações do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) apresentadas no Produto 3. O município paulista de Aparecida, por exemplo, detém uma outorga em nome do "Serviço Autônomo de Água e Esgotos e Resíduos Sólidos de Aparecida", cujo volume de 8,58 milhões de m³/ano atende à população de 32,45 mil habitantes (segundo informações de 2022 do indicador AG001 do SNIS - população total atendida com abastecimento de água). Para municípios que têm mais de uma interferência em nome de sua concessionária de água, foi realizado o rateio da população atendida de forma proporcional ao volume captado por interferência. Com base nessa mecânica, são considerados sob risco - para estas interferências específicas - apenas a população que é atendida pela rede de abastecimento.

Existem, no entanto, diversas outras interferências de abastecimento humano urbano que não estão emitidas em nome de uma companhia de abastecimento, mas sim em nome de condomínios residenciais, loteamentos e outros empreendimentos específicos, como áreas militares, por exemplo. Para esses casos, foi adotada a exata mesma mecânica que para a população rural. Com base nessas formas de cálculo, é possível computar a quantidade de pessoas associadas a cada uma das interferências das finalidades de abastecimento humano e rural que fazem uso das águas superficiais da bacia do rio Paraíba do Sul (Quadro 9-15).

Quadro 9-15 – Risco hídrico da população humana abastecida por captação superficial no Cenário de Maior Pressão (2045) sem mudança do clima (risco de base)

UP	Pessoas expostas	Pessoas sob risco (Q _{95%})		Pessoas sob risco (Q _{7,10})	
		Pessoas	%	Pessoas	%
1 - Alto Paraíba do Sul	1.574.064	1.739	0,11%	7.192	0,46%
2 - Rios Preto e Paraibuna	69.873	0	0,00%	115	0,17%
3 - Rios Pomba e Muriaé	667.576	59.279	8,88%	91.318	13,68%
4 - Médio Paraíba do Sul	968.565	1.550	0,16%	2.310	0,24%
5 - Piabonha	388.983	5.392	1,39%	17.580	4,52%
6 - Rio Dois Rios	135.220	7.897	5,84%	9.371	6,93%
7 - Baixo Paraíba do Sul	811.137	21.515	2,65%	23.526	2,90%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	52.970	7	0,01%	47	0,09%
Total Geral	4.668.387	97.380	2,09%	151.461	3,24%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Primeiramente, a metodologia aplicada desvenda que há um total de 4,67 milhões de pessoas expostas ao sistema de abastecimento superficial, seja via sistemas de abastecimento de água, seja por outorgas próprias de captação, tanto em ambiente urbano quanto rural. O

quantitativo permite validar a metodologia adotada para vincular as outorgas às quantidades de pessoas atendidas, que representa cerca de 71% da população total da bacia, de 6,54 milhões de habitantes conforme o Censo Demográfico do IBGE. Nota-se que essa é a população atendida pelas águas superficiais da bacia do Rio Paraíba do Sul, sendo que a outra fração é abastecida por água subterrânea ou ainda por captações localizadas em bacias vizinhas.

Do total da população exposta ao risco de déficit hídrico, revela-se que de 2,09% a 3,24% (vazões de referência $Q_{95\%}$ e $Q_{7,10}$, respectivamente) está exposta e vulnerável, ou seja, está efetivamente sob risco. Embora os resultados relativos sejam pequenos, traduzem-se em um contingente de 97,38 mil a 151,46 mil pessoas. A diferença entre as vazões de referência indica que a transição para condições hidrológicas mais críticas eleva significativamente a população vulnerável. Em relação à distribuição das pessoas sob risco, nota-se uma concentração em unidades específicas de planejamento: a dos Rios Pomba e Muriaé, por exemplo, apresenta a maior vulnerabilidade relativa e absoluta, com 8,88% a 13,68% da população sob risco ($Q_{95\%}$ e $Q_{7,10}$), totalizando entre 59,28 e 91,32 mil pessoas em situação de risco. Em seguida, a unidade Rio Dois Rios apresenta entre 5,84% e 6,93% da população com vulnerabilidade.

A distribuição territorial do risco populacional contrasta com os riscos volumétricos setoriais apresentados no item antecedente. Na unidade de planejamento Alto Paraíba do Sul, que concentra o maior contingente populacional exposto (1,57 milhões de habitantes), mantém risco relativo muito baixo (0,11% a 0,46%), ao passo que apresenta alta fração de risco para o setor industrial e de mineração (30,23% a 30,93%). De forma similar, a unidade Piabanha também exibe baixo grau de risco para a população (1,39% a 4,52%) e uma alta vulnerabilidade industrial (37,28% a 39,70%).

9.1.3. Risco hídrico da mudança climática - riscos crônicos

Conforme apresentado no capítulo 7, um dos efeitos promovidos pela mudança do clima está no agravamento paulatino das maiores temperaturas e das modificações na quantidade de água que a atmosfera consegue comportar. São as mudanças crônicas, que traçam paralelo às novas condições de vazão de referência ($Q_{95\%}$ e $Q_{7,10}$), na qual a disponibilidade hídrica é modificada, assim como o são as próprias demandas hídricas. A mudança crônica implica em um "novo normal", não em termos de uma ocorrência episódica, mas sim na configuração de uma situação permanentemente agravada. Com base nos resultados de balanço hídrico que espelham esse duplo agravamento das condições - por um lado, menores disponibilidades, por outro, maiores demandas - torna-se possível reaplicar a metodologia desenvolvida com

os resultados do balanço hídrico sob mudança do clima crônico. Nota-se que os resultados representam as perspectivas no cenário de emissões SSP4-4.5, que condicionou as análises e se apresenta como uma perspectiva de alteração média - não é a mais extrema, mas tampouco a otimista. Como resposta das simulações sob esse cenário, está o agravamento do risco de base, apresentado no item precedente. O primeiro passo para essa estimativa do risco adicional trazido pela mudança do clima está na identificação do risco físico.

Estimativa do risco físico crônico

Uma vez conhecendo o risco físico de base, tona-se possível estimar, com a mesma metodologia, os resultados do balanço hídrico modificados a partir das ofertas e demandas sob mudança do clima crônica. A primeira modificação que se apresenta é na quantidade de interferências, por finalidade de uso e dentre as que têm outorga para captação superficial, que estão sob novo risco hídrico. Nota-se que nesse item todos os resultados são apresentados pelo diferencial que a mudança do clima gera sob o risco de base.

O Quadro 9-16 apresenta o quantitativo de interferências adicionais que passam a estar, para cada uma das vazões de referência, sob risco hídrico com a mudança do clima e que não estavam assim no cenário futuro sem essa perspectiva. Para a vazão de referência $Q_{95\%}$, verifica-se um total de 505 interferências sob alguma classe de risco hídrico, o que representa uma adição de 24 novas interferências sobre as 481 que já estavam sob risco hídrico na situação de base (representado no quadro pelo ΔMC quantidade, ou seja, o aumento das interferências sob risco causado pelo clima). Já a coluna denominada " $\Delta MC\%$ " mostra o impacto adicional da mudança climática sobre o risco hídrico atual. Atualmente, sem considerar os efeitos da mudança do clima, 481 outorgas estão sob risco hídrico, o que representa 14,07% do total de 3.419 interferências de captação superficial na bacia. Com a mudança do clima, esse número aumenta para 505 outorgas sob risco, elevando o percentual para 14,77% do total. A coluna $\Delta MC\%$ apresenta, portanto, a diferença entre esses dois percentuais (resultando em uma variação de 0,70 pontos percentuais), significando que a mudança climática representa um agravamento mensurável da situação de segurança hídrica que já seria enfrentada mesmo sem a consideração das alterações climáticas.

Quadro 9-16 – Quantidade de interferências sob risco hídrico com mudança do clima crônica.

Finalidade de uso	Interferências sob risco na vazão de ref. $Q_{95\%}$			Interferências sob risco na vazão de ref. $Q_{7,10}$		
	Qtde.	ΔMC qtde.	$\Delta MC\%$	Qtde.	ΔMC qtde.	$\Delta MC\%$
An. Humano Rural	66	2	0,35%	77	4	0,69%
Ab. Humano Urbano	26	3	0,87%	36	4	1,16%
Consumo industrial	67	0	0,00%	76	4	1,53%

Finalidade de uso	Interferências sob risco na vazão de ref. $Q_{95\%}$			Interferências sob risco na vazão de ref. $Q_{7,10}$		
	Qtde.	ΔMC qtde.	ΔMC %	Qtde.	ΔMC qtde.	ΔMC %
Dessedentação animal	25	2	2,06%	34	2	2,06%
Irrigação	178	11	2,64%	189	7	1,68%
Mineração	117	3	0,61%	123	1	0,20%
Não informado	2	1	0,99%	7	2	1,98%
Outros	24	2	0,18%	40	5	0,44%
TOTAL	505	24	0,70%	582	29	0,85%

Fonte: elaborado pelo Consórcio.

Com a vazão de referência $Q_{95\%}$, nota-se que a finalidade de uso com a maior quantidade de interferências sob risco continua sendo a irrigação, com um total de 178 (11 a mais do que na situação de base). Uma vez que a vazão de referência $Q_{7,10}$ é mais restritiva, todos os resultados apresentados são incrementados - a quantidade total de interferências sob risco sobe para 582, 29 a mais do que as 553 que assim estavam na situação de base com essa mesma vazão. Isso representa um acréscimo de 0,85% das interferências totais que passam a estar sob risco. Essa mesma lógica de apresentar resultados incrementais é utilizada para as demais análises desse item.

Tal como realizado para estimar o risco físico na situação sem mudança do clima (risco de base), cada uma das interferências sob risco teve sua vazão outorgada convertida em volume anual de utilização do recurso hídrico. Além disso, foram computados os riscos inerentes e os riscos pós-déficit, associando-se para tanto o grau de risco respectivo do balanço hídrico no cenário de interesse - o de Maior Pressão pelos recursos hídricos no ano de 2045 com as modificações trazidas pela mudança crônica do clima no cenário de emissões SSP4-4.5.

No Quadro 9-17, encontram-se os resultados obtidos para o risco hídrico físico, apresentados para as vazões de restrição $Q_{95\%}$ e $Q_{7,10}$, de acordo com os resultados dos balanços hídricos respectivos do Capítulo 7. Assim como para a quantidade de interferências, o quadro traz o volume total sob risco e a diferença (incremental, ou delta - Δ) que é gerado pela simulação do cenário de clima SSP4-4.5 em suas mudanças crônicas. Observa-se pelo percentual incremental que a diferença resultante não é muito expressiva, embora esteja bastante concentrada em uma unidade de planejamento.

Quadro 9-17 – Risco hídrico físico de captação superficial com mudança do clima crônica - total de interferências

UP	Volume sob risco ($Q_{95\%}$)			Volume sob risco ($Q_{7,10}$)		
	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %
1 - Alto Paraíba do Sul	110.301	37.969	6,10%	121.627	43.649	7,01%

UP	Volume sob risco ($Q_{95\%}$)			Volume sob risco ($Q_{7,10}$)		
	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %
2 - Rios Preto e Paraibuna	6.901	2	0,00%	7.597	11	0,01%
3 - Rios Pomba e Muriaé	23.670	1.757	0,72%	36.105	2.863	1,18%
4 - Médio Paraíba do Sul	3.513	4	0,00%	3.843	154	0,05%
5 - Piabanha	5.080	279	0,40%	6.409	5	0,01%
6 - Rio Dois Rios	2.736	272	1,10%	4.337	1.407	5,69%
7 - Baixo Paraíba do Sul	11.310	53	0,03%	12.268	352	0,19%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	2	1	0,01%	39	29	0,29%
Total Geral	163.512	40.337	2,62%	192.225	48.471	3,15%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Observa-se uma elevação disseminada do volume sob risco nas duas vazões de referência ($Q_{95\%}$ e $Q_{7,10}$), com concentração espacial no Alto Paraíba do Sul e relevância secundária nas UPs Pomba e Muriaé, Baixo Paraíba do Sul e Rio Dois Rios para a vazão $Q_{7,10}$. No agregado das interferências, o incremento crônico adiciona cerca de 40,34 a 48,47 milhões de metros cúbicos ao risco de base (nas vazões respectivas), com a UP1 respondendo pela maior parcela absoluta do acréscimo. O resultado é um reflexo de duas forças combinadas: (i) maior intensidade de captações e pressões localizadas em subtrechos críticos, e (ii) sensibilidade das vazões de referência às mudanças tendenciais nas condições hidrológicas, que deslocam o “novo normal” para patamares de menor garantia. A $Q_{7,10}$, por ser mais restritiva, amplifica esse efeito e evidencia pontos onde pequenos choques de oferta/demanda elevam rapidamente o volume sob risco.

Os quadros a seguir apresentados mostram os resultados para cada setor usuário, quais sejam: indústria e mineração (Quadro 9-18), consumo humano (Quadro 9-19), agropecuária, que considera conjuntamente os usos de irrigação e dessedentação animal (Quadro 9-20), e os outros usos e outorgas não discriminadas (Quadro 9-21).

Quadro 9-18 – Risco hídrico físico de captação superficial com mudança do clima crônica - indústria e mineração

UP	Volume sob risco ($Q_{95\%}$)			Volume sob risco ($Q_{7,10}$)		
	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %
1 - Alto Paraíba do Sul	62.325	241	0,12%	65.368	1.848	0,90%
2 - Rios Preto e Paraibuna	3.926	0	0,00%	4.587	0	0,00%
3 - Rios Pomba e Muriaé	5.120	275	0,81%	6.473	864	2,56%
4 - Médio Paraíba do Sul	3.218	1	0,00%	3.258	7	0,00%
5 - Piabanha	4.342	263	2,40%	4.346	2	0,02%
6 - Rio Dois Rios	945	2	0,03%	1.058	0	0,00%
7 - Baixo Paraíba do Sul	2.525	46	0,14%	2.926	27	0,08%

UP	Volume sob risco (Q _{95%})			Volume sob risco (Q _{7,10})		
	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	1	0	0,01%	22	16	0,38%
Total Geral	82.403	829	0,17%	88.039	2.763	0,55%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 9-19 – Risco hídrico físico de captação superficial com mudança do clima crônica - consumo humano

UP	Volume sob risco (Q _{95%})			Volume sob risco (Q _{7,10})		
	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %
1 - Alto Paraíba do Sul	628	245	0,12%	1.935	31	0,01%
2 - Rios Preto e Paraibuna	0	0	0,00%	35	11	0,04%
3 - Rios Pomba e Muriaé	11.750	640	0,49%	19.033	522	0,40%
4 - Médio Paraíba do Sul	144	2	0,00%	289	67	0,06%
5 - Piabanha	655	16	0,03%	1.979	2	0,00%
6 - Rio Dois Rios	1.405	263	1,56%	2.759	1.340	7,92%
7 - Baixo Paraíba do Sul	1.976	0	0,00%	2.479	320	0,35%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	1	0	0,00%	17	13	0,24%
Total Geral	16.558	1.167	0,18%	28.527	2.308	0,35%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 9-20 – Risco hídrico físico de captação superficial com mudança do clima crônica - agropecuária

UP	Volume sob risco (Q _{95%})			Volume sob risco (Q _{7,10})		
	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %
1 - Alto Paraíba do Sul	47.346	37.482	25,90%	54.317	41.768	28,86%
2 - Rios Preto e Paraibuna	347	2	0,11%	347	0	0,00%
3 - Rios Pomba e Muriaé	6.398	650	1,92%	8.461	1.194	3,53%
4 - Médio Paraíba do Sul	152	1	0,15%	209	0	0,05%
5 - Piabanha	83	0	0,01%	83	0	0,00%
6 - Rio Dois Rios	314	2	0,19%	427	66	5,73%
7 - Baixo Paraíba do Sul	6.808	7	0,01%	6.863	6	0,01%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	0	0	0,00%	0	0	0,01%
Total Geral	61.448	38.143	16,05%	70.706	43.033	18,11%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 9-21 – Risco hídrico físico de captação superficial com mudança do clima crônica - outros usos e não discriminados

UP	Volume sob risco (Q _{95%})			Volume sob risco (Q _{7,10})		
	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %
1 - Alto Paraíba do Sul	2	1	0,00%	6	2	0,00%
2 - Rios Preto e Paraibuna	2.628	0	0,00%	2.628	0	0,00%
3 - Rios Pomba e Muriaé	402	192	0,44%	2.138	283	0,65%
4 - Médio Paraíba do Sul	0	0	0,00%	88	80	1,37%

UP	Volume sob risco (Q _{95%})			Volume sob risco (Q _{7,10})		
	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %
5 - Piabanha	0	0	0,00%	1	0	0,01%
6 - Rio Dois Rios	71	5	0,86%	92	1	0,26%
7 - Baixo Paraíba do Sul	0	0	0,00%	0	0	0,00%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	0	0	0,00%	0	0	0,00%
Total Geral	3.103	198	0,14%	4.953	367	0,27%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Ao comparar os setores usuários, nota-se que os correlatos à agropecuária são os mais sensíveis ao componente crônico, com aumento dos volumes sob risco que variam de 38,1 a 43,0 milhões de metros cúbicos (nas vazões respectivas Q_{95%} e Q_{7,10}) frente ao cenário de base. A resposta é consistente com a natureza consuntiva do uso agrícola, além da elasticidade da demanda a temperaturas mais altas e maior déficit de umidade. Em contraste, o consumo humano apresenta elevação modesta do volume sob risco no cenário crônico, mantendo exposição relativa baixa no agregado da bacia, ainda que as UPs Pomba e Muriaé e Rio Dois Rios apresentem incrementos mais sensíveis para esse setor. Já a Indústria e mineração, por sua vez, mostram incremento relativamente pequeno no risco físico crônico, salientando-se que estas são as finalidades de uso mais vulneráveis ao risco de base. Ou seja, para estas interferências, a mudança do clima não deverá ser um agravante tão severo, muito embora a situação atual já sugira um elevado risco.

Impacto econômico do risco hídrico crônico

Com base na informação acerca do risco físico, torna-se possível aplicar as estimativas da produção econômica unitária (R\$/m³) de cada finalidade de uso para se obter a estimativa do impacto econômico caso o risco se materialize. O Quadro 9-22 apresenta os resultados obtidos para ambas as vazões de restrição - Q_{95%} e Q_{7,10} - ressaltando-se tratar apenas das interferências com captação superficial.

Quadro 9-22 – Risco hídrico econômico de captação superficial com mudança do clima crônica - total de interferências

UP	Valor econômico sob risco (Q _{95%})			Valor econômico sob risco (Q _{7,10})		
	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %
1 - Alto Paraíba do Sul	5.280	472	1,21%	5.519	509	1,30%
2 - Rios Preto e Paraibuna	477	0	0,00%	479	1	0,02%
3 - Rios Pomba e Muriaé	1.121	49	0,39%	1.612	59	0,46%
4 - Médio Paraíba do Sul	610	0	0,00%	628	7	0,02%
5 - Piabanha	1.059	68	1,49%	1.125	1	0,01%
6 - Rio Dois Rios	205	13	0,99%	274	67	4,99%

UP	Valor econômico sob risco (Q _{95%})			Valor econômico sob risco (Q _{7,10})		
	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %
7 - Baixo Paraíba do Sul	537	11	0,11%	816	20	0,19%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	0	0	0,01%	6	5	0,37%
Total Geral	9.289	614	0,53%	10.459	668	0,58%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Como antes, os valores são apresentados em milhões de reais a preços de 2024, pelos quais se observa que a mudança do clima deve promover um risco adicional de R\$ 614 a R\$ 668 milhões na bacia do rio Paraíba do Sul (para as vazões Q_{95%} e Q_{7,10}, respectivamente). Esse risco econômico, assim como indicado pela distribuição do risco físico, é bastante concentrado na unidade de planejamento Alto Paraíba do Sul. Sozinha, essa UP adiciona respectivos R\$ 472 e R\$ 509 milhões ao valor sob risco. As UPs Rio dois Rios e Pomba e Muriaé também se destacam pelo aumento do valor em risco, com magnitudes inferiores em termos absolutos, mas destacadas principalmente na vazão de referência Q_{7,10}.

Os resultados apresentados são referentes à totalidade das interferências, podendo-se também segregá-los por finalidade de uso. Os resultados para a indústria e mineração, como se lê no Quadro 9-23, não são preponderantes nesse acréscimo de risco (frente ao risco de base), e tampouco as atividades econômicas derivadas do consumo humano (Quadro 9-24) concentram esse acréscimo. O setor agropecuário, não obstante, é que se encontra mais suscetível aos efeitos da mudança do clima, como se observa no Quadro 9-25, pelo qual se vê um acréscimo no risco entre 16% e 18% em relação à situação de base. Os outros usos e outorgas não discriminadas são apresentados no Quadro 9-26.

Quadro 9-23 – Risco hídrico econômico de captação superficial com mudança do clima crônica - indústria e mineração

UP	Valor econômico sob risco (Q _{95%})			Valor econômico sob risco (Q _{7,10})		
	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %
1 - Alto Paraíba do Sul	4.722	43	0,18%	4.819	43	0,18%
2 - Rios Preto e Paraibuna	343	0	0,00%	343	0	0,00%
3 - Rios Pomba e Muriaé	450	1	0,02%	472	6	0,16%
4 - Médio Paraíba do Sul	601	0	0,00%	607	0	0,00%
5 - Piabanha	1.025	67	4,05%	1.026	1	0,03%
6 - Rio Dois Rios	129	0	0,00%	129	0	0,00%
7 - Baixo Paraíba do Sul	363	11	0,25%	617	4	0,09%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	0	0	0,01%	6	4	0,40%
Total Geral	7.634	123	0,17%	8.020	58	0,08%

Fonte: elaborado pelo Consórcio.

Quadro 9-24 – Risco hídrico econômico de captação superficial com mudança do clima crônica - consumo humano

UP	Valor econômico sob risco (Q _{95%})			Valor econômico sob risco (Q _{7,10})		
	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %
1 - Alto Paraíba do Sul	31	12	0,12%	96	2	0,01%
2 - Rios Preto e Paraibuna	0	0	0,00%	2	1	0,04%
3 - Rios Pomba e Muriaé	580	32	0,49%	940	26	0,40%
4 - Médio Paraíba do Sul	7	0	0,00%	14	3	0,06%
5 - Piabanha	32	1	0,03%	98	0	0,00%
6 - Rio Dois Rios	69	13	1,56%	136	66	7,92%
7 - Baixo Paraíba do Sul	98	0	0,00%	122	16	0,35%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	0	0	0,00%	1	1	0,24%
Total Geral	818	58	0,18%	1.409	114	0,35%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 9-25 – Risco hídrico econômico de captação superficial com mudança do clima crônica - agropecuária

UP	Valor econômico sob risco (Q _{95%})			Valor econômico sob risco (Q _{7,10})		
	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %
1 - Alto Paraíba do Sul	526	417	25,90%	604	464	28,86%
2 - Rios Preto e Paraibuna	4	0	0,11%	4	0	0,00%
3 - Rios Pomba e Muriaé	71	7	1,92%	94	13	3,53%
4 - Médio Paraíba do Sul	2	0	0,15%	2	0	0,05%
5 - Piabanha	1	0	0,01%	1	0	0,00%
6 - Rio Dois Rios	3	0	0,19%	5	1	5,73%
7 - Baixo Paraíba do Sul	76	0	0,01%	76	0	0,01%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	0	0	0,00%	0	0	0,01%
Total Geral	683	424	16,05%	786	479	18,11%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 9-26 – Risco hídrico econômico de captação superficial com mudança do clima crônica - outros usos e não discriminados

UP	Valor econômico sob risco (Q _{95%})			Valor econômico sob risco (Q _{7,10})		
	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %
1 - Alto Paraíba do Sul	0	0	0,00%	0	0	0,00%
2 - Rios Preto e Paraibuna	130	0	0,00%	130	0	0,00%
3 - Rios Pomba e Muriaé	20	10	0,44%	106	14	0,65%
4 - Médio Paraíba do Sul	0	0	0,00%	4	4	1,37%
5 - Piabanha	0	0	0,00%	0	0	0,01%

UP	Valor econômico sob risco (Q _{95%})			Valor econômico sob risco (Q _{7,10})		
	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %
6 - Rio Dois Rios	4	0	0,86%	5	0	0,26%
7 - Baixo Paraíba do Sul	0	0	0,00%	0	0	0,00%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	0	0	0,00%	0	0	0,00%
Total Geral	153	10	0,14%	245	18	0,27%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Em linha com o desvendado pelo risco físico adicionado pela mudança crônica do clima, o setor agropecuário é o centro do aumento do risco econômico, com incremento de 16 a 18% sobre o risco de base em ambas as vazões de referência, refletindo a elevação dos volumes sob risco e a escolha metodológica de aplicar a eficiência econômica de uso em valores econômicos produzidos por metro cúbico. Em contraponto, indústria e mineração apresentam acréscimos pouco expressivos no risco econômico crônico frente ao risco de base, coerentes com o incremento moderado do risco físico setorial - destacando-se novamente que esses são os setores que detêm os mais altos riscos de base.

Impacto social do risco hídrico crônico

Aplicando-se a mesma metodologia de estimativa do risco de abastecimento da população humana que para o risco de base, é possível estimar os impactos trazidos pela mudança do clima crônico sobre a quantidade de pessoas. Ou seja, dadas as interferências de abastecimento humano e suas localizações e perfis de segurança hídrica, estima-se o número de pessoas sob risco associadas a cada uma das interferências das finalidades de abastecimento humano e rural que fazem uso das águas superficiais da bacia do rio Paraíba do Sul. O Quadro 9-27 apresenta os resultados, que revelam o acréscimo de 7,36 mil pessoas adicionais sob risco pela mudança do clima para a vazão de referência Q_{95%}, chegando a 12,63 mil pessoas com a referência mais restritiva da Q_{7,10}. Os maiores contingentes sob risco adicional da mudança do clima se encontram na UP Rios Pomba e Muriaé, sendo que as unidades Rio Dois Rios e Baixo Paraíba do Sul também se destacam pelo acréscimo de pessoas em risco.

Quadro 9-27 – Risco hídrico da população humana abastecida por captação superficial com mudança do clima crônica

UP	Pessoas sob risco (Q _{95%})			Pessoas sob risco (Q _{7,10})		
	Pessoas	ΔMC pessoas	ΔMC %	Pessoas	ΔMC pessoas	ΔMC %
1 - Alto Paraíba do Sul	2.743	1.003	0,06%	7.344	152	0,01%
2 - Rios Preto e Paraibuna	0	0	0,00%	171	56	0,08%
3 - Rios Pomba e Muriaé	64.130	4.851	0,73%	95.516	4.198	0,63%

UP	Pessoas sob risco (Q _{95%})			Pessoas sob risco (Q _{7,10})		
	Pessoas	ΔMC pessoas	ΔMC %	Pessoas	ΔMC pessoas	ΔMC %
4 - Médio Paraíba do Sul	1.575	24	0,00%	2.924	614	0,06%
5 - Piabanha	5.550	158	0,04%	17.606	26	0,01%
6 - Rio Dois Rios	9.218	1.321	0,98%	13.307	3.936	2,91%
7 - Baixo Paraíba do Sul	21.516	0	0,00%	27.030	3.504	0,43%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	9	3	0,01%	190	142	0,27%
Total Geral	104.740	7.361	0,16%	164.089	12.628	0,27%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quando analisada a população total sob risco (não apenas o acréscimo trazido pela mudança do clima crônica), a unidade de planejamento dos Rios Pomba e Muriaé desponta como preocupação: 64,13 e 95,52 mil pessoas sob risco nas vazões de referência Q_{95%} na Q_{7,10}, patamar superior às demais UPs e coerente com a combinação de múltiplas captações e restrições de disponibilidade observadas para o abastecimento humano. O Baixo Paraíba do Sul ocupa a segunda posição em termos absolutos (21,52 e 27,03 mil pessoas, respectivamente), enquanto Rio Dois Rios, embora com população exposta total menor, apresenta elevação significativa com a referência mais restritiva (de 9,22 mil para 13,31 mil). Apesar de o Alto Paraíba do Sul registrar uma das maiores populações expostas na bacia, o contingente sob risco crônico permanece baixo (2,74 mil na Q_{95%} e 7,34 mil na Q_{7,10}), sendo que o acréscimo de risco aportado pela mudança do clima é relativamente modesto nesse território.

9.1.4. Risco hídrico da mudança climática - riscos agudos

O item anterior tratou do risco crônico da mudança do clima, que se reflete nas mudanças esperadas para a situação futura corriqueira em 2045 sob cenário de emissões SSP4-4.5. Conforme apresentado no capítulo 7, um outro efeito promovido pela mudança do clima está no agravamento das situações de risco agudo, que se manifesta de forma contundente nas ondas de calor. Nesses episódios, que se tornarão mais frequentes e mais intensos, a demanda pelos recursos hídricos se altera de forma expressiva para praticamente todos os usuários - no entanto, a disponibilidade hídrica segue sob as mesmas restrições, tendendo inclusive a se tornar mais restrita. Embora essa última faceta (restrições na oferta) não tenha sido modelada explicitamente para as ondas de calor, a simulação do balanço hídrico mediante o incremento previsto nas demandas serve de indicativo do risco adicional trazido pela ocorrência desse tipo de evento agudo.

Por definição, o risco agudo se materializa sobre o risco crônico, agravando-o. Ou seja, dada a situação futura de referência (representada pela mudança do clima crônica), podem ocorrer

episódios de ondas de calor (mudança do clima aguda), compondo assim um cenário que agrava os riscos da perspectiva crônica. Tal como para o risco crônico, os resultados do risco agudo são apresentados de forma absoluta e relativa (mudança incremental, ou seja, o delta - Δ). Dessa vez, não obstante, esse delta é calculado sobre o risco crônico, e não sobre o risco de base. Esse item se inicia pelo risco físico (quantidade de interferências e volumes de água comprometidos), depois segue para a estimativa dos impactos econômicos e sociais.

Estimativa do risco físico agudo

O Quadro 9-28 apresenta o quantitativo de interferências que passam a estar, para cada uma das duas vazões de referência, sob risco hídrico com a mudança do clima aguda - um evento de onda de calor. Para a vazão de referência $Q_{95\%}$, verifica-se um total de 518 interferências sob alguma classe de risco hídrico sob mudança do clima aguda (MCa), uma adição de 13 interferências sobre as 505 que já estavam sob risco hídrico pela mudança do clima crônica (MCc). Assim como no item anterior, o resultado percentual mostra a diferença na quantidade relativa sob novo risco, ou seja, o percentual sob risco da mudança do clima aguda (MCa) menos o percentual que está sob risco pela mudança do clima crônica (MCc).

Quadro 9-28 – Quantidade de interferências sob risco hídrico com mudança do clima aguda

Finalidade de uso	Interferências sob risco na vazão de ref. $Q_{95\%}$			Interferências sob risco na vazão de ref. $Q_{7,10}$		
	Qtde.	MCa-MCc Qtde.	MCa-MCc %	Qtde.	MCa-MCc Qtde.	MCa-MCc %
An. Humano Rural	72	6	1,04%	80	3	0,52%
Ab. Humano Urbano	29	3	0,87%	44	8	2,33%
Consumo industrial	69	2	0,76%	76	0	0,00%
Dessedentação animal	25	0	0,00%	34	0	0,00%
Irrigação	180	2	0,48%	189	0	0,00%
Mineração	117	0	0,00%	123	0	0,00%
Não informado	2	0	0,00%	8	1	0,99%
Outros	24	0	0,00%	45	5	0,44%
TOTAL	518	13	0,38%	599	17	0,50%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

No Quadro 9-29, encontram-se os resultados obtidos para o risco hídrico físico, obtido pela multiplicação das vazões de cada uma das interferências sob risco, conforme a metodologia de avaliação da gravidade e da duração do risco advinda dos resultados de balanço hídrico. O quadro apresenta resultados para as vazões de restrição $Q_{95\%}$ e $Q_{7,10}$ na simulação da ocorrência de uma onda de calor.

Quadro 9-29 – Risco hídrico físico de captação superficial com mudança do clima aguda - total de interferências.

UP	Volume sob risco ($Q_{95\%}$)			Volume sob risco ($Q_{7,10}$)		
	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %
1 - Alto Paraíba do Sul	111.574	1.273	0,20%	121.847	220	0,04%
2 - Rios Preto e Paraibuna	6.901	0	0,00%	7.636	39	0,04%
3 - Rios Pomba e Muriaé	28.187	4.517	1,86%	39.488	3.383	1,39%
4 - Médio Paraíba do Sul	3.717	203	0,07%	4.165	321	0,11%
5 - Piabanha	5.281	201	0,29%	6.656	247	0,35%
6 - Rio Dois Rios	2.764	29	0,12%	6.386	2.049	8,29%
7 - Baixo Paraíba do Sul	11.504	194	0,10%	12.383	116	0,06%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	2	0	0,00%	39	0	0,00%
Total Geral	169.930	6.418	0,42%	198.600	6.375	0,41%

Fonte: elaborado pelo Consórcio.

Observa-se pelo percentual incremental total que a diferença gerada por uma onda de calor não é muito expressiva. Ou seja, eventos agudos representados pela onda de calor acrescentam um risco físico cujo volume cresce entre 6,42 e 6,38 milhões de metros cúbicos nas vazões de referência respectivas de $Q_{95\%}$ e $Q_{7,10}$, mantendo-se a ordem de grandeza próxima entre as duas referências. Essa relativa estabilidade percentual sugere que os picos de demanda e as condições hidrológicas momentaneamente mais restritivas dada a ocorrência de uma onda de calor afetam a bacia de modo localizado, sem modificar substancialmente o perfil global de exposição já inscrito no risco crônico.

Mesmo assim, trata-se de um risco que requer medidas de prevenção nos locais onde ocorre, pois há grande concentração espacial, com destaque para a unidade de planejamento dos Rios Pomba e Muriaé, que apresenta o maior acréscimo absoluto, variando de 4,52 a 3,38 milhões adicionais de m³ sob risco (respectivamente na $Q_{95\%}$ e $Q_{7,10}$). A UP Rio Dois Rios, por sua vez, apresenta um salto de volume sob risco adicional na vazão de referência mais restritiva ($Q_{7,10}$), com 2,05 milhões de m³ (+8,29% em relação ao risco crônico da mudança do clima), o maior incremento relativo do quadro. A unidade de planejamento Alto Paraíba do Sul, embora lidere o volume total sob risco crônico da mudança do clima, tem aumentos marginais em termos de acréscimo de risco agudo.

Os quadros abaixo apresentam os resultados para cada setor usuário, quais sejam: indústria e mineração (Quadro 9-30), consumo humano (Quadro 9-31), agropecuária, que considera conjuntamente os usos de irrigação e dessedentação animal (Quadro 9-32), e os outros usos e outorgas não discriminadas (Quadro 9-33).

Quadro 9-30 – Risco hídrico físico de captação superficial com mudança do clima aguda - indústria e mineração

UP	Volume sob risco (Q _{95%})			Volume sob risco (Q _{7,10})		
	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %
1 - Alto Paraíba do Sul	62.328	4	0,00%	65.375	7	0,00%
2 - Rios Preto e Paraibuna	3.926	0	0,00%	4.587	0	0,00%
3 - Rios Pomba e Muriaé	5.125	5	0,01%	6.487	14	0,04%
4 - Médio Paraíba do Sul	3.218	0	0,00%	3.262	3	0,00%
5 - Piabanha	4.342	0	0,00%	4.346	0	0,00%
6 - Rio Dois Rios	970	25	0,40%	1.196	137	2,24%
7 - Baixo Paraíba do Sul	2.536	11	0,03%	2.926	0	0,00%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	1	0	0,01%	22	0	0,00%
Total Geral	82.447	45	0,01%	88.201	162	0,03%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 9-31 – Risco hídrico físico de captação superficial com mudança do clima aguda - consumo humano

UP	Volume sob risco (Q _{95%})			Volume sob risco (Q _{7,10})		
	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %
1 - Alto Paraíba do Sul	1.891	1.264	0,60%	2.083	148	0,07%
2 - Rios Preto e Paraibuna	0	0	0,00%	74	39	0,13%
3 - Rios Pomba e Muriaé	16.164	4.414	3,36%	22.311	3.278	2,49%
4 - Médio Paraíba do Sul	297	153	0,13%	607	318	0,26%
5 - Piabanha	856	201	0,35%	2.226	246	0,43%
6 - Rio Dois Rios	1.409	3	0,02%	4.652	1.892	11,18%
7 - Baixo Paraíba do Sul	2.159	183	0,20%	2.564	84	0,09%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	1	0	0,00%	17	0	0,00%
Total Geral	22.777	6.218	0,94%	34.533	6.006	0,91%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 9-32 – Risco hídrico físico de captação superficial com mudança do clima aguda - agropecuária

UP	Volume sob risco (Q _{95%})			Volume sob risco (Q _{7,10})		
	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %
1 - Alto Paraíba do Sul	47.350	4	0,00%	54.379	62	0,04%
2 - Rios Preto e Paraibuna	347	0	0,00%	347	0	0,00%
3 - Rios Pomba e Muriaé	6.480	83	0,24%	8.550	88	0,26%
4 - Médio Paraíba do Sul	202	50	11,46%	209	0	0,02%
5 - Piabanha	83	0	0,00%	83	0	0,00%
6 - Rio Dois Rios	315	1	0,08%	440	13	1,16%
7 - Baixo Paraíba do Sul	6.808	0	0,00%	6.883	20	0,04%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	0	0	0,00%	0	0	0,00%
Total Geral	61.585	137	0,06%	70.890	184	0,08%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 9-33 – Risco hídrico físico de captação superficial com mudança do clima aguda - outros usos e não discriminados

UP	Volume sob risco ($Q_{95\%}$)			Volume sob risco ($Q_{7,10}$)		
	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %	mil m ³	ΔMC mil m ³	ΔMC %
1 - Alto Paraíba do Sul	4	2	0,00%	9	3	0,00%
2 - Rios Preto e Paraibuna	2.628	0	0,00%	2.628	0	0,00%
3 - Rios Pomba e Muriaé	418	16	0,04%	2.141	3	0,01%
4 - Médio Paraíba do Sul	0	0	0,00%	88	0	0,00%
5 - Piabanha	0	0	0,00%	1	0	0,00%
6 - Rio Dois Rios	71	0	0,00%	99	6	1,16%
7 - Baixo Paraíba do Sul	0	0	0,00%	11	11	0,09%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	0	0	0,00%	0	0	0,00%
Total Geral	3.122	18	0,01%	4.976	23	0,02%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Os quadros permitem identificar que há um incremento sensível do risco hídrico por evento agudo para as interferências de consumo humano e de usos agropecuários. Estes são os usos que são mais sensíveis a esse tipo de evento, sendo que os resultados mostram que, mediante acréscimo de demanda para suportar a ocorrência de uma onda de calor, alguns locais não trazem segurança hídrica suficiente - gerando déficits. No caso do consumo humano, o acréscimo absoluto domina o total agregado (adicionais 6,22 a 6,01 milhões de m³ nas vazões respectivas $Q_{95\%}$ e $Q_{7,10}$), puxado principalmente por Rios Pomba e Muriaé (+4,41 e +3,28 milhões de m³) e por Rio Dois Rios, que apresenta o maior salto relativo na vazão mais restritiva ($Q_{7,10}$).

A resposta de risco dos usos agropecuários ao incremento das demandas hídricas em uma onda de calor é menor no agregado (+137 e +184 mil m³), porém com alguns locais que se destacam pelo aumento na vulnerabilidade: a unidade de planejamento Médio Paraíba do Sul apresenta variação relativa elevada na $Q_{95\%}$ (+11,46%), indicando sensibilidade desse setor, mesmo que os volumes absolutos modestos. Nos rios Pomba e Muriaé, os novos volumes sob risco (+83 e +88 mil m³) demonstram que o setor também deve sofrer pressão pelos eventos agudos.

Impacto econômico do risco hídrico agudo

Com base na informação acerca do risco físico agudo - que decorre da simulação de ocorrência de uma onda de calor, torna-se possível aplicar as estimativas da produção econômica unitária (R\$/m³) de cada finalidade de uso para se obter a estimativa do impacto

econômico caso o risco se materialize. O Quadro 9-34 apresenta os resultados obtidos para ambas as vazões de restrição - $Q_{95\%}$ e $Q_{7,10}$ -, pelo qual se observa o incremento de risco da ordem de R\$ 300 milhões sobre o risco climático crônico. Ou seja, a ocorrência de um evento de onda de calor na realidade do ano de 2045, deve repercutir um risco econômico adicional dessa magnitude para a região.

Quadro 9-34 – Risco hídrico econômico de captação superficial com mudança do clima aguda - total de interferências

UP	Valor econômico sob risco ($Q_{95\%}$)			Valor econômico sob risco ($Q_{7,10}$)		
	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %
1 - Alto Paraíba do Sul	5.343	63	0,16%	5.527	8	0,02%
2 - Rios Preto e Paraibuna	477	0	0,00%	481	2	0,05%
3 - Rios Pomba e Muriaé	1.341	220	1,73%	1.777	165	1,30%
4 - Médio Paraíba do Sul	618	8	0,02%	645	16	0,04%
5 - Piabanha	1.069	10	0,22%	1.137	12	0,27%
6 - Rio Dois Rios	211	6	0,44%	374	100	7,42%
7 - Baixo Paraíba do Sul	548	12	0,11%	821	5	0,05%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	0	0	0,01%	6	0	0,00%
Total Geral	9.607	318	0,27%	10.768	309	0,27%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Os resultados por finalidade de uso indicam quais as perdas incrementais do risco agudo são mais sensíveis. Para a indústria e mineração, como se lê no Quadro 9-35, não são preponderantes nesse acréscimo de risco (frente ao risco da mudança do clima crônica). As atividades econômicas derivadas do consumo humano (Quadro 9-36), por outro lado, concentram praticamente a totalidade desse acréscimo de risco, sendo que é esse o setor que mais precisa incorporar elementos mitigadores do risco. A ocorrência de uma onda de calor eleva o risco da mudança do clima crônica em R\$ 300 milhões. O setor agropecuário, por sua vez, é muito pouco impactado, não obstante suas demandas sejam bastante elevadas durante o episódio de onda de calor. Isso indica que há resiliência no meio rural para suportar esse tipo de evento, como se observa no Quadro 9-37. Os outros usos e outorgas não discriminadas são apresentados no Quadro 9-38.

Quadro 9-35 – Risco hídrico econômico de captação superficial com mudança do clima aguda - indústria e mineração

UP	Valor econômico sob risco ($Q_{95\%}$)			Valor econômico sob risco ($Q_{7,10}$)		
	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %
1 - Alto Paraíba do Sul	4.723	0	0,00%	4.819	0	0,00%
2 - Rios Preto e Paraibuna	343	0	0,00%	343	0	0,00%

UP	Valor econômico sob risco (Q _{95%})			Valor econômico sob risco (Q _{7,10})		
	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %
3 - Rios Pomba e Muriaé	450	0	0,00%	475	2	0,06%
4 - Médio Paraíba do Sul	601	0	0,00%	608	1	0,00%
5 - Piabanha	1.025	0	0,00%	1.026	0	0,00%
6 - Rio Dois Rios	134	6	1,22%	134	6	1,22%
7 - Baixo Paraíba do Sul	366	3	0,06%	617	0	0,00%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	0	0	0,01%	6	0	0,00%
Total Geral	7.643	9	0,01%	8.028	9	0,01%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 9-36 – Risco hídrico econômico de captação superficial com mudança do clima aguda - consumo humano

UP	Valor econômico sob risco (Q _{95%})			Valor econômico sob risco (Q _{7,10})		
	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %
1 - Alto Paraíba do Sul	93	62	0,60%	103	7	0,07%
2 - Rios Preto e Paraibuna	0	0	0,00%	4	2	0,13%
3 - Rios Pomba e Muriaé	798	218	3,36%	1.102	162	2,49%
4 - Médio Paraíba do Sul	15	8	0,13%	30	16	0,26%
5 - Piabanha	42	10	0,35%	110	12	0,43%
6 - Rio Dois Rios	70	0	0,02%	230	93	11,18%
7 - Baixo Paraíba do Sul	107	9	0,20%	127	4	0,09%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	0	0	0,00%	1	0	0,00%
Total Geral	1.125	307	0,94%	1.706	297	0,91%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 9-37 – Risco hídrico econômico de captação superficial com mudança do clima aguda - agropecuária

UP	Valor econômico sob risco (Q _{95%})			Valor econômico sob risco (Q _{7,10})		
	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %
1 - Alto Paraíba do Sul	527	0	0,00%	605	1	0,04%
2 - Rios Preto e Paraibuna	4	0	0,00%	4	0	0,00%
3 - Rios Pomba e Muriaé	72	1	0,24%	95	1	0,26%
4 - Médio Paraíba do Sul	2	1	11,46%	2	0	0,02%
5 - Piabanha	1	0	0,00%	1	0	0,00%
6 - Rio Dois Rios	4	0	0,08%	5	0	1,16%
7 - Baixo Paraíba do Sul	76	0	0,00%	77	0	0,04%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	0	0	0,00%	0	0	0,00%
Total Geral	685	2	0,06%	788	2	0,08%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 9-38 – Risco hídrico econômico de captação superficial com mudança do clima aguda - outros usos e não discriminados

UP	Valor econômico sob risco (Q _{95%})			Valor econômico sob risco (Q _{7,10})		
	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %	R\$, MM	ΔMC R\$, MM	ΔMC %
1 - Alto Paraíba do Sul	0	0	0,00%	0	0	0,00%
2 - Rios Preto e Paraibuna	130	0	0,00%	130	0	0,00%
3 - Rios Pomba e Muriaé	21	1	0,04%	106	0	0,01%
4 - Médio Paraíba do Sul	0	0	0,00%	4	0	0,00%
5 - Piabanha	0	0	0,00%	0	0	0,00%
6 - Rio Dois Rios	4	0	0,00%	5	0	1,16%
7 - Baixo Paraíba do Sul	0	0	0,00%	1	1	0,09%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	0	0	0,00%	0	0	0,00%
Total Geral	154	1	0,01%	246	1	0,02%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Impacto social do risco hídrico agudo

Dadas as interferências de abastecimento humano em suas localizações e perfis de segurança hídrica, estima-se o número de pessoas sob risco adicional frente à ocorrência de uma onda de calor. Conforme observado no subitem anterior, que destaca esse setor usuário como o mais sensível em relação à ocorrência episódica desse evento climático, a quantidade de pessoas adicionais sob risco também é significativa: são previstos, ao todo, incrementos entre 37,36 e 42,82 mil pessoas, a depender das vazões de referência (Q_{7,10} e Q_{95%}, respectivamente) - conforme se lê no Quadro 9-39.

Quadro 9-39 – Risco hídrico da população humana abastecida por captação superficial com mudança do clima aguda

UP	Pessoas sob risco (Q _{95%})			Pessoas sob risco (Q _{7,10})		
	Pessoas	ΔMC pessoas	ΔMC %	Pessoas	ΔMC pessoas	ΔMC %
1 - Alto Paraíba do Sul	7.267	4.524	0,29%	8.728	1.384	0,09%
2 - Rios Preto e Paraibuna	0	0	0,00%	358	187	0,27%
3 - Rios Pomba e Muriaé	96.835	32.705	4,90%	121.096	25.579	3,83%
4 - Médio Paraíba do Sul	3.255	1.680	0,17%	6.073	3.149	0,33%
5 - Piabanha	7.415	1.865	0,48%	19.289	1.684	0,43%
6 - Rio Dois Rios	9.255	37	0,03%	17.238	3.931	2,91%
7 - Baixo Paraíba do Sul	23.522	2.007	0,25%	28.481	1.451	0,18%
8 - Sub-Bacia do Rio Pirai	11	2	0,00%	190	0	0,00%
Total Geral	147.560	42.820	0,92%	201.453	37.364	0,80%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Segundo um levantamento sobre o impacto econômico de ondas de calor no estado de Victoria, na Austrália, foram identificadas perdas previstas de 131 a 291 milhões de dólares

australianos quando da ocorrência de eventos severos e extremos, representando, respectivamente, 0,04% e 0,08% do PIB estadual (NCE, 2018). A análise econômica considerou a repercussão da onda de calor na estrutura econômica do estado.

9.2. IMPACTOS RELACIONADOS A INUNDAÇÕES

O item antecedente avaliou os impactos relacionados aos riscos de déficit hídrico, tanto em sua situação atual (risco hidrológico de base), como pela alteração prevista pela mudança do clima, seja ela paulatina (risco crônico) ou repentina (risco agudo, simulado pela ocorrência de uma onda de calor). O que sublinha o risco hídrico vinculado ao déficit é, evidentemente, a perspectiva de falta de água para o atendimento de todas as demandas hídricas. No presente item, aborda-se o risco hidrológico advindo da faceta oposta à da escassez: o excesso de água que pode causar inundações.

Conforme já fora abordado nos capítulos 5 e 8, os eventos de inundação são frequentes na bacia do rio Paraíba do Sul e promoveram perdas econômicas da ordem mínima de R\$ 2,65 bilhões nos últimos 29 anos decorridos entre o primeiro (1995) até o último (2025) registro na base de dados respectiva da Defesa Civil. As perdas econômicas resultam da soma dos danos diretos (em habitações, infraestrutura e instalações públicas e privadas) e dos prejuízos econômicos (reportados nos setores público e privado, sendo estes últimos discriminados em agricultura, pecuária, indústria e serviços).

9.2.1. Risco hídrico de base (sem efeito das mudanças do clima)

A análise dos riscos de inundação sob cenário de mudança do clima, tal como a análise dos riscos relacionados ao déficit hídrico (item 9.1), requer a aplicação de metodologia adequada para estimar, primeiramente, o risco de base. Esse é o risco que atualmente ocorre na bacia do rio Paraíba do Sul, e que pode ser agravado devido à mudança do clima. Uma vez que os eventos hidrológicos de inundação guardam forte associação às vazões extremas e à submersão de áreas fora do leito regular de rios, geralmente em função da ocorrência de chuvas intensas, é possível associar registros hidrológicos a dados de impacto, consolidando curvas de probabilidade de danos.

A curva de probabilidade de excedência de danos representa a relação entre a magnitude esperada das perdas econômicas e a frequência (ou inversamente, o tempo de retorno) dos eventos hidrológicos. Em outras palavras, ela expressa a probabilidade de que os danos superem um determinado valor monetário em um dado ano. Essa abordagem é utilizada para o cômputo de perdas previstas, pois permite quantificar não apenas os danos médios anuais esperados, mas também avaliar o risco associado a diferentes intensidades de eventos. A

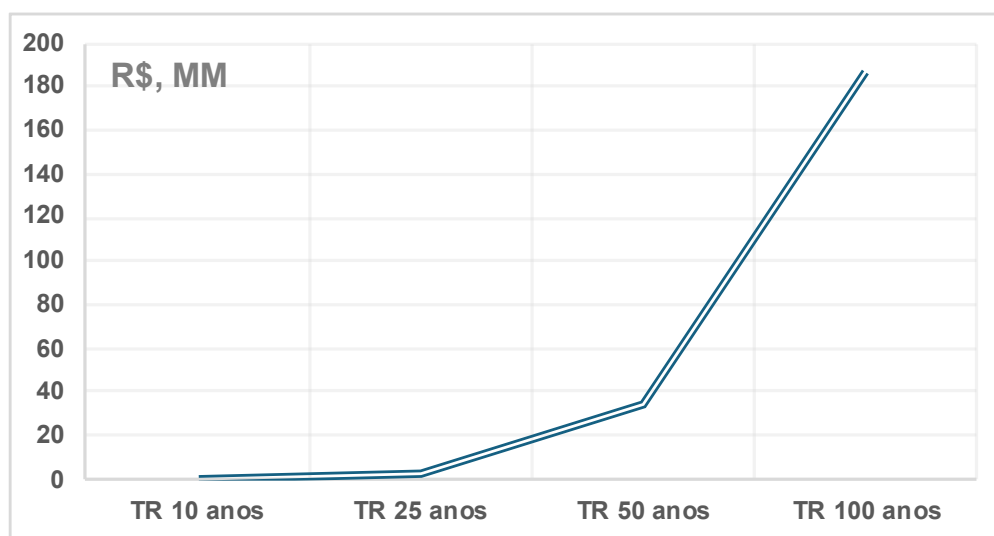
perspectiva de se trabalhar com as alterações nas intensidades dos eventos é uma das características mais relevantes para estimar perdas em função dos eventos climáticos futuros aumentados pela mudança do clima.

O roteiro de elaboração das curvas de probabilidade de excedência de danos para as inundações inicia-se pela identificação e sistematização dos eventos que tiveram suas perdas econômicas reportadas no respectivo banco de dados do Atlas de Desastres Naturais no Brasil, conforme apresentado no capítulo 5. Para cada um dos quarenta municípios com as maiores perdas econômicas associadas aos eventos de inundação, que congregam 96,6% das perdas totais reportadas (e que somam R\$ 2,56 bilhões a preços de 2024), foi pesquisada a existência de estação fluviométrica representativa. Esse levantamento, realizado em ambiente SIG, considerou a existência das estações mais próximas possíveis nos cursos d'água que cruzam as manchas urbanas dos municípios afetados. Não foi possível associar todos os municípios a uma estação pois ou são inexistentes, ou se encontram nas proximidades, mas em outros cursos d'água. No total, 33 municípios foram associados a 26 estações fluviométricas.

Os eventos de inundação ocorridos em cada um dos 33 municípios, cada qual associado à uma perda econômica, foram segregados pelas datas de ocorrência (mês e ano), de acordo com o reportado no Atlas de Desastres. Consultou-se, então, as séries hidrológicas da estação fluviométrica correspondente para filtrar a vazão máxima dos corpos d'água que ocorreu na mesma data de registro do desastre (mês e ano). Supõe-se, evidentemente, que essa vazão máxima esteja diretamente associada à ocorrência do desastre.

Com base nas vazões máximas associadas aos eventos, pode-se compará-las às respectivas séries históricas a fim de produzir os tempos de retorno (TR) dos eventos que geraram cada um dos registros de inundação e que, consequentemente, estão associados à um determinado nível de perda econômica. A título de exemplo, apresenta-se na Figura 9-2 o resultado detalhado para o município de Campos dos Goytacazes, para o qual foi possível estabelecer, a partir das séries históricas de vazão e seus tempos de retorno, a associação entre as perdas econômicas dos eventos e estes últimos.

Figura 9-2 – Curva de perdas históricas associadas aos TRs de eventos de inundações em Campos dos Goytacazes (R\$, milhões)



Fonte: elaborado pelo Consórcio

A curva torna evidente que a magnitude dos eventos é determinante na promoção das perdas econômicas correspondentes. A ocorrência de um evento de vazão de $1.483 \text{ m}^3/\text{s}$, cujo tempo de retorno é de 10 anos - calculado pela série fluviométrica de 32 mil medições que cobre de 1934 até 2021 -, promove zero perdas econômicas (ou seja, não há evento associado a essa vazão). Já a ocorrência do evento de dezembro de 2005, que gerou perdas de R\$ 2,97 milhões, encontra uma vazão máxima na série histórica que é corresponde a um TR de 37 anos ($2.481 \text{ m}^3/\text{s}$). Já em novembro de 2011, há registro de perdas por inundação da ordem de R\$ 34,39 milhões, e verifica-se no mesmo mês uma vazão máxima de $4.393 \text{ m}^3/\text{s}$ associada ao TR de 50 anos. Já em dezembro de 2008, uma vazão associada ao TR de 100 anos ($5 \text{ mil m}^3/\text{s}$) gerou as maiores perdas registradas, da ordem de R\$ 186,80 milhões.

Nota-se que cada conjunto de municípios agregados pela estação fluviométrica, que representa o risco físico de inundação, tem sua própria curva em função dos eventos e das perdas a eles associados. A opção pela exemplificação da metodologia para o município de Campos dos Goytacazes condiz com a grande frequência de eventos de inundação (13), o reporte municipal das perdas econômicas para parte expressiva destes (5 eventos com tais registros), além da existência de uma estação fluviométrica na área urbana do município que registra as vazões em série histórica longa e consistente. Essas mesmas características, infelizmente, raramente se repetem.

O município de Aperibé, por exemplo, também conta com um grande número de ocorrências de inundação (14), sendo que para 7 deles há registro de perdas econômicas. Também se identifica, na franja nordeste da mancha urbana do município, uma estação fluviométrica, mas suas medições foram iniciadas no ano de 2016, e 10 dos eventos ocorreram antes dessa data. Os outros 4 eventos são, efetivamente, dois, pois os registros se repetem para janeiro e

fevereiro de 2020, e em janeiro e fevereiro de 2022. O evento de 2020 não traz associado o valor das perdas, muito embora seja possível calcular o TR (de 100 anos). Já o evento de 2022, que tem registro do valor econômico (R\$ 1,04 milhão), está fora da amplitude máxima das séries de vazão consistidas, que se estendem até dezembro de 2021. Ou seja, mesmo sabendo-se que o município de Aperibé apresenta inundações com frequência, e que os registros indicam perdas de R\$ 100 milhões, torna-se impossível associar as perdas às vazões observadas. Ainda em outros casos, como em Nova Friburgo, Barra Mansa, Cunha e Carmo, existe apenas um registro de perda econômica, mesmo havendo mais registros de episódios de inundação, o que também impossibilita a construção da curva de excedência de probabilidade de dano, pois não se tem registros pretéritos. A heterogeneidade dos registros de perdas e das séries de vazão faz com que haja diversos outros casos com situações distintas entre estes três comentados (registros em datas que não são cobertas pelas séries fluviométricas; falta de registros de perdas; etc.).

De forma a manter a coerência metodológica necessária para produzir uma estimativa de valores adequada, gerando assim uma primeira aproximação das perdas associadas aos eventos de inundação na bacia, adotou-se uma coerente simplificação: adotou-se a premissa de que os eventos de pior materialização de perdas econômicas estão associados a TR superiores a 100 anos. Realizou-se, então, a associação das perdas dos eventos de TR inferiores, por meio de interpolação com base nas vazões e nos registros de perdas econômicas, alocadas na proporção da TR dos eventos ocorridos de maior proximidade aos de 10, 25 e 50 anos. Para os casos que contam apenas com um registro, foi adotado este como sendo associado ao TR de 100, sendo que para os demais tempos de retorno, o valor das perdas foi considerado nulo (na prática, é como se apenas um evento de grande magnitude gerasse as perdas).

Em complemento aos valores históricos, pode-se construir uma curva equivalente contabilizando-se a probabilidade associada aos valores em risco, uma vez que o TR de 100 anos tem uma probabilidade de 1% de ocorrência, 2% para o TR de 50 anos, 4% para o TR de 25 anos e 10% para o TR de 10 anos. A perda associada à probabilidade remete a expectativa de materialização do valor econômico em um ano qualquer, podendo-se estimar um valor econômico anualizado que se espera, a qualquer ano, perder por inundações. Esse valor pode ser calculado com base na média do dano previsto para um dado TR com o dano previsto para o TR precedente, multiplicada pela diferença na probabilidade de excedência entre os mesmos momentos. Trata-se de um dos métodos de estimação das perdas anualizadas proposto por Olsen *et. al* (2015), de simples aplicação e bastante difundido.

A aplicação do método para a curva de probabilidade de excedência de dano do município de Campos dos Goytacazes revela um valor anualizado de R\$ 1,57 milhões. O resultado representa a combinação entre a magnitude e a frequência associada aos eventos passados. Trata-se da expectativa de perdas anuais associada aos eventos de inundação que representa, o agregado de 20 anos de horizonte temporal típico de um plano de bacia, significativos R\$ 31,38 milhões. Este valor de perdas esperadas em função do risco de inundação tende a aumentar no futuro em decorrência tanto da crescente vulnerabilidade e exposição dos ativos ao risco, como pelos perigos hidrometeorológicos crescentes, promovidos pela mudança do clima.

O Quadro 9-40 apresenta os valores anualizados de risco de inundação calculados para cada um dos 26 municípios para os quais as simplificações adotadas se fizeram possível, ordenados pelos maiores resultados. Para referência, o valor total das perdas históricas também é apresentado, pelo qual se nota que não necessariamente os locais que sofreram com as maiores perdas históricas detêm os maiores valores de risco anualizados, pois estes são uma função da magnitude e da probabilidade de ocorrência.

Quadro 9-40 – Expectativa anualizada de perdas econômicas por eventos de inundação nos municípios da bacia do rio Paraíba do Sul sem mudança do clima

Município	Perdas históricas (R\$, MM)	Perdas anualizadas (R\$, MM)	Município	Perdas históricas (R\$, MM)	Perdas anualizadas (R\$, MM)
Muriaé	313,29	1,67	Santo Antônio de Pádua	48,08	0,42
Cardoso Moreira	95,33	1,58	Cambuci	69,11	0,28
Campos dos Goytacazes	224,17	1,57	Carangola	56,16	0,27
Paraíba do Sul	271,50	1,45	Miradouro	30,91	0,19
Itaperuna	90,83	1,43	Juiz de Fora	39,68	0,15
Ubá	71,45	1,29	Sapucaia	21,94	0,14
Nova Friburgo	248,01	1,24	Barra Mansa	26,04	0,13
Eugenópolis	16,75	1,20	Rio Novo	22,07	0,12
Cataguases	259,05	0,99	Cunha	16,96	0,08
Porciúncula	31,83	0,98	Bom Jardim	12,09	0,06
Natividade	15,60	0,98	Pirapetinga	12,67	0,06
S. J. do Vale do Rio Preto	143,63	0,93	Carmo	9,97	0,05
Aperibé	105,33	0,80	Macuco	14,22	0,04

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Na somatória dos municípios, tem-se uma expectativa de perda econômica anual de R\$ 18,09 milhões. Sabe-se que essa figura é subestimada, tanto pela característica dos dados de entrada de eventos (abordados no capítulo 5), como pela impossibilidade de aplicação da metodologia para todos os locais que sofreram inundações. Inobstante, observa-se que o

quadro acima cobre 114 eventos de inundação (50% do total de eventos com registros de perdas econômicas) e um total de R\$ 2,27 bilhões em perdas (86% das perdas totais).

9.2.2. Risco hídrico da mudança climática - riscos agudos

A mudança do clima deverá trazer um efeito de deslocamento nas curvas de perdas e suas probabilidades, já que os eventos de hoje terão seus períodos de retorno (probabilidades de ocorrer) alterados no futuro - um evento de vazão com TR 50 hoje poderá ter um TR 45 no futuro, por exemplo. Nos estudos das disponibilidades hídricas na bacia do rio Paraíba do Sul, que abordou a mudança do clima sob cenário de emissões SSP4-4.5, foram realizadas projeções acerca do comportamento dos tempos de retorno de uma vazão futura com base nas séries de dados atuais. Uma vez que esses dados foram calculados para as estações fluviométricas e são apresentados para o prazo correspondente ao ano de 2045 (denominado de "curto prazo" no referido estudo) para os TR de 10, 25, 50 e 100 anos, torna-se possível aplicar os tempos de retorno sob a influência da mudança do clima para calcular a nova curva de probabilidade de excedência de danos.

Como exemplo da mecânica de cálculo, tem-se o resultado hipotético de uma estação fluviométrica cujo TR 100 atual é projetado, sob mudança climática, para equivaler a um TR de 250 anos. Em outras palavras, eventos que antes eram mais raros (TR de 250 anos, ou seja, uma probabilidade de 0,4%) agora ocorrem com frequência equivalente a um TR de 100 anos no cenário alterado pelo clima (probabilidade de 1,0%). Isso implica, portanto, em um fator de ajuste de 2,5 (250/100), significando que as projeções colocam esse mesmo evento extremo com uma frequência superior em 2,5 vezes. Ao se transferir esse ajuste para o recálculo da curva de probabilidade de excedência de dados sob mudança do clima, o mesmo nível de perda econômica atualmente associado ao TR de 100 anos passa a ser esperado com um TR de 40 anos (1% de probabilidade majorado em 2,5 vezes).

Na comparação das perdas econômicas anualizadas entre as curvas atuais e futuras, encontra-se a majoração do risco climático de eventos de inundação. O Quadro 9-41 apresenta os resultados do recálculo dos valores anualizados em risco, que no total dos 26 municípios chega a R\$ 26,05 milhões, ou seja, um valor 44,1% superior ao risco identificado na situação de base, sem a consideração da alteração climática. Trata-se de um resultado bastante expressivo, que monta em um risco adicional anualizado de inundações de R\$ 7,97 milhões.

Quadro 9-41 – Expectativa anualizada de perdas econômicas por eventos de inundação nos municípios da bacia do rio Paraíba do Sul com mudança do clima

Município	Perdas anualizadas (R\$, MM)	ΔMC nas perdas anualizadas	Município	Perdas anualizadas (R\$, MM)	ΔMC nas perdas anualizadas
Muriae	2,32	38,59%	Santo Antônio de Pádua	0,42	-1,19%
Cardoso Moreira	1,83	15,98%	Cambuci	0,60	117,70%
Campos dos Goytacazes	2,79	77,93%	Carangola	0,21	-21,84%
Paraíba do Sul	2,82	95,04%	Miradouro	0,22	17,07%
Itaperuna	1,42	-0,44%	Juiz de Fora	0,26	70,00%
Ubá	2,01	55,21%	Sapucaia	0,36	155,32%
Nova Friburgo	2,73	120,00%	Barra Mansa	0,31	140,00%
Eugenópolis	1,23	2,64%	Rio Novo	0,17	42,95%
Cataguases	0,94	-4,59%	Cunha	0,14	60,00%
Porciúncula	0,90	-7,80%	Bom Jardim	0,13	99,25%
Natividade	0,90	-7,80%	Pirapetinga	0,08	50,00%
S. J. do Vale do Rio Preto	2,26	142,31%	Carmo	0,10	100,00%
Aperibé	0,84	4,58%	Macuco	0,08	90,00%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

O resultado se alinha com os expressivos aumentos nos TRs encontrados nos estudos das disponibilidades hídricas na bacia do rio Paraíba do Sul sob cenário SSP4-4.5, que ocorrem para a maior parte das estações fluviométricas. Não obstante, para algumas delas há redução da ameaça climática, o que pode ser verificado pela consequente redução do valor anualizado das perdas esperadas. Nota-se que em alguns municípios específicos, como em Sapucaia, São José do Vale do Rio Preto, Barra Mansa, Nova Friburgo, Cambuci e Carmo, os aumentos no risco de inundação provocados pela mudança do clima são muito expressivos e mais que dobram as perdas esperadas na situação atual.

9.3. PROPOSIÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE PRIORIZAÇÃO DE DEMANDAS E CONSIDERAÇÃO OPERACIONAL NO BALANÇO HÍDRICO

Os subitens anteriores deste capítulo e o capítulo anterior apresentaram os impactos referentes a condições de escassez hídrica e mudanças climáticas para cada finalidade de uso da água, considerando suas características e seus efeitos econômicos e sociais. Nesse sentido, para cada bacia hidrográfica, é possível identificar subsídios para priorização de demandas em uma situação de crise hídrica ou falta de disponibilidade para atender a todos os usos.

Vale destacar que a responsabilidade de priorização é do Comitê de Bacia Hidrográfica, com o apoio técnico das agências de águas / entidades delegatárias e dos órgãos gestores de

recursos hídricos. De toda forma, critérios podem ser considerados nas tomadas de decisão, a partir das análises realizadas, sendo possível citar alguns:

- Atendimento a princípios legais de priorização, considerando a Lei Federal nº 9433/1997, que dispõe serem prioritários os usos para consumo humano e a dessedentação animal. Quanto a esse primeiro ponto, importante destacar que consumo humano é diferente de abastecimento público urbano, uma vez que as captações para esta finalidade também abrangem usos comerciais e por vezes inclusive industriais que utilizam a partir das redes de concessionárias de saneamento. Assim, em uma situação de priorização formal, há que se distinguir tais usos dentro dos sistemas de abastecimento público;
- Usos com maior benefício social: nesses casos, importante verificar aqueles que apresentarão melhores efeitos para a manutenção da vida em sociedade durante o período de escassez hídrica ou que não levem ao incremento de problemas futuros. Assim, cabe a discussão sobre usos para irrigação de culturas x usos industriais, podendo entender, em algumas situações, que os primeiros são adequados para produção de alimentos para a população. Por outro lado, os segundos podem ser responsáveis pela manutenção de empregos e de ganho financeiro da sociedade, o que permite que se busque alimentos advindos de outras regiões que não estejam sofrendo com a escassez hídrica no mesmo período;
- Usos com maior eficiência econômico-financeira: os subitens anteriores deste documento apresentaram informações relevantes referentes a cada setor usuário no que se refere aos benefícios financeiros obtidos por metro cúbico de água consumida. Nesses casos, verifica-se que os usos industriais apresentam maior valor agregado ao uso da água, o que indicaria tais finalidades como potencial importante de manutenção dos ganhos financeiros da sociedade durante o período de escassez.

Vale destacar que essa análise de priorização deve ser realizada caso a caso, de acordo com a ocorrência da escassez hídrica, envolvendo período esperado, nível de escassez e percentual de usos que deverão ser racionados. Além disso, tal situação deve ser diferenciada por bacia hidrográfica, considerando maiores percentuais de usos para cada finalidade em função das características e vocações econômicas de cada região.

Outro aspecto de grande relevância e resultante das análises desenvolvidas neste documento trata de questões operacionais referentes ao balanço hídrico em situações de ocorrências de crises hídricas.

Com base nos estudos aqui realizados, é possível propor as seguintes estratégias de consideração operacional do impacto econômico e social do déficit hídrico no âmbito do plano de bacia e na relação de gestão hídrica com vistas à manutenção de um balanço hídrico apropriado, segregados por principais setores usuários. São abordados quatro tópicos: (i) portfólios de medidas de adaptação na escala da bacia; (ii) gestão das outorgas sob incerteza; (iii) dimensionamento e regras operativas de infraestrutura hídrica; e (iv) recomendações aos setores usuários para priorizar ganhos de eficiência hídrica e reúso.

Desenho de portfólios de medidas de adaptação na escala da bacia, abordando desde aspectos da gestão da demanda hídrica como da oferta, *pari passu* a conservação de elementos naturais, fomento da recarga de aquíferos e lençóis e instrumentos econômicos.

A implementação de portfólios integrados de adaptação requer uma abordagem sistêmica que combine medidas de gestão da demanda e da oferta com conservação ambiental e instrumentos econômicos, considerando as especificidades e interdependências de cada setor usuário na escala da bacia hidrográfica. Um exemplo de integração de planejamento é o tratamento de águas pluviais urbanas em sistemas híbridos que podem integrar pavimentos permeáveis e jardins de chuva (infraestrutura verde) com galerias e reservatórios de retenção (infraestrutura cinza), criando uma cascata de tratamento que remove poluentes progressivamente enquanto atenua picos de vazão. Já em sistemas de abastecimento, a combinação de proteção de mananciais através de pagamentos por serviços ambientais (infraestrutura verde) com estações de tratamento avançado (infraestrutura cinza) pode reduzir custos operacionais de longo prazo e permitir o reúso para agricultura, fechando um ciclo completo que perpassa diversos usuários das águas e favorece a todos na bacia hidrográfica. Para controle de inundações, a restauração de planícies de inundação (infraestrutura verde) combinada com regras operativas emergenciais de reservatórios e estações de bombeamento preexistentes (infraestrutura cinza) pode proporcionar proteção mais efetiva e econômica que soluções puramente convencionais.

Para os setores de abastecimento humano urbano e rural, o portfólio pode incluir diversificação de fontes (superficiais, subterrâneas, reúso), criação de fundos de segurança hídrica, implementação de tarifas progressivas que incentivem a conservação e desenvolvimento de mercados de água em situações críticas. No consumo industrial e termoeletrônico, as medidas podem abranger incentivos fiscais para investimentos em eficiência hídrica, criação de bancos de água para transações temporárias entre usuários, implementação de certificações ambientais que valorizem o uso racional da água e estabelecimento de seguros contra riscos hidrológicos. Para a irrigação, o portfólio pode

contemplar programas de conversão tecnológica subsidiada, pagamentos por serviços ambientais para produtores que adotem práticas conservacionistas, criação de cooperativas de usuários para gestão coletiva de recursos e implementação de zoneamentos agrícolas baseados em disponibilidade hídrica. A dessedentação animal e aquicultura podem se beneficiar, além dos programas da irrigação, de assistência técnica para manejo sustentável, linhas de crédito para infraestrutura hídrica e integração com esquemas de conservação de nascentes e áreas ripárias. Para mineração e reservatórios, as medidas podem incluir compensações ambientais direcionadas à conservação hídrica, fundos setoriais para pesquisa e desenvolvimento de tecnologias eficientes e parcerias público-privadas para implementação de soluções baseadas na natureza que beneficiem múltiplos usuários na bacia.

Gestão de outorgas: utilizar as outorgas para a gestão sob incerteza climática, ajustando volumes outorgáveis com fatores de segurança que se alteram sob cenários climáticos ou mesmo que são revistas mediante gatilhos sazonais.

A gestão adaptativa das outorgas representa uma estratégia fundamental para equilibrar a segurança hídrica com a viabilidade econômica dos usos múltiplos da água. Essa abordagem envolve a implementação de sistemas de outorga dinâmicos que incorporam fatores de segurança variáveis conforme as condições hidrológicas e climáticas projetadas, permitindo ajustes automáticos ou pré-programados dos volumes autorizados mediante gatilhos pré-estabelecidos. Esses gatilhos podem, por exemplo, ser ajustados a cada trimestre (a depender das perspectivas de pluviosidade, por exemplo), ou ainda a cada ano a partir de perspectivas climáticas mais amplas, como a ocorrência de La Niña ou El Niño, por exemplo.

Para a irrigação, este mecanismo é particularmente relevante dado seu caráter sazonal e a possibilidade de ajustar cronogramas de plantio e técnicas de manejo conforme a disponibilidade hídrica. Sabendo-se antecipadamente da restrição hídrica, o produtor rural pode optar por uma cultura menos hidro intensiva, ou até mesmo por não plantar a mesma quantidade, garantindo que a oferta hídrica prevista será suficiente para a quantidade plantada. No consumo industrial, especialmente em setores com processos flexíveis, a outorga adaptativa permite planejamento antecipado de reduções temporárias ou implementação de tecnologias de redundância e estoque de água. Com antecipação, as indústrias podem gerar maiores estoques de insumos hidro intensivos, utilizando-os no período de restrição hídrica sem a contrapartida do consumo de água. Para aquicultura, essa estratégia possibilita o ajuste de densidades de cultivo e ciclos produtivos em função da disponibilidade de água, uma vez que o ciclo dos peixes é relativamente curto e diferentes

densidades podem ser cultivadas com menor volume de água. A mineração também se beneficia dessa abordagem ao poder programar operações de lavra e beneficiamento considerando restrições hídricas sazonais, embora na bacia do rio Paraíba do Sul a extração de areia, pedra e cascalho no leito dos rios tenda a sofrer menores decorrências. Nos reservatórios, a gestão adaptativa das outorgas permite otimizar os níveis operacionais considerando tanto as perdas por evaporação quanto as demandas a jusante.

Dimensionamento e regras operativas de infraestrutura hídrica considerando eventos extremos sob mudança do clima e que incorporem opções de Soluções baseadas na Natureza.

O planejamento de infraestrutura hídrica resiliente demanda a integração de cenários climáticos extremos no dimensionamento, combinando soluções convencionais de engenharia com alternativas baseadas na natureza, de forma a agregar resiliência e co-benefícios sem a contrapartida de custos muito elevados. Afinal, abordagens híbridas frequentemente apresentam vantagens econômicas significativas quando analisadas em ciclo de vida completo e, embora possam demandar investimentos iniciais mais complexos devido à necessidade de coordenação entre diferentes tipos de infraestrutura, os custos operacionais tendem a ser menores devido à menor demanda energética da infraestrutura verde e aos múltiplos benefícios fornecidos (GIZ, 2023). A diversificação de tecnologias também reduz riscos operacionais, uma vez que falhas em um componente podem ser parcialmente compensadas por outros.

Essa estratégia é importante para as companhias de abastecimento e esgotamento sanitário ao dimensionarem e instalarem sistemas de captação, tratamento, distribuição e armazenamento de água, bem como tecnologias, locais e dimensões das estações de tratamento de efluentes. Requer-se dos sistemas que sejam robustos e capazes de manter a operação mesmo durante crises hídricas prolongadas, incluindo a implementação de redes de distribuição redundantes, reservatórios estratégicos e sistemas de reúso. Para o abastecimento humano rural, o foco recai sobre soluções descentralizadas como cisternas, pequenos reservatórios comunitários e sistemas de captação de água de chuva integrados a paisagens naturais. No setor termoeletrico, essa abordagem envolve o dimensionamento de sistemas de resfriamento que incorporem tecnologias menos hidro intensivas, além de reservatórios ou acordos para uso de águas reservadas para manter a capacidade de geração em períodos críticos. Para dessedentação animal, a estratégia inclui o desenvolvimento de bebedouros eficientes, pequenos açudes e sistemas de captação que aproveitem a drenagem

natural. Os reservatórios se beneficiam da integração com áreas úmidas construídas e zonas ripárias restauradas que reduzem perdas por evaporação e melhoram a qualidade da água.

Outras recomendações aos setores usuários vão no sentido de priorizar ganhos de eficiência hídrica e reúso, além da aceitabilidade de riscos e priorizações de usos mediante a ocorrência de eventos extremos. A promoção da eficiência hídrica e do reúso constitui estratégia para maximizar o aproveitamento dos recursos disponíveis, especialmente frente aos cenários de escassez. No consumo industrial, essa abordagem envolve a implementação de circuitos fechados de resfriamento, tratamento e reúso de efluentes, otimização de processos produtivos e adoção de tecnologias menos intensivas em água. Para a irrigação, as medidas incluem transição para sistemas de irrigação localizada (gotejamento e microaspersão), manejo baseado em sensores de umidade do solo, seleção de culturas menos demandantes em água e implementação de práticas de agricultura de precisão. Na aquicultura, a eficiência é promovida através de sistemas de recirculação, tratamento biológico de efluentes e integração com outros usos como piscicultura-agricultura. A mineração pode implementar circuitos fechados de água de processo, tratamento e reúso para as operações de lavagem e beneficiamento. No abastecimento humano urbano, as estratégias englobam programas de redução de perdas na distribuição, incentivos ao reúso residencial e predial, implementação de sistemas de aproveitamento de água pluvial e campanhas de conscientização sobre uso racional.

O que permeia todas as estratégias de adaptação e resiliência é justamente o papel estratégico e único do Comitê de Bacia Hidrográfica. Como fórum de governança participativa e descentralizada, torna-se o ente mais apropriado para promover, articular e, por meio da Agência de Bacia, implementar as soluções em escala de bacia hidrográfica, dado que sua composição tripartite (poder público, usuários de água e sociedade civil) confere legitimidade e capacidade técnica para mediar interesses diversos através de instrumentos como o Plano de Recursos Hídricos da Bacia. A partir dele, podem ser pactuados zoneamentos integrados, a cobrança diferenciada pelo uso da água para incentivar as soluções integradas e financiamento de programas de pagamento por serviços ambientais. Sua capacidade institucional permite coordenação multi-setorial e multi-escalar essencial para sistemas híbridos que demandam ações simultâneas em propriedades privadas, espaços públicos e infraestrutura regional, facilitando parcerias público-privadas, mediando conflitos entre diferentes usos da água e do solo, promovendo inovação através de projetos piloto e centros de demonstração, estabelecendo monitoramento integrado para gestão adaptativa baseada em evidências, e articulando políticas hídricas com outras políticas setoriais, como a urbana, a agrícola e a ambiental, todas influenciando a viabilidade de soluções conjuntas.

10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este documento trata do Produto 6 do estudo em desenvolvimento para a avaliação das demandas hídricas da bacia do rio Paraíba do Sul e revisão do balanço hídrico. Nesse contexto, considerando o processo evolutivo do estudo, trata da avaliação de efeitos de mudanças climáticas nos balanços hídricos, bem como os impactos econômico e social social gerados. A seguir são apresentadas as principais considerações referentes aos estudos desenvolvidos para este produto e seus resultados obtidos.

No que se refere às considerações sobre o risco de déficit hídrico, alguns aspectos podem ser expostos. O risco de base, calculado para o Cenário de Maior Pressão (2045) sem mudança do clima adicional, revela uma parcela relevante do sistema sob insegurança hídrica. Em termos físicos, cerca de 8,0% das demandas totais ficam sob risco na vazão de referência $Q_{95\%}$ e 9,4% na $Q_{7,10}$. Esse volume sob risco apresenta heterogeneidade espacial, com as unidades de planejamento dos Rios Pomba e Muriaé, Piabanha e Rio Dois Rios, apresentando as maiores frações de volume sob risco; já a UP do Médio Paraíba do Sul se mantém confortável mesmo com volumes absolutos de captação superficial bastante significativos. O resultado não surpreende, uma vez que a calha do rio Paraíba do Sul, ao receber aporte de inúmeros pequenos afluentes ao longo de seu curso, acaba por concentrar vazões e diluir riscos. Já as UPs com concentração de cursos d'água de menor vazão, se tornam mais propensas a sofrer com déficits hídricos.

No recorte setorial, indústria e mineração despontam como os mais vulneráveis em termos relativos (aprox. 16% a 17% do volume captado sob risco), ao passo que o consumo humano tem menor exposição percentual, apesar do maior volume absoluto outorgado. Esse quadro de base estabelece o patamar mínimo de atenção para a gestão dos riscos hidrológicos oriundos da captação superficial, pois concentra risco onde há simultaneamente demanda volumosa e disponibilidade mais limitada, ainda sem as perspectivas de majoração oriundas da mudança do clima. Em termos econômicos do risco de déficit hídrico de base se revela bastante expressivo, pois a produção econômica subjacente é de R\$ 8,67 a R\$ 9,79 bilhões (nas vazões respectivas da $Q_{95\%}$ e $Q_{7,10}$). Isso significa que cerca de 2,46% e 2,78% do valor agregado bruto produzido pelos 168 municípios cuja sede faz parte da bacia do rio Paraíba do Sul está sob alguma forma de risco hídrico. Em termos de impacto social, desvenda-se que o risco hídrico existente pode afetar cerca de 97,38 mil pessoas na $Q_{95\%}$ (2,09% dos expostos) e expressivos 151,46mil na $Q_{7,10}$ (3,24%), com maior concentração em UP dos Rios Pomba e Muriaé.

Ao incorporar a mudança do clima em sua dimensão crônica, simulada pelo cenário de emissões SSP4-4.5 que altera disponibilidades hídricas e também aumenta as demandas dos usuários do recurso natural, o sistema migra para um "novo normal" hídrico que é mais restritivo, majorando consequentemente o risco de base. Os incrementos físicos, embora percentualmente moderados na escala da bacia, reforçam os focos espaciais, com destaque para o Alto Paraíba do Sul (pela magnitude absoluta), Rios Pomba e Muriaé e Rio Dois Rios (pela combinação de volumes sob risco e aumentos relativos). Setorialmente, a agropecuária torna-se o segmento com maior acréscimo relativo de risco frente à situação de base, refletindo a sensibilidade do uso consuntivo (irrigação e dessedentação) às mudanças graduais de disponibilidade e à redução das "garantias" associadas às vazões de referência. Enquanto os setores de indústria e mineração apresentam os maiores riscos de base, o setor agropecuário se mostra como o mais sensível à mudança crônica do clima. Em paralelo, o risco econômico crônico cresce e permanece concentrado onde a base econômica dependente de água é elevada: o valor econômico sob risco totaliza R\$ 9,29 bilhões na vazão de referência $Q_{95\%}$ (incremento climático de R\$ 614 milhões) e R\$10,46 bilhões na $Q_{7,10}$ (incremento climático de R\$ 668 milhões), com maior contribuição absoluta da unidade de planejamento Alto Paraíba do Sul. No plano social, a população sob risco aumenta para 104,74 mil pessoas na $Q_{95\%}$ (ΔMC de 7,36 mil) e 164,09 na $Q_{7,10}$ (ΔMC de 12,63 mil).

Os riscos agudos, por sua vez, são associados a eventos episódicos como ondas de calor, e também foram simulados com base nos resultados do balanço hídrico sob aumento de demandas hídricas. Esse risco se sobrepõe ao da mudança crônica do clima, pois já ocorre sob as condições do "novo normal". No agregado, os acréscimos percentuais de volume sob risco são contidos, porém o setor usuário de consumo humano é o que passa a ser destacado, especialmente na unidade de planejamento dos Rios Pomba e Muriaé, que apresenta os maiores acréscimos absolutos. O impacto econômico do risco agudo adicional é de cerca de R\$ 300 milhões. Nessa perspectiva de ocorrência de uma onda de calor, o valor econômico sob risco total de todas as interferências atinge R\$ 9,61 bilhões na $Q_{95\%}$ (ΔMC de R\$ 318 milhões) e R\$ 10,77 bilhões na $Q_{7,10}$ (ΔMC de R\$ 309 milhões), com a unidade de planejamento dos Rios Pomba e Muriaé liderando o acréscimo absoluto. Do ponto de vista populacional, uma onda de calor eleva a população sob risco para 147,56 mil pessoas na $Q_{95\%}$ (ΔMC de 42,82 mil) e 201,45 na $Q_{7,10}$ (ΔMC de 37,36 mil).

Considerando os riscos de inundações, que é o aspecto agudo do excesso de água, o levantamento histórico de danos e prejuízos desse tipo de evento na bacia, entre 1995 e 2025, indica perdas mínimas acumuladas de R\$ 2,65 bilhões (a preços de 2024), concentradas em 40 municípios que respondem por 96,6% do valor. A partir da construção de curvas de

probabilidade de excedência de danos para 26 municípios com informações suficientes para o desenvolvimento da metodologia (cobrindo 114 eventos e 86% das perdas econômicas totais), estimou-se um risco anualizado de R\$ 18,09 milhões na situação de base, valor que, quando projetado sob mudança do clima (cenário de clima SSP2-4.5 para o ano de 2045) via deslocamento dos tempos de retorno, sobe para R\$ 26,05 milhões, um acréscimo de 44,1% que adiciona R\$ 7,97 milhões por ano às perdas esperadas. No horizonte típico de 20 anos de planejamento, isso equivale a R\$ 362 milhões em perdas esperadas hoje e R\$ 521 milhões sob clima futuro, um incremento agregado de aproximadamente R\$ 159 milhões. Os aumentos mais expressivos do risco de inundação são verificados nos municípios de Sapucaia, São José do Vale do Rio Preto, Barra Mansa, Nova Friburgo, Cambuci e Carmo, que têm o risco mais do que dobrado, ao passo que em alguns poucos municípios (Porciúncula, Natividade e Carangola) apresentam algum alívio relativo, refletindo a heterogeneidade das respostas hidrológicas e de exposição e vulnerabilidade locais ao clima.

11. REFERÊNCIAS

ADAPTA CLIMA (2025). Recursos hídricos no contexto da mudança do clima. Disponível em: <http://adaptaclima.mma.gov.br/recursos-hidricos-no-contexto-da-mudanca-do-clima#b>.

Acesso em: ago. 2025.

AESBE - Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento. 2025. Saneamento e Mudança Climática: Diretrizes das Companhias de Água e Esgoto para o enfrentamento dos de eventos anormais. AESBE, Brasília, DF.

ÁGUA E SOLO (2025). Etapa técnico-propositiva do enquadramento das águas superficiais da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. Modelagem de Qualidade da Água na Situação Atual (P03). Arquivo 23003_AGEVAP_MOD01_R00, de 06/05/2025.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Plano Nacional de Segurança Hídrica - PNSH. ANA, 2019, Brasília, DF.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Impacto das Mudanças Climáticas nos Recursos Hídricos do Brasil. ANA, Nota Técnica nº 4/2023/SHE, 2023, Brasília, DF.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos no Brasil. ANA, 2024, Brasília, DF.

ANA; Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE); Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM); Instituto Estadual do Ambiente do Rio de Janeiro (INEA). Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA nº 1.382, de 7 de dezembro de 2015. Estabelece diretrizes para a operação do Sistema Equivalente da Bacia do Rio Paraíba do Sul. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 238, p. 151–153, 15 dez. 2015. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/legislacao/resolucoes/resolucoes-regulatorias/2015/1382>.

Acesso em: 20 jun. 2025.

ASSAD, E. D. et al. 2019. Papel do Plano ABC e do Planaveg na adaptação da agricultura e da pecuária às mudanças climáticas. Working Paper. São Paulo, Brasil: WRI Brasil.

BANERJEE, O. et al. An ecosystem services approach to estimating economic losses associated with drought. Ecological Economics, 91, 2013. 19-27.

BBC, 2023. Highland private water supplies dry up in heatwave. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/uk-scotland-highlands-islands-65913891>

BBC, 2025. Water company sees demand surge by 30% in heatwave Disponível em: <https://www.bbc.com/news/articles/c5y757ry574o>.

BELLEZA, G. A. C. et al. Sectoral water use responses to droughts and heatwaves: analyses from local to global scales for 1990–2019. *Environmental Research Letters*, vol. 18, nº 104008, 2023

BENEDETTI, E. Água na Nutrição de Ruminantes. Faculdades Associadas de Uberaba - FAZU, Curso de Pós-graduação "lato sensu" em Nutrição e Alimentação de Ruminantes, Módulo IV, 2007, Uberaba, MG.

BEVI, 2024. Water Cooler Use Spikes During National Heat Wave. Disponível em: <https://bevi.co/blog/water-cooler-use-spikes-during-national-heat-wave/>

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). 2013. Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação à Mudança do Clima na Mineração - Plano MBC. MME, Brasília, DF.

BRASIL (2016). Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: volume 2: estratégias setoriais e temáticas. Ministério do Meio Ambiente. Brasil, 2016. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima/clima/arquivos/livro_pna_plano-nacional_v2_copy_copy.pdf

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). 2021. Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária 2020-2030: Plano Operacional / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação. Brasília, DF. Mapa/DEPROS, 2021.133p.

BRÊDA ET AL. 2023. Assessing climate change impact on flood discharge in South America and the influence of its main drivers. *Journal of Hydrology*.

CARDONA, O.D., M.K. van Aalst, J. Birkmann, M. Fordham, G. McGregor, R. Perez, R.S. Pulwarty, E.L.F. Schipper, and B.T. Sinh, 2012: Determinants of risk: exposure and vulnerability. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 65-108, 2012.

CBH PCJ (2015). Relatório de Situação dos Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí – 2015. Campinas: Agência das Bacias PCJ, 2015. Disponível em: <https://agencia.baciaspcj.org.br/docs/relatorios/relatorio-situacao-2015.pdf>. Acesso em: 14 maio 2025.

CEIVAP - Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. 2021 Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/instrumentos-de-gestao/plano-de-recursos-hidricos>. Acesso em novembro de 2024.

CEIVAP. Contratação de empresa especializada para realização do estudo das disponibilidades hídricas na bacia hidrográfica do Rio Paraíba Do Sul (EDH-PS). Produto 5 – Mudanças Climáticas. Relatório Técnico. Cód. do Documento: AGVP_PARAIBA_EHID_Produto5_MudancasClimaticas_R02. 2024.

CEIVAP - Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. (2025). Instrumentos de Gestão – Enquadramento. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/instrumentos-de-gestao/enquadramento>. Acesso em: 14 maio 2025.

CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B.; BLÖSCHL, G. Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. Nature Communications. 2022.

CNI - Confederação Nacional das Indústrias. 2020. Indústria Resiliente - um guia para a indústria se adaptar aos impactos da mudança do clima - diretrizes gerais. CNI, Brasília, DF.

CNI - Confederação Nacional da Indústria. 2020. Impacto Econômico dos Investimentos de Reúso de Efluentes Tratados de Esgoto para o Setor Industrial. Brasília-DF.

CRH (2020). Deliberação CRH nº 146 de 2012. Relatório de situação dos recursos hídricos da bacia hidrográfica. Roteiro para elaboração e fichas técnicas dos parâmetros. Disponível em: https://agencia.baciaspcj.org.br/wp-content/uploads/Roteiro_RS_ab2019.pdf. Acesso em: 14 maio 2025

DE NYS, E.; ENGLE, N. L.; MAGALHÃES, A. R. Secas no Brasil: política e gestão proativas. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE; Banco Mundial. Brasília, DF, p. 292. 2016.

DING, Y.; HAYES, M. J.; WIDHALM, M. Measuring Economic Impacts of Drought: A Review and Discussion. Papers in Natural Resources, Lincoln, 1 jan. 2010. Paper 196.

DOL, G.; HUVERMANN, R. Plant - pollinator interactions in high temperatures. Koppert, Whitepaper, 2020.

Douville, H., K. Raghavan, J. Renwick, R.P. Allan, P.A. Arias, M. Barlow, R. Cerezo-Mota, A. Cherchi, T.Y. Gan, J. Gergis, D. Jiang, A. Khan, W. Pokam Mba, D. Rosenfeld, J. Tierney, and O. Zolina, 2021: Water Cycle Changes. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1055–1210, doi:10.1017/9781009157896.010.

EEA - European Environmental Agency. 2018. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES).

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. 2022. Plano Decenal de Energia PDE 2031. Rio de Janeiro, RJ.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. 2025. Plano Decenal de Energia PDE 2034. Rio de Janeiro, RJ.

FIESP; CNI. 2025. Economia circular na indústria: melhores práticas. FIESP; CNI São Paulo; Brasília, DF.

GAEA Estudos Ambientais Ltda. & Instituto Internacional para Sustentabilidade (2017). *Relatório 2: Cenários de uso e ocupação do solo da Bacia do Rio Paraíba do Sul – Porção Paulista/SP*. Projeto Estudo de economia dos ecossistemas e da biodiversidade (TEEB) – Bacia do rio Paraíba do Sul – Porção paulista/São Paulo.

GIZ - Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit. 2023. Guia Metodológico para Estabelecimento de Modelo de Negócios para Parques Lineares e Fluviais e para Quantificação dos Benefícios Ambientais, Econômicos e Sociais de SbN Existentes nessas Áreas. THÁ, D. (coord.). Guajava - Aquaflora - Kralingen, para The City Climate Finance Gap Fund / Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

GVces. Análise Custo-Benefício de Medidas de Adaptação à Mudança do Clima na Bacia Hidrográfica dos Rios Piancó-Piranhas-Açu: Resumo do Projeto. Centro de Estudos em Sustentabilidade da Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas. São Paulo, 2018.

HAN, S. et al. Response and tolerance mechanism of food crops under high temperature stress: a review. *Brazilian Journal of Biology*, vol. 82, nº e253898, 2022.

IBGE & ANA. 2023. Contas econômicas ambientais da água: Brasil: 2018-2020. Rio de Janeiro: IBGE.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. 2021. Guia sobre adaptação às mudanças climáticas para o setor de mineração. IBRAM, Brasília, DF.

INMET. Normais climatológicas. Disponível em: - <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: ago. 2025.

INSTITUTO TRATA BRASIL. Demanda Futura por Água Tratada nas Cidades Brasileiras - 2019 a 2040. Instituto Trata Brasil, Estudo de Demanda Hídrica, 2022, Brasil.

IPCC WGI Interactive Atlas. 2025. Disponível em: <https://interactive-atlas.ipcc.ch>

KAUSHAL, N. et al. Food crops face rising temperatures: An overview of responses, adaptive mechanisms, and approaches to improve heat tolerance. *Cogent Food & Agriculture*, vol. 2, nº 1134380, 2016.

KHAN, A. S. et al. Efeito da seca sobre a produção, a renda e o emprego agrícola na microregião geográfica de Brejo Santo e no Estado do Ceará. *Revista Econômica do Nordeste*, Fortaleza, 36, n. 2, 2005. 242-262.

KUMAR, N. et al. Impact of terminal heat stress on pollen viability and yield attributes of rice (*Oryza sativa* L.). *Cereal Research Communications*, vol. 43, nº 4, 2015, pp. 616

LAÎNÉ, A., NAKAMURA, H., NISHII, K. A diagnostic study of future evaporation changes projected in CMIP5 climate models. *Clim Dyn* **42**, 2745–2761 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2087-7>

LIMA, E. P. C. Água e Indústria: Experiências e Desafios. MDIC, 2018, Brasília, DF.

LIU, X., LI, C., ZHAO, T., & HAN, L. (2020). Future changes of global potential evapotranspiration simulated from CMIP5 to CMIP6 models. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 13(6), 568–575. <https://doi.org/10.1080/16742834.2020.1824983>

LOGAR, I.; BERGH, J. C. J. M. V. D. Methods for Assessment of the Costs of Droughts. Integrated Project CONHAZ. Barcelona, p. 58. 2011.

MARCO, E. Water consumption in pigs and variables based on room temperature. *Pig Health*, 2023.

MARTIN-ORTEGA, J.; MARKANDYA, A. The costs of drought: the exceptional 2007-2008 case of Barcelona. Basque Centre for Climate Change (BC3). Bilbao, Spain, p. 35. 2009.

MEKONNEN, G. T. et al. Surface Urban Heat Island Intensity and Urban Utility Consumption: Impact Analysis and Projections. *The Scientific World Journal*, vol. 2025, nº 3250112, 2025, 15 páginas.

MINHO, A. P.; GASPAR, E. B. 2023. Requerimento animal e gerenciamento das fontes. Capítulo 5 in: Manejo da água na pecuária: Aplicação de conceitos, princípios e práticas para

racionalizar seu uso (Ed.: SILVEIRA, M.C.T. da; TRENTIN, G.), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Pecuária Sul - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

NATURAL CAPITAL ECONOMICS. Heatwaves in Victoria: a vulnerability assessment. Department of Environment, Land, Water and Planning, 2018, Victoria, Austrália.

NS News, 2021. Heat wave pushes Metro Vancouver to 'unprecedented' early season water use. Disponível em: <https://www.nsnews.com/local-news/heat-wave-pushes-metro-vancouver-to-unprecedented-early-season-water-use-3921388>

PACTO GLOBAL. 2024. Trilha para Gestão de Riscos Hídricos Empresariais. Instituto Rede Brasil do Pacto Global, Plataforma de Ação pela Água e Oceano, Movimento +Água em parceria com Qualy Metrics. São Paulo, SP.

PAIVA, A. C. (2020). *Segurança Hídrica da bacia do rio Paraíba do Sul* [Tese de Doutorado, INPE].

POTOPOVÁ, V. et al. Water Consumption by Livestock Systems from 2002–2020 and Predictions for 2030–2050 under Climate Changes in the Czech Republic. *Agriculture*, vol. 13, nº 1291, 2023.

PROJETO MAPBIOMAS – Coleção 9 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, acessado em julho de 2025 através do link: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>

OLSEN, A. et.al; 2015. Comparing Methods of Calculating Expected Annual Damage in Urban Pluvial Flood Risk Assessments. *Water* 2015, 7, 255-270; doi:10.3390/w7010255

QUAY, R. Anticipatory Governance: A Tool for Climate Change Adaptation. *Journal of the American Planning Association*, 76(4):496-511, 2015.

RASBY, R.; WALZ, T. Water Requirements for Beef Cattle. Nebraska Extension, University of Nebraska-Lincoln, nº G2060, 2011, Nebraska, EUA.

SAMAR, 2023. Onda de calor provoca consumo recorde de água em Araçatuba. Disponível em: <https://www.samar.eco.br/noticias/onda-de-calor-provoca-consumo-recorde-de-agua-em-aracatuba/>

SANEPAR/PARANÁ, 2020. Calor faz produção de água bater recorde em todo o Estado. Disponível em: <https://www.parana.pr.gov.br/aen/Noticia/Calor-faz-producao-de-agua-bater-recorde-em-todo-o-Estado>

SANEPAR/PARANÁ, 2024. Com altas temperaturas, consumo de água no Litoral foi 40% maior neste Carnaval. Disponível em: <https://www.parana.pr.gov.br/aen/Noticia/Com-altas-temperaturas-consumo-de-agua-no-Litoral-foi-40-maior-neste-Carnaval>

SHEPHARD, R. W.; MALONEY, S. K. A review of thermal stress in cattle. *Australian Veterinary Journal*, vol. 101, nº 11, 2023, pp. 417-429.

TABLER, T.; WELLS, J.; ZHAI, W. Water-Related Factors in Broiler Production. Mississippi State University Extension Service, nº 2742, 2018, Mississippi State, MS.

THORNTON, P. et al. Increases in extreme heat stress in domesticated livestock species during the twenty-first century. *Global Change Biology*, vol. 27, nº 22, 2021, pp. 5762-5772.

TNC. O Reservatório Invisível: Estudo biofísico e econômico sobre investimentos em Soluções Baseadas na Natureza para segurança hídrica e adaptação climática no Sistema Cantareira. 2024. São Paulo, Brasil.

UN - United Nations; EC - European Commission; IMF - International Monetary Fund; OECD - Organization for Economic Co-operation and Development; World Bank. 2009. *System of National Accounts*. 2008, New York.

UN - United Nations. 2012. *System of Environmental-Economic Accounting for Water (SEEA-W)*, ST/ESA/STAT/SER.F/100, Department of Economic and Social Affairs, Statistics Division, UN, New York.

UN - United Nations; EC - European Commission; FAO - Food and Agriculture Organization; IMF - International Monetary Fund; OECD - Organization for economic Co-operation and Development; World Bank. 2014. *System of Environmental-Economic Accounting 2012: Central Framework*, New York.

UN - United Nations. 1992. *Agenda 21*. UN, New York.

UN - United Nations. *Climate Change and Water*. UN-Water, Policy Brief, 2019.

Van VLIET, M.T.H., THORSLUND, J.; STROKAL, M. Global river water quality under climate change and hydroclimatic extremes. *Nat Rev Earth Environ* 4, 687–702 (2023). <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00472-3>

VECELLIO, D. J. et al. Evaluating the 35°C wet-bulb temperature adaptability threshold for young, healthy subjects (PSU HEAT). *Journal of Applied Physiology*, vol. 132, nº 2, 2022, pp. 340-345.

WANG, W., LEE, X., XIAO, W., LIU, S., SCHULTZ, N., WANG, Y., ZHANG, M., ZHAO, L., 2018. Global lake evaporation accelerated by changes in surface energy allocation in a warmer climate. *Nat. Geosci.* 11, 410–414. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0114-8>.

WILHITE, D. A.; SVOBODA, M. D.; HAYES, M. J. Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water Resources Management*, 21, 2007. 763–774.

WING, O.E.J., LEHMAN, W., BATES, P.D. et al. Inequitable patterns of US flood risk in the Anthropocene. *Nat. Clim. Chang.* 12, 156–162 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01265-6>

WMO - World Meteorological Organization. 2024. WMO Greenhouse Gas Bulletin: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2023. Geneva, Switzerland.

WOOLWAY, R.I., KRAEMER, B.M., LENTERS, J.D. Global lake responses to climate change. *Nat Rev Earth Environ* 1, 388–403 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0067-5>

YAMADA, Y. et al. Variation in human water turnover associated with environmental and lifestyle factors. *Science*, vol. 378, nº 6622, 2022, pp. 909-915.

ZAPATA, O. More Water Please, It's Getting Hot! The Effect of Climate on Residential Water Demand. *Water Economics and Policy*, artigo científico vol. 1, nº 3, 2015.

APÊNDICE A. DEMANDAS HÍDRICAS – CENÁRIOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA

Quadro 11-1 – Listagem dos mapas com resultados de demanda hídrica total em cenários de mudança climática

Código do arquivo	Descrição
P6_DEMANDA_SUPERFICIAL_MUDANCA_CLIMATICA	Demanda hídrica superficial no cenário de maior pressão (2045) considerando alterações por mudança climática
P6_DEMANDA_SUBTERRÂNEA_MUDANCA_CLIMATICA	Demanda hídrica subterrânea no cenário de maior pressão (2045) considerando alterações por mudança climática
P6_DEMANDA_SUPERFICIAL_MUDANCA_CLIMATICA_ONDA_CALOR	Demanda hídrica superficial no cenário de maior pressão (2045) considerando alterações por mudança climática e onda de calor
P6_DEMANDA_SUBTERRÂNEA_MUDANCA_CLIMATICA_ONDA_CALOR	Demanda hídrica subterrânea no cenário de maior pressão (2045) considerando alterações por mudança climática e onda de calor

Fonte: elaborado pelo Consórcio

APÊNDICE B. BALANÇO HÍDRICO SUPERFICIAL – CENA FUTURA DE MAIOR PRESSÃO (2045) EM CENÁRIOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA

Quadro 11-2 – Listagem dos mapas com resultados do balanço hídrico superficial em cenários de mudança climática

Código do arquivo	Descrição
P6_BHPS_BALANCO_Q95_MUDANCAS_CLIMATICAS	Balanço hídrico por ottotrecho para vazão de referência Q95 considerando a disponibilidade hídrica do período histórico (1977 a 2021) alterada por mudanças climáticas, em variação anual. As demandas hídricas consideradas são do cenário de maior pressão (2045) acrescidas de aumento causado por mudança climática
P6_BHPS_BALANCO_Q90_MUDANCAS_CLIMATICAS	Balanço hídrico por ottotrecho para vazão de referência Q90 considerando a disponibilidade hídrica do período histórico (1977 a 2021) alterada por mudanças climáticas, em variação anual. As demandas hídricas consideradas são do cenário de maior pressão (2045) acrescidas de aumento causado por mudança climática
P6_BHPS_BALANCO_Q7,10_MUDANCAS_CLIMATICAS	Balanço hídrico por ottotrecho para vazão de referência Q7,10 considerando a disponibilidade hídrica do período histórico (1977 a 2021) alterada por mudanças climáticas, em variação anual. As demandas hídricas consideradas são do cenário de maior pressão (2045) acrescidas de aumento causado por mudança climática
P6_BHPS_BALANCO_Q95_ONDA_CALOR	Balanço hídrico por ottotrecho para vazão de referência Q95 considerando a disponibilidade hídrica do período histórico (1977 a 2021) alterada por mudanças climáticas, em variação anual. As demandas hídricas consideradas são do cenário de maior pressão (2045) acrescidas de aumento causado por mudança climática e onda de calor
P6_BHPS_BALANCO_Q90_ONDA_CALOR	Balanço hídrico por ottotrecho para vazão de referência Q90 considerando a disponibilidade hídrica do período histórico (1977 a 2021) alterada por mudanças climáticas, em variação anual. As demandas hídricas consideradas são do cenário de maior pressão (2045) acrescidas de aumento causado por mudança climática e onda de calor
P6_BHPS_BALANCO_Q7,10_ONDA_CALOR	Balanço hídrico por ottotrecho para vazão de referência Q7,10 considerando a disponibilidade hídrica do período histórico (1977 a 2021) alterada por mudanças climáticas, em variação anual. As demandas hídricas consideradas são do cenário de maior pressão (2045) acrescidas de aumento causado por mudança climática e onda de calor

Fonte: elaborado pelo Consórcio

APÊNDICE C. INVENTÁRIO DE EVENTOS HIDROLÓGICOS DE SECAS / ESTIAGENS

Quadro 11.3 – Eventos de secas e estiagens inventariados no PGR: consistência com dados recentes do S2ID e do Atlas de Desastres na porção mineira da bacia

Município	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	S/D	Total
Antônio Prado de Minas						1																			1
Coronel Pacheco																							1		1
Dona Eusébia													1												1
Goianá						1																			1
Guidoval														2										1	3
Juiz de Fora																				1					1
Lima Duarte														2											2
Paiva																			1						1
Recreio													5												5
Rodeiro	1													1											2
Ubá														1											1
Visconde do Rio Branco														2											2
Total	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	6	8	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	21

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 11.4 – Eventos de secas e estiagens inventariados no PGR: consistência com dados recentes do S2ID e do Atlas de Desastres na porção fluminense da bacia.

Município	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	S/D	Total
Aperibé														1			1								1	3
Cambuci														1			1								1	3
Campos dos Goytacazes										1							1									2
Cantagalo																									1	1
Cardoso Moreira	1													1								1			1	4
Cordeiro																									1	1
Italva										1				1			1		1						2	6
Itaocara																	1							1	1	3
Itaperuna							1			1				1			1								1	5
Laje do Muriaé														1			1								1	3
Miracema										1				2			2		1	1					2	9
Natividade							1			2				1			1							1	1	7
Porciúncula														1	1	1	1									4
Quissamã	1													1												2
Rio Claro															2											2
Santa Maria Madalena																	1								1	2
Santo Antônio de Pádua														1			1								1	3
São Fidélis														1			2								1	4
São Francisco de Itabapoana	1									1				1	1		1							1	1	7

Município	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	S/D	Total
São João da Barra														2			1								1	4
São José de Ubá														1			1								1	3
São José do Vale do Rio Preto																	1								1	2
São Sebastião do Alto																	1									1
Varre-Sai														2			1								1	4
Total	3	0	0	0	0	0	2	0	0	7	0	0	0	19	4	1	21	0	2	1	0	1	0	3	21	85

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Quadro 11.5 – Eventos de secas e estiagens inventariados no PGR na porção paulista da bacia.

Município	2014	2015	Total
Natividade da Serra		1	1
Paraibuna	1	1	2
Redenção da Serra		2	2
Santa Isabel	1		1
Total	2	4	6

Fonte: elaborado pelo Consórcio

APÊNDICE D. INVENTÁRIO DE EVENTOS HIDROLÓGICOS DE CHEIAS / INUNDAÇÕES

Quadro 11.6 – Eventos de inundação inventariados no PGR: consistência com dados recentes do S2ID e do Atlas de Desastres na porção mineira da bacia.

Município	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	s/d	Total
Além Paraíba														13										13
Antônio Carlos																								0
Antônio Prado de Minas																								0
Aracitaba																								0
Argirita					2																			2
Astolfo Dutra										1								1						2
Barão de Monte Alto																								0
Barbacena																	3							3
Belmiro Braga						3			1															4
Bias Fortes																								0
Bicas		1	1																					2
Bocaina de Minas																								0
Bom Jardim de Minas																								0
Carangola						1	2	1	1	2								1	1					8
Cataguases		1				2				2					3	5		2		1				16
Chácara																			1					1
Chiador																								0
Coronel Pacheco		1		1																				2
Descoberto																								0
Desterro de Melo																								0
Divinésia																		2						2
Divino																								0

Município	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	s/d	Total
Dona Eusébia	1		2			2				3						2		4			1		1	15
Ervália					1											2		3						6
Estrela Dalva						1																		1
Eugenópolis				2		1				1						3				1			1	9
Ewbank da Câmara					2													1						3
Faria Lemos							2												1					3
Fervedouro					1		1												1					3
Goianá		1			1																			2
Guarani			2			1				1														4
Guarará				1	1																			2
Guidoval		1			2	2					1					5		1					1	12
Guiricema		1						1										2						4
Itamarati de Minas																								0
Juiz de Fora		1		1	1									17				2	1					23
Laranjal		1																						1
Leopoldina	1																							1
Lima Duarte					2		1						3											6
Mar de Espanha	1																							1
Maripá de Minas					2							1	1											4
Matias Barbosa																								0
Mercês														2									1	2
Miradouro	1		1	1	1	2			1															7
Miraí									1	3						4		1					1	9
Muriaé									3		6			1				4						14
Olaria																								0
Oliveira Fortes																								0

Município	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	s/d	Total
Orizânia																								0
Paiva		1																						1
Palma													17											17
Passa-Vinte	1								1															2
Patrocínio do Muriaé	1								1	1								1	1	1				6
Pedra Dourada												1										1		2
Pedro Teixeira																								0
Pequeri																								0
Piau														3										3
Pirapetinga										2										1				3
Piraúba		1			1																			2
Recreio		1			1																			2
Rio Novo		1			3																			4
Rio Pomba																								0
Rio Preto								1								3							2	4
Rochedo de Minas																								0
Rodeiro										1														1
Rosário da Limeira							2			1														3
Santa Bárbara do Monte Verde		2			2																			4
Santa Bárbara do Tugúrio														3									1	3
Santa Rita de Ibitipoca																								0
Santa Rita de Jacutinga	1								1															2
Santana de Cataguases																								0
Santana do Deserto																								0

Município	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	s/d	Total
Santo Antônio do Aventureiro																								0
Santos Dumont										1				22			3							26
São Francisco do Glória							2			1														3
São Geraldo					2		2		2	2														8
São João Nepomuceno					3									1										4
São Sebastião da Vargem Alegre										2	3													5
Senador Cortes									1	1														2
Silveirânia																								0
Simão Pereira							1				4													5
Tabuleiro						1	3							7										11
Tocantins														19										19
Tombos	1					2													1					4
Ubá			2											1		3		2						8
Vieiras				2			3																	5
Visconde do Rio Branco																1								1
Volta Grande			1						1															2
Total	8	14	9	8	28	18	19	3	14	25	14	2	21	89	3	28	6	27	7	4	1	1	8	349

Quadro 11.7 – Eventos de inundação inventariados no PGR: consistência com dados recentes do S2ID e do Atlas de Desastres na porção fluminense da bacia.

Município	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	S/D	Total	
Aperibé					2	2			1	1		1		3								2		2					14
Areal																		4		1									5

Município	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	S/D	Total
Barra do Pirai															1								1	3	1			6
Barra Mansa		1				1		1			1	1										1					1	7
Bom Jardim	1								1																			2
Cambuci						1			1	1	1			1								1		1				7
Campos dos Goytacazes						2	1			2	2		2	1							1	1		1				13
Cantagalo														1														1
Carapebus																												0
Cardoso Moreira						1	1		1	1	2			1										1				8
Carmo													1											1				2
Comendador Levy Gasparian						1																						1
Conceição de Macabu																										1		1
Cordeiro													1															1
Duas Barras																												0
Engenheiro Paulo de Frontin																												0
Italva						1	1		1	1				1										1				6
Itaocara														1								1						2
Itaperuna						1	1		2	1			1	1														7
Itatiaia																												0
Laje do Muriaé									1	1	2			1														5
Macuco						1	1		1	1			1															5
Mendes													2		1													3
Miguel Pereira																												0
Miracema						1																		1				2

Município	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	S/D	Total
Natividade					1	1				1				1														4
Nova Friburgo									1									2		1		3						7
Paraíba do Sul	1										2	2																5
Paty do Alferes											1			1														2
Petrópolis			1			2					1	1		1				5	10	12	9	12						54
Pinheiral												1																1
Piraí																												0
Porciúncula							1		1	1	1		1	1														6
Porto Real	1																											1
Quatis															8													8
Quissamã							1																					1
Resende		1													2													3
Rio Claro																												0
Rio das Flores																												0
Santa Maria Madalena														1														1
Santo Antônio de Pádua						1				1		1		1			4					1		1				10
São Fidélis						1							1	1											1			4
São Francisco de Itabapoana					1		1		1		1			1							1	2						8
São João da Barra									1					1														2
São José de Ubá														1														1
São José do Vale do Rio Preto									1									3										4
São Sebastião do Alto														1														1

Município	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	S/D	Total
Sapuçaia										1								5										6
Sumidouro																				1								1
Teresópolis			1									4						3					1					9
Trajano de Moraes																				1								1
Três Rios		1																		1								2
Valença																		1			1	1						3
Varre-Sai						1								1														2
Vassouras																									1	2		3
Volta Redonda																						1					1	2
Total	3	3	2	0	4	18	8	1	14	13	14	11	10	23	12	0	4	23	10	17	12	26	2	12	3	3	2	250

Quadro 11.8 – Eventos de inundações inventariados no PGR na porção paulista da bacia.

Município	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Total
Aparecida																	1	1	2										4
Arapeí												1																	1
Areias																													0
Arujá													1				2	14	4				5			6			32
Bananal																													0
Caçapava																		1										1	2
Cachoeira Paulista			1																	1	1								3
Canas																				1									1
Cruzeiro													1							1									2
Cunha																		1		1			1		2		1		6
Guararema									1			1					8	10	2							18			40

Município	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Total
Guaratinguetá																				1									1
Guarulhos							9	1	12		2	5	4	5	46	70	181	100	203	83	69	186	31	29	7	3	2	5	1053
Igaratá																													0
Itaquaquecetuba			17	3	2		13		2		1	2					7	21	21		9	15	12	104	16	36	1	4	286
Jacareí																			1										1
Jambeiro																													0
Lagoinha																				1									1
Lavrinas																													0
Lorena																													0
Mogi das Cruzes	21	41	117	83	71	39	58	61	62	6	26	33	30	23	13	30	40	157	38	31	1	1	1	2		12	1		998
Monteiro Lobato																													0
Natividade da Serra																		1											1
Paraibuna																													0
Pindamonhangaba																													0
Piquete																				1									1
Potim																													0
Queluz																			1										1
Redenção da Serra																													0
Roseira																													0
Santa Branca																													0
Santa Isabel																		1						12		4			17
São José do Barreiro																													0
São José dos Campos																				8							3	2	13
São Luiz do Paraitinga				1														1	1										3
Silveiras																													0

Município	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Total
Taubaté																				2									2
Tremembé																													0
Total	21	41	135	87	73	39	80	62	77	8	29	43	36	28	59	100	239	312	273	119	92	202	49	148	23	90	7	13	2485

