

**Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da  
Área Ambiental I – Porção Capixaba do Rio Doce e Região  
Marinha e Costeira Adjacente**

**Material Suplementar Ambiente Dulcícola**

**Tema: Integração Fluvio-Estuarina - Reflexos de Ações na Bacia do  
Doce nos Sistemas Aquáticos Continental e Marinho**

**RT- 46/ JUN 24**

**RA2023 PMBA/Fest**

Vitória,

Junho de 2024

## **EQUIPE TÉCNICA**

Antônio Sergio Ferreira Mendonca

Bianca Silva Queiroz

Daniel Rigo

Diogo Costa Buarque

Izabela Tavares Spagnol

Julia Bonfante

Juliane Azeredo Ferreira

Kelvin Azine Correa

Livia Luchi Rabello

Liviane Sousa Correa

Lorena Frasson Loureiro

Marco Aurelio Costa Caiado

Monica de Souza Mendes

Murilo Brazzali Rodrigues

Sebastiao Francisco Teixeira

Selena Lopes Carvalho

Thayná Prata Oliveira

Yasmin da Silva Alves



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>6</b>
2.1	COLETA .....	6
2.1.1	Caracterização hidrológica global para compreensão do aporte de água doce e do transporte de sedimentos no ambiente estuarino-marinho do Rio Doce .....	6
2.1.2	Caracterização e análise de interrelações envolvendo ações na bacia hidrográfica e aspectos de quantidade/qualidade da água e biodiversidade aquática.....	31
2.1.3	Hidrologia e transporte de sedimentos .....	31
2.2	ANÁLISE.....	32
2.2.1	Caracterização hidrológica global para compreensão do aporte de água doce e do transporte de sedimentos no ambiente estuarino-marinho do Rio Doce .....	32
2.2.2	Caracterização e análise de interrelações envolvendo ações na bacia hidrográfica e aspectos de quantidade/qualidade da água e biodiversidade aquática.....	70
2.2.3	Hidrologia e transporte de sedimentos .....	74
2.3	HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS.....	76
<b>3</b>	<b>RESULTADOS DOS INDICADORES .....</b>	<b>77</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA GLOBAL PARA COMPREENSÃO DO APORTE DE ÁGUA DOCE E DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO AMBIENTE ESTUARINO-MARINHO DO RIO DOCE.....	78
3.1.1	Produção De Água Na Bacia Do Rio Doce .....	78
3.1.2	Geração e Transporte de Sedimentos .....	95
3.2	CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DE INTERRELAÇÕES ENVOLVENDO AÇÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA E ASPECTOS DE QUANTIDADE/QUALIDADE DA ÁGUA E BIODIVERSIDADE AQUÁTICA.....	121
3.2.1	Quantidade De Material Dragado Na UHE Risoleta Neves .....	121
3.2.2	Repasse Para Ações De Esgotamento Sanitário .....	123
3.2.3	Nascentes Recuperadas .....	126
3.2.4	Áreas reflorestadas .....	128
3.2.5	Áreas De Preservação Permanente Recuperadas .....	130

<b>3.2.6</b>	<b>Índices de Estimativas de Esgotamento Sanitário.....</b>	<b>139</b>
<b>3.2.7</b>	<b>Levantamento e análise de informações relativas a monitoramentos de qualidade de água .....</b>	<b>156</b>
<b>3.3</b>	<b>HIDROLOGIA E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....</b>	<b>173</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Vazão.....</b>	<b>173</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Descarga sólidas de sedimentos .....</b>	<b>175</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Resultados De Fluxos De Metais .....</b>	<b>177</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Resultados De Fluxos De Nutrientes .....</b>	<b>179</b>
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS 5 ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO .....</b>	<b>181</b>
<b>5</b>	<b>ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS .....</b>	<b>185</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>185</b>

## 1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL

A malha e frequência amostral do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I (PMBA/Fest) passou por modificações ao longo do tempo, visando seu aperfeiçoamento para atendimento aos objetivos do PMBA/Fest. Estas alterações foram aprovadas pela Câmara Técnica da Biodiversidade (CTBio) por meio de: (1) ofício SEI nº 1/2020-CTBio/DIBIO/ICMBio, de outubro de 2019 (para o período de transição) e (2) Proposta Técnica de continuidade do monitoramento, apresentadas e aprovadas em 2022, visando o “Novo Ciclo do PMBA/Fest”.

As modificações implementadas se encontram nos seguintes Materiais Suplementares: 1) MS – Malha e Frequência amostral, onde as diferentes malhas e frequências amostrais são apresentadas nas abas “Ano 1”, “Transição”, “Novo Ciclo” e “Histórico Frequências” e 2) MS – Mapas das malhas amostrais, com a espacialização histórica referente às malhas amostrais dos Ambientes. Como forma de esclarecer os períodos contemplados em cada uma delas, “Ano 1” se refere às estações amostrais monitoradas entre setembro de 2018 e setembro de 2019, “Transição” às estações entre outubro de 2019 e julho de 2022 e “Novo Ciclo” referente às estações amostrais monitoradas a partir de agosto de 2022, à exceção do grupo da Ecotoxicologia, que iniciou a amostragem referente ao Novo Ciclo em janeiro de 2023.

## 2 METODOLOGIA

A metodologia apresentada contempla o escopo em vigência no momento de entrega deste relatório, ou seja, as amostragens e análises previstas para o Novo Ciclo do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática – PMBA submetidas à Fundação Renova através do FORMULÁRIO DE APRESENTAÇÃO DE PLANO DE TRABALHO em agosto de 2022 (e dezembro de 2022 para o Tema Ecotoxicologia). Após a descrição da metodologia implementada, será apresentado um breve descritivo sobre as modificações metodológicas (parâmetros, análise de parâmetros ou grupo de parâmetros, dentre outros) que ocorreram ao longo da evolução do PMBA/Fest a fim de determinar os indicadores.

### 2.1 COLETA

#### 2.1.1 Caracterização hidrológica global para compreensão do aporte de água doce e do transporte de sedimentos no ambiente estuarino-marinho do Rio Doce

As estações pluviométricas existentes no interior e áreas lindeiras da bacia do Rio Doce foram identificadas por meio de consultas aos bancos de dados da Agência Nacional de Águas – ANA, Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM, Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural – Incaper, Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN e Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Cabe ressaltar que são necessárias algumas estações em áreas lindeiras, posicionadas fora do limite da bacia, para que a interpolação dos dados de chuva fique mais consistente.

Os mapas relacionados ao presente tema foram produzidos à montante de Linhares, visto que não há estações fluviométricas de longa série histórica a jusante de Linhares. Além disso, o estudo traz informações relacionadas à parte continental da Bacia do Rio Doce, sendo esta parte a jusante de Linhares um incremento muito pequeno. Acrescenta-se que, para uma modelagem mais real, evita-se a influência das condições de contorno, o que já exclui uma região de cerca de 10 km da foz da Bacia.

As estações existentes tiveram suas posições geográficas determinadas em shapefile e seus dados foram analisados em termos de consistência, disponibilidade e modo de obtenção, tendo elas sido divididas em dois grupos: (1) estações que possuem longa série histórica e, (2) estações que apresentam dados diários recentes.

No grupo das estações de longa série histórica, estão as que apresentam séries descontinuidades e as que tiveram coleta de dados interrompidas.

Assim, para a caracterização hidrológica foram escolhidas aquelas estações com pelo menos 30 anos de dados contínuos entre 1985 e 2014, todas operadas pela Agência Nacional de Água e Saneamento Básico (ANA) e pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (ANA/CPRM). Este grupo é composto por 90 estações e o período corresponde aquele em que os dados disponibilizados pela ANA se encontram consistidos. As estações selecionadas para caracterização hidrológica e que apresentam

dados pluviométricos de longo prazo tiveram seus dados compilados em planilha eletrônica, sendo os totais pluviométricos mensais calculados.

Por sua vez, para a modelagem hidrossedimentológica foram escolhidas as estações que apresentavam ao menos 80% dos meses sem falhas no período entre 1970 e 2014. A aplicação desse critério sobre as estações de longa série histórica resultou na seleção de 101 estações pluviométricas com dados diários para consideração na simulação de sedimentos, todas também operadas pela ANA/CPRM.

A Tabela 1 apresenta dados das estações que apresentam longa série histórica, enquanto a Figura 1 apresenta a espacialização das mesmas sobre a bacia do Rio Doce e áreas adjacentes. Importante destacar que foram selecionadas estações de chuva fora da bacia devido à necessidade de se representar a distribuição espacial das mesmas e capturar o gradiente de precipitação nos contornos da bacia.

Tabela 1: Estações pluviométricas apresentando longas séries históricas na bacia do Rio Doce.

Resp./Operadora	Código	Aplicação*	Estação	Latitude	Longitude
ANA/CPRM	2042010	H, S	Abre Campo	-20,69056	-43,29944
ANA/CPRM	2043009	H, S	Acaiaca Jusante	-20,67028	-43,08806
ANA/CPRM	2041023	H, S	Afonso Cláudio montante	-20,36250	-43,14389
ANA/CPRM	1742019	H	Água Boa	-20,39000	-43,18028
ANA/CPRM	1840000	H, S	Águia Branca	-17,84556	-42,07556
ANA/CPRM	1941012	H, S	Alto Rio Novo	-17,99222	-42,39389
ANA/CPRM	1941006	H, S	Assaraí montante	-18,57472	-41,91778
ANA/CPRM	1941003	H, S	Baixo Guandu	-18,23861	-41,74861
ANA/CPRM	1940016	H, S	Barra de São Gabriel	-18,88306	-41,95028
ANA/CPRM	1941005	H, S	Barra do Cuieté jusante	-18,77694	-41,48278
ANA/CPRM	1839006	H	Barra Nova	-18,55278	-42,76417
ANA/CPRM	1942030	H	Belo Oriente	-19,31639	-42,39611
ANA/CPRM	2042014	H, S	Bicuiba	-18,59278	-43,41250
ANA/CPRM	1942002	H, S	Bom Jesus do Galho	-18,61194	-42,27861
ANA/CPRM	2043026	H, S	Braz Pires	-18,97639	-41,64028
ANA/CPRM	1942031	H	Cachoeira dos Óculos Montante	-19,76944	-42,47694
ANA/CPRM	1943010	H, S	Caeté	-18,36306	-42,60222
ANA/CPRM	1940020	H, S	Caldeirão	-18,27972	-43,00056
ANA/CPRM	1841003	H, S	Campanário	-18,77222	-42,93111
ANA/CPRM	1742014	H, S	Capelinha	-18,20111	-42,45528
ANA/CPRM	1940005	H, S	Cavalinho	-19,79889	-41,70611
ANA/CPRM	1840010	H, S	Cedrolândia	-19,06167	-41,53278
ANA/CPRM	1841018	H, S	Central de Minas	-19,67833	-41,83611
ANA/CPRM	1940006	H, S	Colatina - Corpo de Bombeiros	-19,16167	-41,86222
ANA/CPRM	2043059	H	Colégio Caraça	-19,01667	-43,44417
ANA/CPRM	1943002	H, S	Conc. do Mato Dentro	-19,44028	-43,11861
ANA/CPRM	1842005	H, S	Coroaci	-19,59472	-41,45806

Resp./Operadora	Código	Aplicação*	Estação	Latitude	Longitude
ANA/CPRM	2143003	H, S	Desterro do Melo	-19,21750	-43,37417
ANA/CPRM	1841019	H	Divino de Laranjeiras	-19,99889	-42,34750
ANA/CPRM	1942008	H, S	Dom Cavati	-19,25028	-43,01444
ANA/CPRM	2041008	H, S	Dores do Manhumirim	-19,34306	-41,24611
ANA/CPRM	2043056	H	Fazenda Água Limpa Jusante	-19,92278	-43,17778
ANA/CPRM	2042031	H	Fazenda Cachoeira D'Antas	-19,94528	-43,40111
ANA/CPRM	2043027	H, S	Fazenda Ocidente	-19,81111	-41,43778
ANA/CPRM	2043011	H, S	Fazenda Paraíso	-19,37361	-42,10500
ANA/CPRM	2142004	H, S	Fazenda Umbaúbas	-19,49250	-41,16167
ANA/CPRM	2041048	H	Fazenda Vargem Alegre	-19,83361	-42,31778
ANA/CPRM	1943003	H, S	Ferros	-19,52472	-42,64417
ANA/CPRM	2040008	H, S	Garrafão (DNOS)	-19,88083	-43,36750
ANA/CPRM	1841020	H	Governador Valadares	-20,10806	-41,72833
ANA/CPRM	1842007	H, S	Guanhães	-20,10361	-42,44000
ANA/CPRM	1941009	H, S	Ibituba	-20,29889	-42,47806
ANA/CPRM	1941000	H, S	Ipanema	-20,21472	-42,65222
ANA/CPRM	1940012	H, S	Itaimbé	-20,01139	-42,67417
ANA/CPRM	1941018	H	Itanhomi	-20,09694	-43,48806
ANA/CPRM	1940000	H, S	Itarana	-20,68250	-42,80667
ANA/CPRM	1940022	H, S	Jacupemba	-20,38472	-42,90278
ANA/CPRM	1943024	H, S	José de Melo	-20,28556	-43,09889
ANA/CPRM	1741006	H	Ladainha	-20,84750	-43,24194
ANA/CPRM	2043002	H, S	Lagoa Grande	-20,51667	-43,01667
ANA/CPRM	1941008	H, S	Laranja da Terra	-21,14917	-43,52000
ANA/CPRM	1742017	H, S	Malacacheta	-20,27722	-42,32556
ANA/CPRM	1841009	H, S	Mantenópolis	-20,17056	-41,96111
ANA/CPRM	1942029	H	Mario de Carvalho	-19,90111	-41,05806
ANA/CPRM	2042017	H, S	Matipó	-20,07861	-41,12139
ANA/CPRM	1943025	H, S	Morro do Pilar	-18,98556	-40,74611
ANA/CPRM	1941019	H	Mutum	-19,69111	-41,02000
ANA/CPRM	1942032	H	Naque Velho	-19,18861	-42,42278
ANA/CPRM	1940013	H, S	Novo Brasil	-19,52361	-41,01417
ANA/CPRM	1940009	H, S	Pancas	-19,53083	-40,62306
ANA/CPRM	2142002	H	Patrocínio do Muriaé	-19,23750	-40,59139
ANA/CPRM	2043010	H, S	Piranga	-19,69222	-40,39806
ANA/CPRM	2042018	H, S	Ponte Nova jusante	-19,66361	-40,83528
ANA/CPRM	2043014	H, S	Porto Firme	-19,87444	-40,87444
ANA/CPRM	2042008	H, S	Raul Soares montante	-19,27417	-40,32083
ANA/CPRM	1941004	H, S	Resplendor jusante	-19,05778	-40,51639
ANA/CPRM	1940023	H, S	Rio Bananal	-19,22028	-40,85333
ANA/CPRM	2042011	H, S	Rio Casca	-19,05917	-41,02750
ANA/CPRM	1943001	H, S	Rio Piracicaba	-19,80528	-40,67889
ANA/CPRM	1843012	H	Rio Vermelho	-19,95500	-40,74167

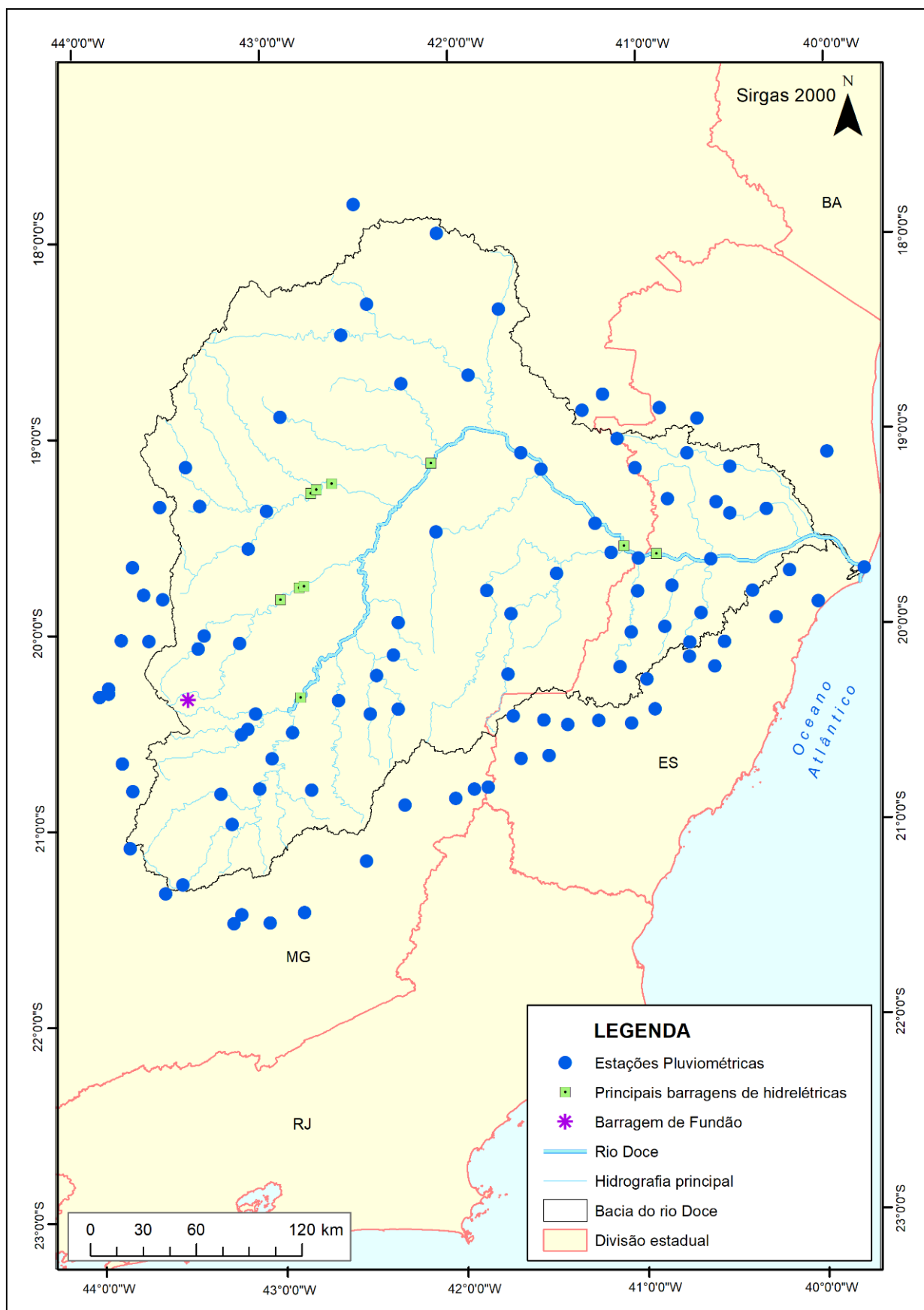
Resp./Operadora	Código	Aplicação*	Estação	Latitude	Longitude
ANA/CPRM	1943007	H, S	Santa Barbara	-17,62944	-41,73722
ANA/CPRM	2041017	H, S	Santa Cruz Caparaó	-17,69167	-42,52611
ANA/CPRM	1943008	H, S	Santa Maria do Itabira	-18,76306	-41,30833
ANA/CPRM	2040007	H, S	Santa Maria de Jetibá	-19,90278	-43,66639
ANA/CPRM	1842008	H, S	Santa Maria do Suaçuí	-19,68972	-43,58556
ANA/CPRM	1941011	H, S	Santo Antônio do Manhuaçu	-19,21889	-43,58806
ANA/CPRM	1940001	H, S	São João de Petrópolis	-20,76944	-42,30111
ANA/CPRM	1842020	H	São João Evangelista	-20,17917	-43,94278
ANA/CPRM	2042016	H, S	São Miguel do Anta	-20,30306	-43,61583
ANA/CPRM	1842004	H, S	São Pedro do Suaçuí	-21,05028	-42,51556
ANA/CPRM	1941010	H, S	São Sebastião da Encruzilhada	-21,15000	-42,20111
ANA/CPRM	1843011	H	Serro	-21,19278	-43,61389
ANA/CPRM	1841011	H, S	Tumiritinga	-19,58861	-40,19806
ANA/CPRM	2043025	H, S	Usina da Brecha	-20,32278	-41,70417
ANA/CPRM	1943027	H, S	Usina Peti	-18,83889	-41,11028
ANA/CPRM	1940010	H, S	Valsugana Velha montante	-18,80972	-40,69056
ANA/IGAM	2143007	H, S	Vargem do Engenho	-20,14333	-40,97528
ANA/CPRM	1943035	H, S	Vau da Lagoa	-20,02806	-40,74417
ANA/CPRM	1942006	H, S	Vermelho Velho	-19,95333	-40,55250
ANA/CPRM	1841001	H, S	Vila Matias montante	-18,95028	-39,76444
ANA/CPRM	1840004	S	Barra De São Francisco	-40,89360	-18,75360
ANA/CPRM	1840008	S	Ponte Nova (Br-101)	-39,99330	-18,98170
ANA/CPRM	1841006	S	Vargem Grande	-41,19670	-18,68110
ANA/CPRM	1939002	S	Povoação	-39,79440	-19,57750
ANA/CPRM	1940003	S	Riacho	-40,04310	-19,74970
ANA/CPRM	1940021	S	Aracruz	-40,27220	-19,83000
ANA	1940025	S	Serraria (Alto do Moacir)	-40,51750	-19,29530
ANA/CPRM	1943004	S	Jaboticatubas	-43,74440	-19,52060
ANA/CPRM	1943006	S	Sabará	-43,81500	-19,89310
ANA/CPRM	1943023	S	Taquaraçu	-43,68810	-19,66390
ANA/CPRM	2040018	S	Cachoeira Suiça (Dnos)	-40,60670	-20,07940
ANA/CPRM	2040023	S	São Rafael	-40,93390	-20,29640
ANA/CPRM	2041005	S	Caiana	-41,92190	-20,69390
ANA/CPRM	2041011	S	Conceição do Castelo (Dnos)	-41,23940	-20,35220
ANA/CPRM	2041013	S	Iúna	-41,53750	-20,34580
ANA/CPRM	2041014	S	Dores do Rio Preto	-41,84610	-20,68580
ANA/CPRM	2041016	S	Ibitirama	-41,66560	-20,54060
ANA/CPRM	2041018	S	Usina Fortaleza	-41,40890	-20,37140
ANA/CPRM	2041019	S	Itaici	-41,51140	-20,52830
ANA/CPRM	2041020	S	Arace (Fazenda Modelo)	-41,06110	-20,36670
ANA/CPRM	2042000	S	Carangola	-42,02390	-20,74000
ANA/CPRM	2043004	S	Rio do Peixe (Mmv)	-43,89250	-20,13780
ANA/CPRM	2043005	S	Conselheiro Lafaiete	-43,75360	-20,62500

Resp./Operadora	Código	Aplicação*	Estação	Latitude	Longitude
ANA/CPRM	2043013	S	Congonhas – Linigrafo	-43,83000	-20,52190
ANA/IGAM	2043018	S	Carandaí	-43,80080	-20,95580
ANA/CPRM	2043042	S	Represa das Codornas (Mmv)	-43,89190	-20,16470
ANA/CPRM	2142000	S	Astolfo Dutra	-42,86060	-21,30690
ANA/CPRM	2143000	S	Usina Ituerê	-43,20220	-21,30940
ANA/CPRM	2143001	S	Guarani	-43,05030	-21,35560
ANA/CPRM	2143017	S	Tabuleiro	-43,24690	-21,35500

Notas: H: Estações adotadas na caracterização hidrológica; S: Estações adotadas na simulação de sedimentos e H, S: Estações adotadas na caracterização hidrológica e na simulação de sedimentos.



Figura 1: Espacialização das estações pluviométricas apresentando longas séries históricas na bacia do Rio Doce.



No grupo das estações com dados recentes, estão incluídas aquelas cujos dados são disponibilizados na internet diariamente ou em tempo real. Tratam-se das estações telemétricas operadas pelo INMET, CEMADEN e ANA, cujos dados foram compilados diariamente durante o período de estudo, as quais estão listadas na Tabela 2 e espacializadas na Figura 2. Inicialmente foram analisadas as séries históricas para desconsiderar estações com múltiplos registros duvidosos (valores elevados de precipitação diária) e que apresentavam alto percentual de falhas diárias, sendo excluídas também estações muito próximas entre si. Ao final da aplicação dos critérios de seleção, foram selecionadas 122 estações telemétricas de precipitação na bacia do Rio Doce e em áreas lindeiras próximas.

Tabela 2: Estações pluviométricas com dados recentes na bacia do Rio Doce adotadas na caracterização hidrológica e na simulação de sedimentos.

Resp./ Operadora	Código	Aplicação*	Estação	Latitude	Longitude
ANA	56539000	S	Cachoeira Dos Óculos - Montante	-19,777	-42,476
ANA	56610100	S	PCH Rio Piracicaba Montante	-19,930	-43,173
ANA	56696000	S	Mario De Carvalho	-19,525	-42,641
ANA	56719998	S	Belo Oriente	-19,330	-42,376
ANA	56825000	S	Naque Velho	-19,188	-42,423
ANA	56846200	S	UHE Baguari Jusante	-18,971	-42,088
ANA	56850000	S	Governador Valadares	-18,883	-41,951
ANA	56891900	S	Vila Matias - Montante	-18,575	-41,918
ANA	56992370	S	UHE Mascarenhas Rio Guandu 2	-19,690	-41,027
ANA	56992380	S	UHE Mascarenhas Rio Guandu 1	-19,533	-41,009
ANA	57120080	S	UHE Suíça Jusante	-20,102	-40,515
ANA	57474000	S	PCH Viçosa Jusante	-20,408	-41,269
INMET	A521	S	Belo Horizonte (Pampulha)	-19,884	-43,969
INMET	F501	S	Belo Horizonte - Cercadinho	-19,980	-43,959
INMET	A541	S	Capelinha	-17,706	-42,389
INMET	A554	S	Caratinga	-19,736	-42,137
INMET	A537	S	Diamantina	-18,231	-43,648
INMET	A533	H, S	Guanhães	-18,787	-42,943
INMET	A555	S	Ibirité (Rola Moca)	-20,031	-44,011
INMET	A556	S	Manhuaçu	-20,263	-42,183
INMET	A527	S	Teófilo Otoni	-17,893	-41,515
INMET	A633	S	Venda Nova Do Imigrante	-20,386	-41,190
CEMADEN	320010203A	S	Floresta	-20,102	-41,165
CEMADEN	320010205A	S	Fazenda Guandu	-20,215	-41,103
CEMADEN	320010208A	H, S	Piracema	-20,177	-41,196
CEMADEN	320060705A	S	Vila Nova	-19,576	-40,187
CEMADEN	320090403A	S	Centro2 - Barra de São Francisco	-18,759	-40,885
CEMADEN	320140705A	S	Centro - Castelo	-20,603	-41,203
CEMADEN	320150602A	S	Maria das Graças	-19,512	-40,619
CEMADEN	320150603A	S	Maria das Graças	-19,571	-40,506
CEMADEN	320220702A	S	São José	-19,936	-40,409

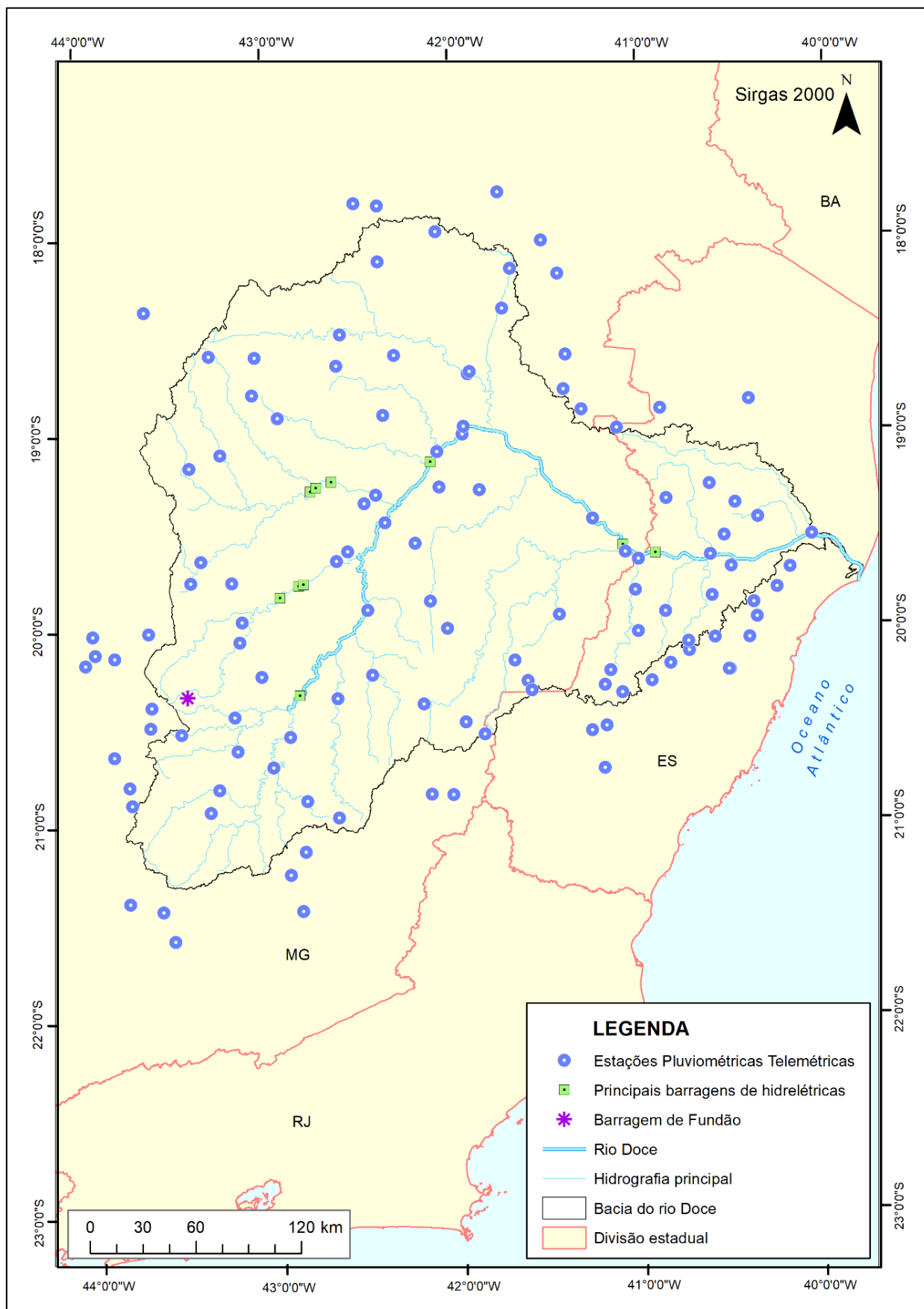
Resp./ Operadora	Código	Aplicação*	Estação	Latitude	Longitude
CEMADEN	320225601A	S	Governador Lindenberg	-19,245	-40,484
CEMADEN	320250402A	S	Av. Getúlio Vargas	-19,831	-40,368
CEMADEN	320270201A	S	Itaguaçu	-19,801	-40,865
CEMADEN	320313001A	S	João Neiva	-19,757	-40,386
CEMADEN	320316301A	S	São Luiz de Miranda	-19,903	-41,014
CEMADEN	320320501A	S	Centro - Linhares	-19,406	-40,069
CEMADEN	320330401A	S	Mantenópolis	-18,859	-41,118
CEMADEN	320390803A	S	Centro - Nova Venécia	-18,714	-40,407
CEMADEN	320450002A	S	Olaria	-20,101	-40,521
CEMADEN	320455901A	H, S	Alto Rio Possmoser	-20,067	-40,840
CEMADEN	320455903A	S	São João do Garrafão	-20,156	-40,941
CEMADEN	320455904A	S	São Luís	-20,003	-40,737
CEMADEN	320460901A	S	Centro - Santa Teresa	-19,936	-40,597
CEMADEN	320460902A	H, S	Alto Caldeirão	-19,955	-40,741
CEMADEN	320465801A	H, S	São Domingos do Norte	-19,148	-40,622
CEMADEN	320495502A	S	São Jacinto	-19,721	-40,610
CEMADEN	320060706A	S	Guaraná	-19,679	-40,259
CEMADEN	320400501A	H, S	Pancas	-19,223	-40,855
CEMADEN	320335301A	S	Marechal Floriano	-19,413	-40,543
CEMADEN	320435101A	S	Pancas	-19,319	-40,361
CEMADEN	310110201A	S	Igrejinha	-19,495	-41,078
CEMADEN	310230801A	S	Centro - Almenara	-20,108	-43,058
CEMADEN	310460101A	S	Centro - Astolfo Dutra	-21,312	-42,862
CEMADEN	310560804A	S	Correia de Almeida	-21,300	-43,627
CEMADEN	310560812A	S	Rodrigo Silva	-21,256	-43,806
CEMADEN	310630901A	S	Centro - Belo Oriente	-19,231	-42,485
CEMADEN	311000401A	S	José Brandão	-19,876	-43,667
CEMADEN	311080601A	S	Centro - Campanário	-18,240	-41,728
CEMADEN	311205901A	S	Centro - Cantagalo	-18,523	-42,624
CEMADEN	311230701A	S	Centro - Capelinha	-17,692	-42,515
CEMADEN	311330501A	S	Caixa D'Água	-20,729	-42,031
CEMADEN	311330502A	S	Alvorada	-20,726	-42,148
CEMADEN	311340402A	S	Rural	-19,876	-42,047
CEMADEN	311570601A	S	Centro - Central de minas	-18,763	-41,309
CEMADEN	311600101A	H, S	Centro – Chalé	-20,045	-41,685
CEMADEN	311750401A	S	Centro - Conceição do Mato Dentro	-19,035	-43,426
CEMADEN	311800702A	S	Dom Oscar	-20,504	-43,870
CEMADEN	311830401A	S	Centro - Conquista	-20,660	-43,791
CEMADEN	311830405A	S	Buarque de Macedo	-20,753	-43,779
CEMADEN	312170402A	S	Centro - Diogo de Vasconcelos	-20,487	-43,199
CEMADEN	312260301A	H, S	Centro - Dom Joaquim	-18,971	-43,257
CEMADEN	312420302A	S	Pq. Nac. Caparaó	-20,422	-41,854

Resp./ Operadora	Código	Aplicação*	Estação	Latitude	Longitude
CEMADEN	312580401A	S	Centro - Fernandes Tourinho	-19,153	-42,080
CEMADEN	312680201A	S	Centro - Frei Gaspar	-18,065	-41,429
CEMADEN	312690102A	S	Centro - Frei Inocêncio	-18,563	-41,908
CEMADEN	312770106A	S	Santa Paula	-18,842	-41,944
CEMADEN	312820401A	S	Centro - Guaraciaba	-20,574	-43,007
CEMADEN	312930102A	S	Centro - Iapu	-19,439	-42,214
CEMADEN	313130702A	S	Bom Jardim	-19,476	-42,581
CEMADEN	313170303A	S	N. S. das Oliveiras	-19,627	-43,209
CEMADEN	313170305A	S	Ipoema	-19,622	-43,431
CEMADEN	313170306A	S	Senhora do Carmo	-19,513	-43,375
CEMADEN	313270101A	S	Centro - Itambacuri	-18,036	-41,683
CEMADEN	313320401A	S	Centro - Itanhomi	-19,170	-41,863
CEMADEN	313620704A	S	Laranjeiras	-19,828	-43,158
CEMADEN	313700701A	S	Centro - Ladainha	-17,644	-41,744
CEMADEN	313770001A	S	Centro - Lajinha	-20,151	-41,615
CEMADEN	313770002A	S	Córrego São Domingos	-20,200	-41,595
CEMADEN	313920101A	S	Centro - Malacacheta	-17,843	-42,078
CEMADEN	313950801A	S	Centro - Manhumirim	-20,358	-41,956
CEMADEN	314060501A	S	Centro - Materlândia	-18,474	-43,060
CEMADEN	314150401A	S	Centro - Mendes Pimentel	-18,658	-41,402
CEMADEN	314390601A	S	Centro4 - Muriaé	-20,838	-42,655
CEMADEN	314400301A	S	Centro - Mutum	-19,815	-41,441
CEMADEN	314480505A	S	Oswaldo Barbosa Penna II	-19,999	-43,853
CEMADEN	314610702A	S	Subdistrito de Soares	-20,257	-43,660
CEMADEN	314610703A	S	Bauxita	-20,396	-43,502
CEMADEN	314610709A	S	Amarantina	-20,314	-43,211
CEMADEN	314610711A	S	Vila alegre	-20,359	-43,669
CEMADEN	315080201A	S	Rosário	-20,683	-43,303
CEMADEN	315210502A	S	Centro MG - Ponte Nova	-20,419	-42,910
CEMADEN	315400201A	S	Santana	-20,111	-42,459
CEMADEN	315430902A	S	Centro - Resplendor	-19,324	-41,255
CEMADEN	315490301A	H, S	Centro - Rio Casca	-20,228	-42,649
CEMADEN	315680901A	S	Centro - Sabinópolis	-18,666	-43,080
CEMADEN	316020701A	S	Centro - Santo Antônio do Itambé	-18,464	-43,306
CEMADEN	316070205A	S	Zona Rural	-21,454	-43,566
CEMADEN	316370654H	S	Rio Verde	-18,481	-41,390
CEMADEN	316410001A	S	Centro - São Pedro do Suaçuí	-18,364	-42,601
CEMADEN	316550301A	H, S	Centro - Sardoá	-18,780	-42,376
CEMADEN	316600601A	H, S	Centro - Senhora de Oliveira	-20,798	-43,353
CEMADEN	316990109A	S	Rua Lilina Rinaldi	-21,126	-42,925
CEMADEN	317130304A	S	São José do Triunfo	-20,750	-42,825
CEMADEN	317190701A	S	Centro - Virgolândia	-18,474	-42,311

Resp./ Operadora	Código	Aplicação*	Estação	Latitude	Longitude
CEMADEN	317200401A	S	Centro - Virgolândia	-21,009	-42,841
CEMADEN	310060901A	H, S	Centro - Água Boa	-17,993	-42,390
ANA	1942062	H	PCH Inhapim Jusante	-19,5253	-42,125
CEMADEN	315570201A	H	Piracicaba Centro	-19,9299	-43,1731
ANA	1942078	H	GCH Bom Jesus do Galho	-19,8292	-42,3183
ANA	2042053	H	PCH Tulio Cordeiro de Mello Montante 2	-20,2836	-42,3392
ANA	2043084	H	PCH Furquim Jusante	-20,3586	-43,2067

Notas: \* H: Estações adotadas na caracterização hidrológica; S: Estações adotadas na simulação de sedimentos e H, S: Estações adotadas na caracterização hidrológica e na simulação de sedimentos.

Figura 2: Espacialização das estações telemétricas na bacia do Rio Doce adotadas na caracterização hidrológica e na simulação de sedimentos.



As estações fluviométricas localizadas na bacia do Rio Doce, assim como os responsáveis por suas operações, foram identificadas e, em seguida, espacializadas, utilizando sistema de informações geográficas. Das estações identificadas nesta fase, algumas não estão mais em operação e outras apresentam séries históricas com muitas falhas ou estão localizadas muito próximas de outras. Assim, 38 estações com dados diários foram consideradas adequadas para caracterização hidrológica da bacia do Rio Doce. A Figura 3 apresenta a espacialização das 38 estações fluviométricas na bacia do Rio Doce. Destas, cinco estações estão localizadas na calha do Rio Doce, cinco localizadas no rio Piranga e no rio Santo Antônio, quatro estações no rio Manhuaçu, três estações nos rios Itambacuri e Piracicaba, duas estações no rio Corrente, no rio Caratinga e no rio do Carmo e uma estação em cada um dos seguintes rios: Casca, Guandu, Guanhões, Matipó, Pancas, Sacramento, Santa Joana, Santa Maria do Rio Doce e São José. Embora o rio Suaçuí Pequeno possua uma estação (Fazenda Aconchego) que se encontra também espacializada, a mesma possui poucos dados disponíveis, não constituindo uma série histórica e, portanto, não foi utilizada em análises estatísticas subsequentes.

Os dados das estações foram consistidos em escritório com a eliminação dos anos com falhas superiores a vinte dias e preenchimento de falhas para os anos com menos de 20 dias de falha. Para o preenchimento das falhas, foram utilizados dados das estações mais próximas localizadas nos mesmos cursos d'água das estações com séries a serem preenchidas. A Tabela 3 apresenta a listagem das estações e as operações executadas nas suas séries para consistência de seus dados. Das 38 estações, 36 tiveram os dados referentes ao ano 1988 eliminado devido ao grande número de falhas. A estação Dom Cavati teve dados relativos a três anos eliminados da análise (1988, 1991 e 1993), enquanto as estações Porto de Santa Rita, Instituto Florestal Raul Soares, Rio Piracicaba, Barra do Cuieté Jusante, Barra de São Gabriel, Colatina, Ponte do Pancas e Jusante Córrego da Piaba tiveram dados relativos a dois anos eliminados. Quatro estações tiveram dados preenchidos durante o processamento de consistência de dados, Instituto Florestal Raul Soares, Mário de Carvalho, Colatina e Jusante Córrego da Piaba.

Para a maioria das estações, as séries históricas consideradas compreenderam registros relativos aos anos de 1985 a 2014. Exceções dizem respeito às estações Nova Era IV, Mario de Carvalho e Belo Oriente. Para a primeira, a série histórica abrangeu o período 1990-2016, enquanto para as estações Mario de Carvalho e Belo Oriente as séries abrangeram o período 1987-2016.

Para caracterização da geração e do transporte de sedimentos foram considerados dados diários de outras 23 estações fluviométricas em adicional àquelas utilizadas na caracterização hidrológica, pois foram selecionadas estações que apresentavam ao menos 5 anos de dados entre os anos de 1970 e 2014. Essas estações estão devidamente identificadas na Tabela 3 e especializadas na Figura 3.



Figura 3: Espacialização das estações fluviométricas na bacia do Rio Doce adotadas na caracterização hidrológica e na simulação de sedimentos.

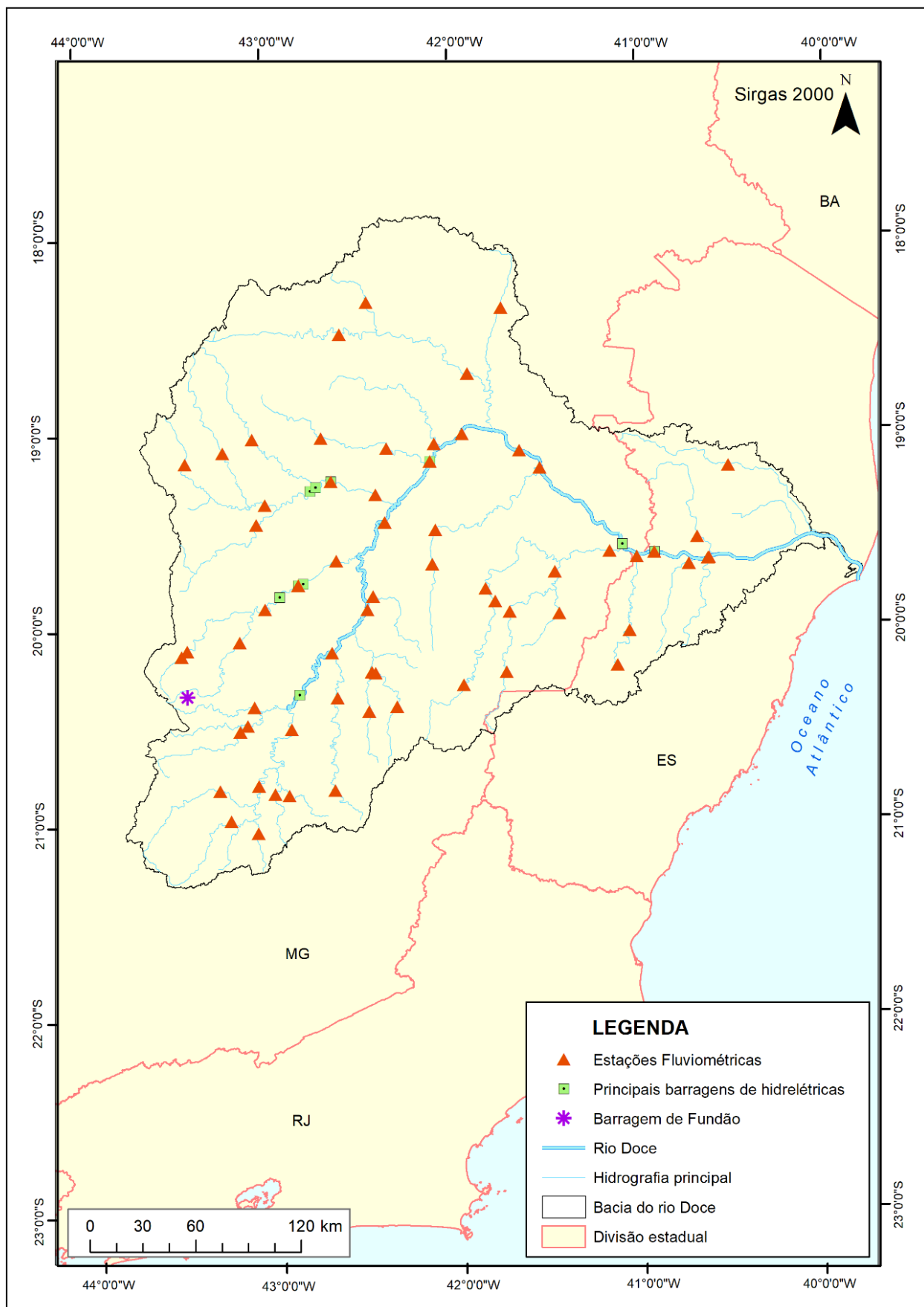




Tabela 3: Verificação da consistência de dados fluviométricos das estações da bacia do Rio Doce.

Código	Aplicação*	Estação	Anos eliminados	Preenchimento de falhas
56846000	H, S	Porto de Santa Rita	1988 e 1989	-
56055000	H, S	Braz Pires	1988	-
56090000	H, S	Fazenda Varginha	1988	-
56110005	H, S	Ponte Nova Jusante	1988	-
56335001	H, S	Acaiaca Jusante	1988	-
56337000	H, S	Fazenda Ocidente	1988	-
56425000	H, S	Fazenda Cachoeira D'Antas	1988	-
56510000	H, S	Instituto Florestal Raul Soares	1988 e 2009	Dez. 2008
56539000	H, S	Cachoeira dos Óculos Montante	1988	-
56570000	H, S	Pingo D'Água	1988	-
56610000	H, S	Rio Piracicaba	1986 e 1988	-
56659998	H, S	Nova Era IV	-	-
56696000	H, S	Mário de Carvalho	1988	Mai. 1985, jul. 2016 e set. 2016
56719998	H, S	Belo Oriente	1988	-
56765000	H, S	Dom Joaquim	1988	-
56775000	H, S	Ferros	1988	-
56787000	H, S	Fazenda Barraca	1988	-
56800000	H, S	Senhora do Porto	1988	-
56825000	H, S	Naque Velho	1988	-
56845000	H, S	Fazenda Corrente	1988	-
56860000	H, S	São Pedro do Suaçuí	1988	-
56870000	H, S	Santa Maria do Suaçuí	1988	-
56891900	H, S	Vila Matias Montante	1988	-
56920000	H, S	Tumiritinga	1988	-
56935000	H, S	Dom Cavati	1988, 1991 e 1993	-
56940002	H, S	Barra do Cuieté Jusante	1988 e 1993	-
56978000	H, S	Santo Antônio do Manhuaçu	1988	-
56988500	H, S	Ipanema	1988	-
56989001	H, S	Mutum	1988	-
56989400	H, S	Assaraí montante	1988	-
56998400	H, S	Barra de São Gabriel	1988 e 1989	-
56992000	H, S	Baixo Guandu	1988	-
56994500	H, S	Colatina	1988 e 1989	Jan. 1985 e fev. 1985
56995500	H, S	Ponte do Pancas	1988 e 1989	-
56993551	H, S	Jusante Córrego da Piaba	1990 e 1989	Mar 1995
56075000	H, S	Porto Firme	1988	-
56085000	H, S	Seriquite	1988	-
56065000	H, S	Senador Firmino	1988	-
56028000	S	Piranga	-	-

Código	Aplicação*	Estação	Anos eliminados	Preenchimento de falhas
56240000	S	Fazenda Paraíso	-	-
56385000	S	São Miguel do Anta	-	-
56415000	S	Rio Casca	-	-
56460000	S	Matipó	-	-
56484998	S	Raul Soares (Montante)	-	-
56500000	S	Abre Campo	-	-
56640000	S	Carrapato (Brumal)	-	-
56688080	S	UHE Sá Carvalho (Barramento Antônio Dias)	-	-
56750000	S	Conceição do Mato Dentro	-	-
56820080	S	UHE Porto Estrela (Barramento)	-	-
56846890	S	Fazenda Aconhego	-	-
56850000	S	Governador Valadares	-	-
56851000	S	Campanário	-	-
56928000	S	Inhapim	-	-
56960005	S	Fazenda Vargem Alegre	-	-
56976000	S	Fazenda Bragança	-	-
56983000	S	Dores de Manhumirim	-	-
56990000	S	São Sebastião da Encruzilhada	-	-
56990990	S	Afonso Cláudio (Montante)	-	-
56991500	S	Laranja da Terra	-	-
56992400	S	UHE Mascarenhas (Barramento)	-	-
56994510	S	Colatina (Corpo de Bombeiros)	-	-

Notas: \* H: Estações adotadas na caracterização hidrológica; S: Estações adotadas na simulação de sedimentos e H, S: Estações adotadas na caracterização hidrológica e na simulação de sedimentos.

Com o objetivo de verificar a origem das águas que compunham as vazões do Rio Doce durante as campanhas de monitoramento, foi realizada uma verificação das vazões das sub-bacias no período antecedente às campanhas, pelo fato de ser considerável a influência do Rio Doce no período antecedente às campanhas de monitoramento. Como a influência do reservatório da Usina Hidrelétrica Eliezer Batista (Aimorés) foi considerada significativa na mistura das águas originadas a montante deste, a análise utilizou as vazões do Rio Doce que afluem no lago e as vazões das estações a jusante do reservatório, que estão situadas nas bacias dos rios Pancas, Manhauçu, Guandu, Santa Joana, São José, Colatina e Santa Maria do Rio Doce.

A inclusão dos dados de sedimentos em suspensão é crucial na modelagem, pois viabiliza a avaliação dos resultados obtidos, principalmente para calibração e validação do modelo matemático, assim como para ajuste da ressuspensão do rejeito depositado no leito do Rio Doce. Para a etapa de calibração e validação foram consultados os registros diários das estações sedimentológicas por meio de consultas aos bancos de dados da Agência Nacional de Águas – ANA para identificar as estações que apresentavam registros de concentração de sedimentos em suspensão e respectiva descargas líquidas. Assim foram pré-selecionadas 43 estações com dados disponíveis. Destas estações, foram

excluídas as que apresentavam poucos registros. Ao final, foram selecionadas 30 estações localizadas ao longo do Rio Doce e de seus principais tributários.

Adicionalmente, também foram considerados os dados da estação Ouro Fino, que pertence à Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), que apesar de estar atualmente desatualizada, apresenta, entre as estações selecionadas, o maior quantitativo de dados de sedimentos em suspensão na bacia do Rio Doce. Assim, foram adotados os dados de 31 estações de monitoramento de sedimentos em suspensão e de vazão de forma conjunta para calibração e validação do modelo. As estações selecionadas encontram-se detalhadas na Tabela 4 e visualizadas na Figura 4. No geral as séries históricas das estações da ANA apresentam 4 medições anuais, em contraste a estação Outro Fino que apresenta sequência de dados diários, mas apresenta seu último registro no ano de 2013.

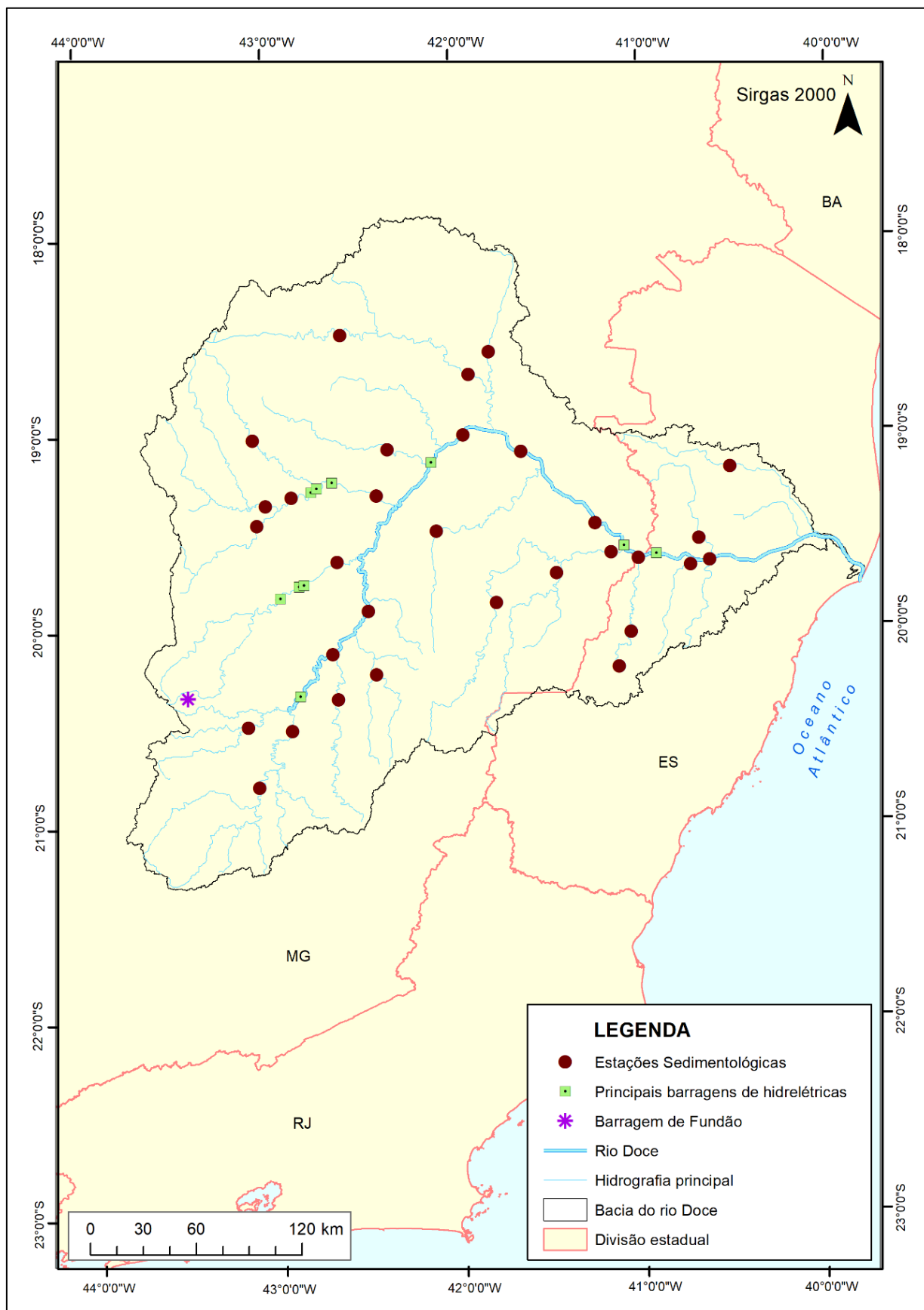
Tabela 4: Informações das 31 estações com medição de vazão e concentração de sedimentos em suspensão na bacia do Rio Doce adotadas na caracterização hidrossedimentológica.

Operadora	Código	Estação	Latitude	Longitude	Dados Início – Fim*
ANA/CPRM	56075000	Porto Firme	-20,6703	-43,0881	1998-2022
ANA/CPRM	56110005	Ponte Nova Jusante	-20,3839	-42,9028	1982-2022
ANA/CPRM	56335001	Acaiaca Jusante	-20,3614	-43,1394	1976-2022
ANA/CPRM	56415000	Rio Casca	-20,2261	-42,6500	1998-2022
ANA/CPRM	56425000	Fazenda Cachoeira D'antas	-19,9944	-42,6744	1998-2023
ANA/CPRM	56484998	Raul Soares Montante	-20,1036	-42,4400	1998-2022
ANA/CPRM	56539000	Cachoeira dos Óculos Montante	-19,7769	-42,4764	1999-2022
ANA/CPRM	56696000	Mario de Carvalho	-19,5247	-42,6408	1988-2023
ANA/CPRM	56775000	Ferros	-19,2322	-43,0200	1998-2022
ANA/CPRM	56787000	Fazenda Barraca	-19,3319	-43,0703	1998-2018
ANA/CPRM	56800000	Senhora do Porto	-18,8947	-43,0825	1976-2020
ANA/CPRM	56825000	Naque Velho	-19,1881	-42,4228	1998-2023
ANA/CPRM	56846000	Porto Santa Rita	-18,9517	-42,3592	1998-2022
ANA/CPRM	56850000	Governador Valadares	-18,8831	-41,9508	1998-2023
ANA/CPRM	56860000	São Pedro do Suaçuí	-18,3631	-42,6022	1998-2022
ANA/CPRM	56891900	Vila Matias Montante	-18,5747	-41,9178	1976-2022
ANA	56915500	Jampruca	-18,4594	-41,8075	1998-2009
ANA/CPRM	56920000	Tumiritinga	-18,9711	-41,6417	1974-2022
ANA/CPRM	56935000	Dom Cavati	-19,3728	-42,1028	1998-2022
ANA	56948005	Resplendor - Jusante	-19,3431	-41,2461	1998-2004
ANA/CPRM	56976000	Fazenda Bragança	-19,7431	-41,7853	1998-2018
ANA/CPRM	56989400	Assarai Montante	-19,5947	-41,4581	1998-2022
ANA/CPRM	56990000	São Sebastião da Encruzilhada	-19,4925	-41,1617	1979-2019
ANA/CPRM	56990990	Afonso Cláudio Montante	-20,0775	-41,1242	1998-2022
ANA/CPRM	56991500	Laranja da Terra	-19,9011	-41,0581	1998-2022
ANA/CPRM	56992000	Baixo Guandu	-19,5236	-41,0142	1998-2022
ANA/CPRM	56993551	Jusante Córrego da Piaba	-19,5586	-40,7325	1998-2022
ANA/CPRM	56994500	Colatina	-19,5333	-40,6297	1976-2023

Operadora	Código	Estação	Latitude	Longitude	Dados Início – Fim*
ANA/CPRM	56995500	Ponte do Pancas	-19,4228	-40,6864	1998-2022
ANA/CPRM	56998400	Barra de São Gabriel	-19,0411	-40,5339	1998-2022
CEMIG	**	Ouro Fino	-19,1900	-42,8800	1990-2013

Notas: \* O período fim refere-se ao último ao ano da atualização da série histórica.

Figura 4: Espacialização das 31 estações sedimentológicas com medição de vazão e concentração de sedimentos em suspensão na bacia do Rio Doce adotadas na caracterização hidrossedimentológica.

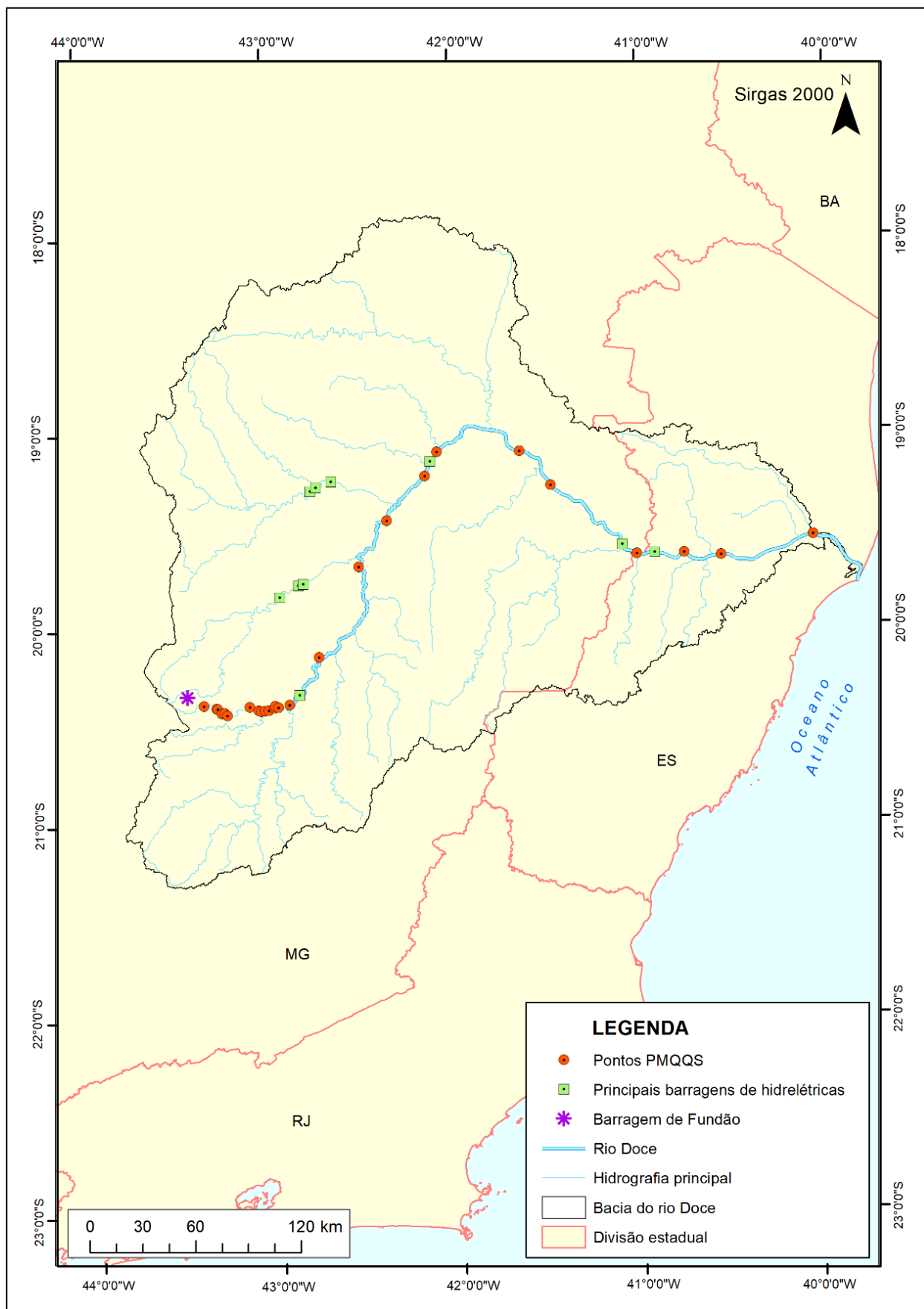


Para avaliação da ressuspensão do rejeito depositados no leito dos rios impactados após o rompimento da Barragem de Fundão, além dos registros de vazão e de concentração de sedimentos em suspensão (CSS) das estações da ANA que se encontram no Rio Doce e da estação E21 (Linhares/ES), também foram utilizados dados das estações do Programa de Monitoramento Quali-quantitativo Sistemático de Água e Sedimento (PMQQS) implementado em 2017. Foram selecionadas as estações do PMQQS que se encontram nos cursos d'água impactados pelo rejeito e seus dados foram obtidos por meio do endereço eletrônico "monitoramentorioce.org". Foram selecionados os registros diários de sólidos suspensos totais (SST mg/L) e Vazão (m³/s) quando monitorados no mesmo dia. Assim, foram selecionadas 26 estações do PMQQS que estão apresentadas na Tabela 5 e espacialmente representadas na Figura 5.

Tabela 5: Pontos de Monitoramento do PMQQS com medição de vazão e sólidos suspensos totais na bacia do Rio Doce adotadas na caracterização hidrossedimentológica.

Código	Curso d'água	Latitude	Longitude
RGN 02M	Rio Gualaxo do Norte	-20,25	-43,38
RGN-02	Rio Gualaxo do Norte	-20,27	-43,31
RGN-03	Rio Gualaxo do Norte	-20,27	-43,30
RGN-05	Rio Gualaxo do Norte	-20,29	-43,28
RGN-04	Rio Gualaxo do Norte	-20,29	-43,27
RGN-06	Rio Gualaxo do Norte	-20,30	-43,25
RGN 07M	Rio Gualaxo do Norte	-20,26	-43,13
RGN-07	Rio Gualaxo do Norte	-20,28	-43,08
RGN-08	Rio Gualaxo do Norte	-20,29	-43,07
RCA-02M	Rio do Carmo	-20,28	-43,04
RCA-03	Rio do Carmo	-20,28	-43,03
RCA-04	Rio do Carmo	-20,27	-42,99
RCA-05	Rio do Carmo	-20,26	-42,99
RCA-06	Rio do Carmo	-20,27	-42,97
RDO 01J	Rio Doce	-20,26	-42,91
RDO-03	Rio Doce	-20,01	-42,74
RDO-04	Rio Doce	-19,55	-42,52
RDO-05	Rio Doce	-19,32	-42,36
RDO-06	Rio Doce	-19,10	-42,16
RDO-07	Rio Doce	-18,97	-42,09
RDO-09	Rio Doce	-18,97	-41,64
RDO 09J	Rio Doce	-19,15	-41,48
RDO-11	Rio Doce	-19,51	-41,01
RDO-12	Rio Doce	-19,50	-40,76
RDO-14	Rio Doce	-19,51	-40,56
RDO-15	Rio Doce	-19,41	-40,06

Figura 5: Representação dos pontos de monitoramento do PMQQS com medição de vazão e sólidos suspensos totais na bacia do Rio Doce adotadas na caracterização hidrossedimentológica.



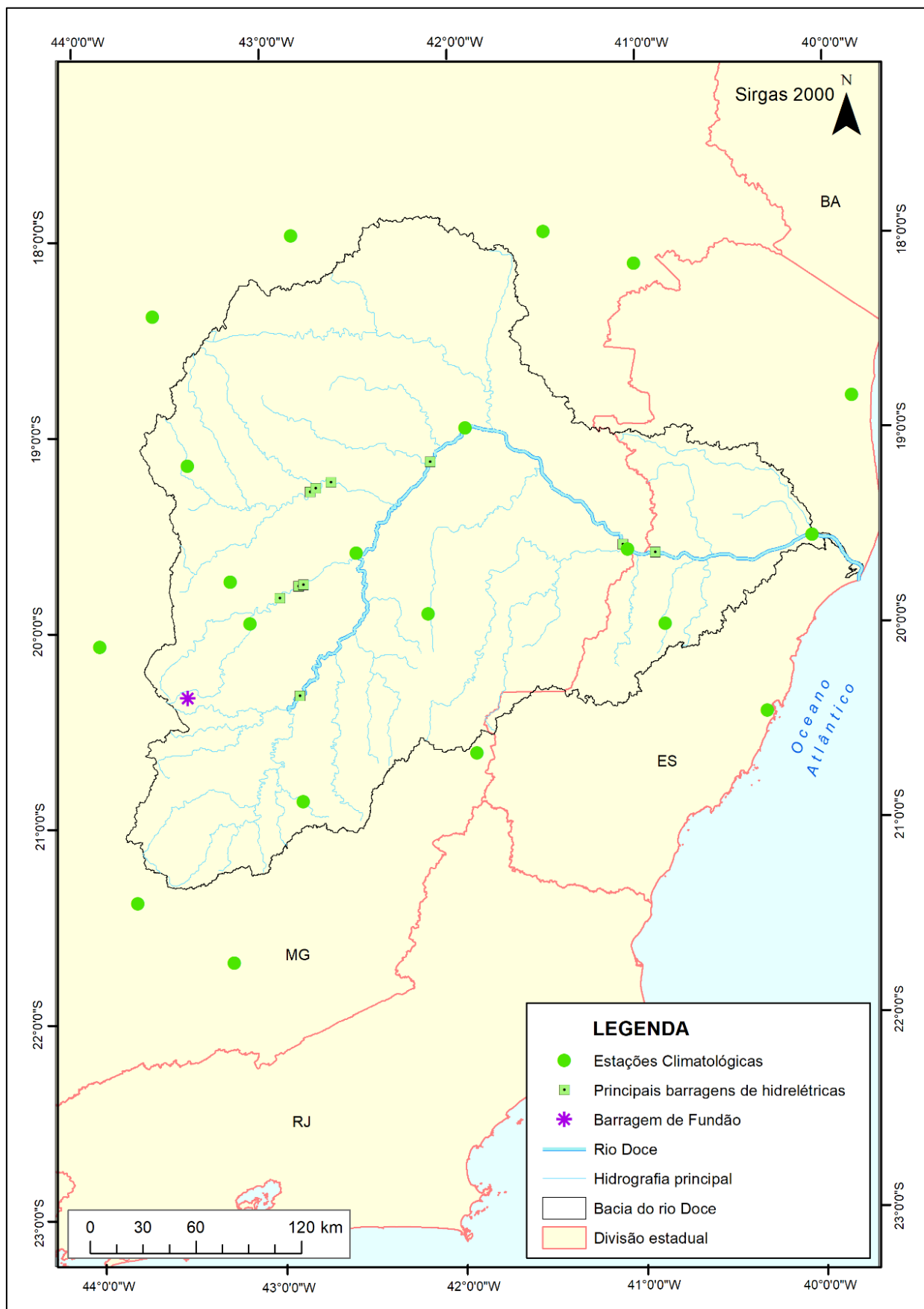
Adicionalmente, para a caracterização da geração e do transporte de sedimentos são necessários dados de temperatura, pressão, insolação, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Nesse contexto, os dados climáticos utilizados são os provenientes da base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Para os dados climáticos foram adotadas as normais climatológicas. Ao todo 10 estações estão inseridas na área de contribuição do Rio Doce. Contudo, também foram consideradas estações localizadas fora da bacia, mas que se encontram próximas ao seu limite, de forma a melhor representar a espacialização dessas variáveis, especialmente no contorno da bacia. Na simulação para o período pós-rompimento foram consideradas as estações com dados recentes. As informações das estações climatológicas selecionadas estão apresentadas na Tabela 6 e a espacialização é representada na Figura 6.

Tabela 6: Estações climatológicas na bacia do Rio Doce e seu entorno adotadas na caracterização hidrossedimentológica para obtenção de dados de temperatura, pressão, insolação, umidade relativa do ar e velocidade do vento.

Código	Estação	Latitude	Longitude
83034	Itarana	-19,867	-40,867
83037	Coronel Pacheco	-21,567	-43,250
83488	Itamarandiba	-17,850	-42,850
83490	Itambacuri	-18,017	-41,017
83492	Teófilo Otoni	-17,850	-41,500
83538	Diamantina	-18,250	-43,600
83543	Governador Valadares	-18,850	-41,933
83550	São Mateus	-18,700	-39,850
83587	Belo Horizonte	-19,933	-43,933
83589	Conceição do Mato Dentro	-19,017	-43,433
83590	Itabira	-19,617	-43,217
83591	João Monlevade	-19,833	-43,117
83592	Caratinga	-19,800	-42,150
83594	Usiminas	-19,483	-42,533
83595	Aimorés	-19,483	-41,067
83597	Linhares	-19,417	-40,067
83639	Caparaó	-20,517	-41,900
83642	Viçosa	-20,750	-42,850
83648	Vitória	-20,317	-40,317
83689	Barbacena	-21,250	-43,767



Figura 6: Espacialização das climatológicas na bacia do Rio Doce. adotadas na obtenção de dados de temperatura, pressão, insolação, umidade relativa do ar e velocidade do vento.

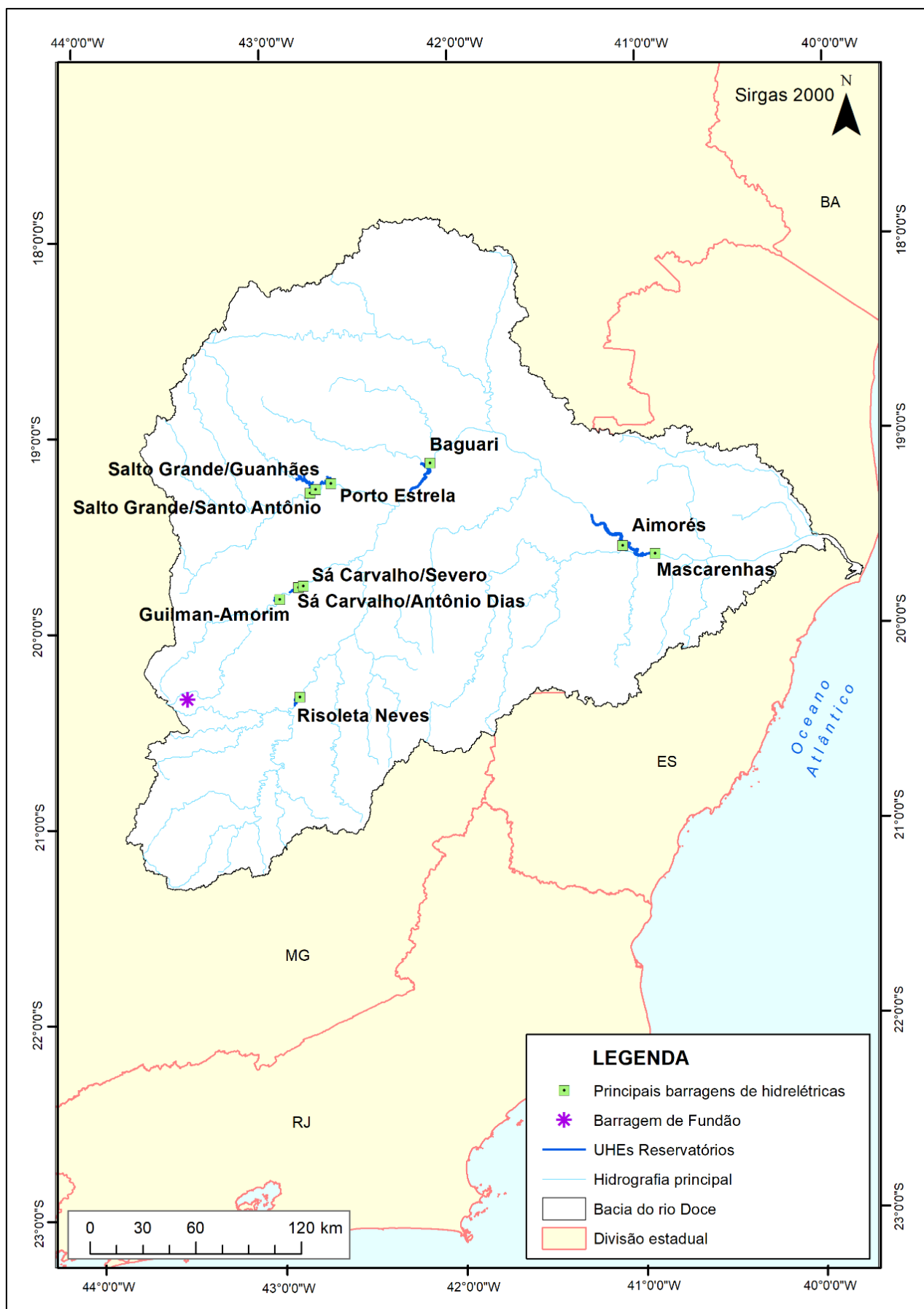


O efeito dos reservatórios existentes ao longo do Rio Doce foi considerado na modelagem hidrossedimentológica. Nesse sentido, foram identificados 4 reservatórios de usinas hidrelétricas (UHE) ao longo do Rio Doce e 6 reservatórios localizados nos seus tributários, cujas informações encontram-se apresentadas na Tabela 7. Em 2019 a ANA começou a disponibilizar informações das UHEs existentes no Brasil, o que inclui a atualização de curva “Cota x Área x Volume” dos reservatórios contidos na Tabela 7, o que permite obter informações atualizadas destes reservatórios, que se encontram especializados na Figura 7 (ANA, 2019a).

Tabela 7: Características das barragens das UHE da bacia do Rio Doce.

UHE	Rio	Latitude	Longitude	Início	Área de drenagem (km²)	Vazão Média de Longo Termo (m³/s)	Volume Máximo Maximorum Original (hm³)	Volume Máximo Maximorum Atualizado (hm³)
Risoleta Neves	Doce	-20,207	-42,855	2004	8900	161,00	54,44	29,75
Baguari	Doce	-19,021	-42,125	2009	38350	496,10	38,10	35,94
Aimorés	Doce	-19,459	-41,093	2006	62362,80	816,00	241,79	228,14
Mascarenhas	Doce	-19,500	-40,918	1974	74137	896,40	-	33,16
Guilman-Amorim	Piracicaba	-19,708	-42,960	1997	4186	84,80	-	8,09
Sá Carvalho/Antônio Dias	Piracicaba	-19,646	-42,850	1951	4682,61	84,00	2,57	1,28
Salto Grande/Santo Antônio	Santo Antônio	-19,165	-42,776	1956	6519	152,00	1,81	1,89
Salto Grande/Guanhães	Guanhães	-19,146	-42,745	1956	8997,59	152,00	78,00	60,05
Porto Estrela	Santo Antônio	-19,116	-42,662	2001	9393	158,00	85,65	75,01
Sá Carvalho/Severo	Severo	-19,638	-42,823	1951	4682,61	84,00	-	0,10

Figura 7: Espacialização das 10 UHEs e seus reservatórios ao longo do Rio Doce e seus tributários.



### **2.1.2 Caracterização e análise de interrelações envolvendo ações na bacia hidrográfica e aspectos de quantidade/qualidade da água e biodiversidade aquática**

Para o desenvolvimento dos produtos deste subprojeto, foram identificados, levantados, atualizados e analisados dados de diferentes naturezas, obtidos em bases públicas, relatórios técnicos de instituições governamentais, artigos técnico-científicos, atas de reuniões das câmaras técnicas e do CIF, além de Relatórios Técnicos Anuais e outras bases de dados da Fundação Renova, que apresentam o andamento de suas atividades.

As ações selecionadas por estarem relacionadas com impactos nos fluxos de água e sedimentos foram: saneamento básico (eixo esgoto); recuperação de Áreas de Preservação Permanentes (APPs); proteção e recuperação de nascentes; reflorestamento; e manejo de rejeitos em reservatórios. Relaciona-se a execução das ações de reflorestamento, recuperação de APP e proteção de nascentes principalmente com o aporte de sedimentos a cursos d'água, enquanto as ações de saneamento básico relacionadas ao eixo esgoto, influenciam diretamente nas cargas de DBO lançadas no Rio Doce e em seus afluentes. Além destas, foi selecionada a ação de manejo de rejeitos no reservatório da UHE Risoleta Neves em função da mobilização dos mesmos e do transporte para jusante.

Para subsidiar o entendimento acerca dos impactos do conjunto de ações e intervenções realizadas pela Fundação Renova sobre os aspectos de qualidade de água e na biodiversidade, foram analisados dados de órgãos públicos relacionados aos temas de saneamento básico (eixo esgoto), quantidade e qualidade de água superficial, dados censitários e dados georreferenciados. Portanto, foi realizada revisão de literatura e consultas as seguintes bases de dados: Sistema Nacional de Informações de Saneamento (SNIS), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Portal HidroWeb do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), Infraestrutura de Dados Espaciais IDE-SISEMA, GEOIEMA (plataforma online para divulgação de dados ambientais geoespaciais o Instituto Estadual de Meio Ambiente-IEMA), Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce (PIRH), Sistema de Licenciamento Ambiental-SLA da Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) do Estado de Minas Gerais e Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA) do Estado do Espírito Santo.

### **2.1.3 Hidrologia e transporte de sedimentos**

As medições de vazão e fluxos d'água foram feitas com ADCP River Ray, em seções transversais do Rio Doce nas estações amostrais. Para estimativas de descargas sólidas foram coletadas amostras da mistura água/sedimentos para análise de sedimentos suspensos, e amostras de sedimentos de fundo. As medições de descargas sólidas de sedimentos em suspensão foram realizadas pelo método Igual Incremento de Largura, com uso de amostrador de integração na vertical. Foram coletadas amostras de sedimento de fundo, com uso de draga, para determinação das distribuições granulométricas dos materiais dos leitos. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e identificadas. Todas as

amostras coletadas foram enviadas ao LABHIDRO/UFES para análises de concentração e granulometria de sólidos suspensos e de fundo.

## 2.2 ANÁLISE

### 2.2.1 Caracterização hidrológica global para compreensão do aporte de água doce e do transporte de sedimentos no ambiente estuarino-marinho do Rio Doce

Os principais fatores que influem no regime hídrico de uma região são a topografia, a capacidade de infiltração dos solos (estritamente ligada ao uso e ocupação, às suas condições físicas como porosidade, textura, estrutura, entre outros) e o regime climático local, principalmente pluviosidade e os fatores que interferem na evapotranspiração (vento, radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar). A espacialização dessas variáveis reflete na diferenciação do regime fluviométrico de uma bacia ou das sub-bacias que a compõem, como é o caso da Bacia do Rio Doce.

Foi aplicada a modelagem hidrológica à Bacia do Rio Doce, justificada pelo fato de que a publicação de dados fluviométricos das estações na bacia do Rio Doce não ocorre em tempo real, o que dificulta a interpretação dos dados quanto à origem das águas monitoradas por este PMBA/Fest, isto é, qual a percentagem da água monitorada em um determinado dia que vem da região próxima à barragem de Fundão e qual é a percentagem vinda de sub-bacias não impactadas pelo rompimento da barragem. Como as estações gerenciadas pelo CEMADEN e pelo Gestor PCD publicam diariamente dados pluviométricos, julgou-se conveniente ajustar um modelo hidrológico à bacia do Rio Doce para simular vazões tendo dados pluviométricos como uma das variáveis de entrada, de forma a auxiliar nas análises.

Dentre os modelos hidrológicos disponíveis, decidiu-se por utilizar o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). Trata-se de um modelo hidrológico de simulação diária integrado a um Sistema de Informações Geográficas que permite a representação da bacia hidrográfica estudada em *layers*, sendo possível, desta forma, utilizar modelos digitais de elevação, mapas de solo e uso e ocupação do solo como dados de entrada e estudar o comportamento hidrológico das diversas variáveis de entrada, inclusive as ligadas ao clima. O modelo foi desenvolvido pelo *US Department of Agriculture - Agricultural Research Service* no *Soil and Water Research Laboratory*, em *Temple no Texas, EUA*, em 1990 e vem sofrendo atualizações constantes ao longo dos anos.

O SWAT permite que diferentes processos físicos sejam simulados em uma bacia hidrográfica com o objetivo de analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água em bacias hidrográficas não instrumentadas (MACHADO, 2002). O modelo é dividido em oito componentes de dados (MARCHIORO, 2008):

- **Clima:** possibilita a geração estocástica de dados climáticos através do algoritmo baseado na cadeia de *Markov* para uma localidade específica, tais como precipitação, temperatura, velocidade do vento e radiação solar.
- **Hidrologia:** calcula a infiltração, o movimento da água no solo, umidade relativa, balanço hídrico diário, fluxo subterrâneo lateral, escoamento superficial e retorno do fluxo.

- **Crescimento de plantas:** simula as mudanças temporais das plantas e resíduos, tais como altura da copa, profundidade de raiz e biomassa produzida.
- **Solos:** requer parâmetros físicos (profundidade do perfil e dos horizontes, textura, entre outros) e hídricos (condutividade hidráulica e disponibilidade de água por horizonte).
- **Processo de erosão/sedimentação:** governado pela MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*) que utiliza o escoamento para simular a erosão e produção de sedimentos.
- **Nutrientes e pesticidas:** o modelo simula o comportamento para a variável encosta e a propagação no canal fluvial.
- **Manejo:** permite que o usuário indique o tipo, início e fim do manejo para que o modelo possa simular sua variação temporal.

O SWAT é classificado como um modelo baseado em processos, incorporando equações que descrevem a relação entre as variáveis do sistema. É também classificado como um modelo distribuído, pois subdivide a bacia hidrográfica em sub-bacias ou Unidades de Resposta Hidrológica (URH) de modo a refletir a diferença do tipo de solo, cobertura vegetal, topografia e uso do solo em cada URH, sendo possível a subdivisão da bacia em centenas a milhares de unidades, cada uma representando um sistema aberto (ANDRIOLO *et al*, 2008).

As URH são aglomerados de células que possuem idênticas características de vegetação, tipo de solo, práticas conservacionistas, dentre outros e são fundamentais quando diferentes áreas da bacia hidrográfica são dominadas por usos e tipos de solo diferentes (NEITSCH *et al*, 2005).

Após os trabalhos de coleta e compilação de dados hidrológicos, a simulação hidrológica se dividiu em quatro etapas:

- Elaboração de mapas.
- Calibração do modelo
- Modelagem hidrológica atual.
- Análise dos resultados.

As informações cartográficas que compuseram dados de entrada do modelo SWAT foram o Modelo Digital de Elevação (MDE) e os mapas Pedológico e de Uso e Ocupação do Solo da bacia do rio Doce. O MDE utilizado foi o disponibilizado no Portal para Informações e Dados Espaciais da Agência Nacional de Águas (GeoNetwork – ANA, 2018). Este possui moderada resolução espacial (células de 10m) e foi criado a partir de Modelos Digitais SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), ASTER GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) e *Global Digital Elevation Map*. A interpolação utilizada para a elaboração do MDE com resolução de 10 m foi pelo método “*Spline*”. Além disso, foram utilizados os pontos altimétricos cotados para alocação de torres de transmissão de sinal de telefonia celular distribuídos aleatoriamente por toda a área do projeto, aprimorando a acurácia do dado. Para a área correspondente ao fuso 23S, foram utilizados 9.720 pontos com as coordenadas planialtimétricas conhecidas e na área pertencente ao fuso 24S, um total de 6.478 pontos. Como resultado, foi gerado um MDE de Superfície (MDS) com uma precisão de 5 m na altimetria e 10 m na planimetria.

O Mapa de Uso e Ocupação do Solo utilizado é também disponibilizado pelo Portal para Informações e Dados Espaciais (GeoNetwork – ANA, 2018). O mapa foi criado por meio de imagens de satélites ALOS, QUICKBIRD, WORLD VIEW I e LANDSAT-7 e o produto tem uma escala de interpretação de 10 metros compatível com escala 1:100.000. Os dados de uso e ocupação do solo foram elaborados a partir de imagens captadas entre 2013 e 2014.

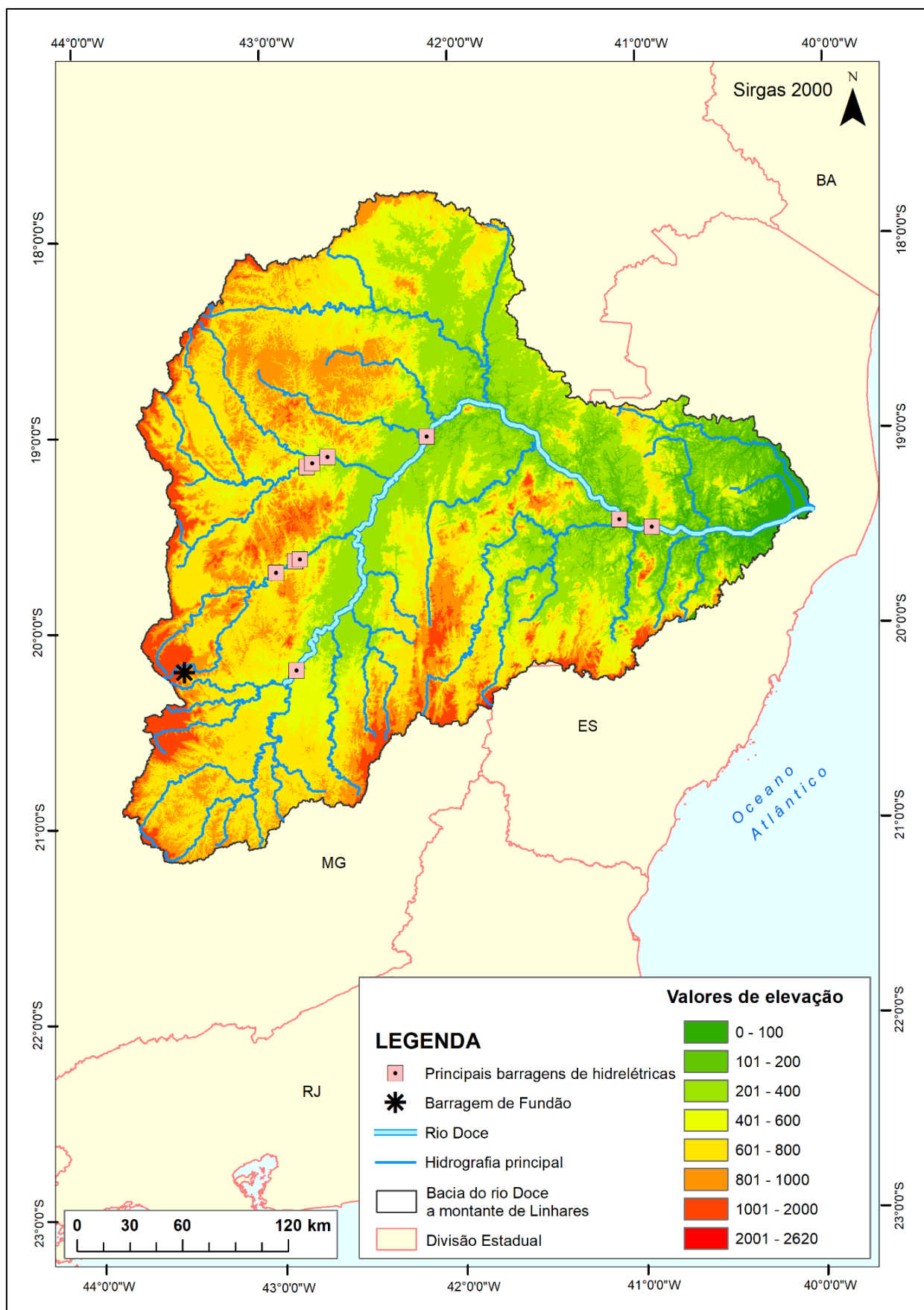
Já o Mapa Pedológico da bacia do Rio Doce foi criado em 2006 pela Diretoria de Geociências do IBGE e está disponibilizado pelo Portal FTP deste órgão em resolução 1:5.000.000 (IBGE, 2006).

Cabe ressaltar que o mapa de uso e ocupação do solo utilizado como entrada da modelagem hidrológica e de sedimentos, não sofre atualização, uma vez que os modelos foram calibrados utilizando registros históricos (vazão e sedimentos) anteriores ao rompimento da Barragem (que ocorreu em 2015), e, portanto, são os mais atualizados, existentes em domínio público, anteriores a essa data. Destaca-se, ainda, que esta resolução atende completamente às exigências de processamento para a modelagem hidrológica e de sedimentos.

Os dados cartográficos e de altimetria utilizados estão apresentados a seguir: o MDE é apresentado na Figura 8, o mapa de Uso e ocupação do solo, na Figura 9 e o Mapa Pedológico, na Figura 10.

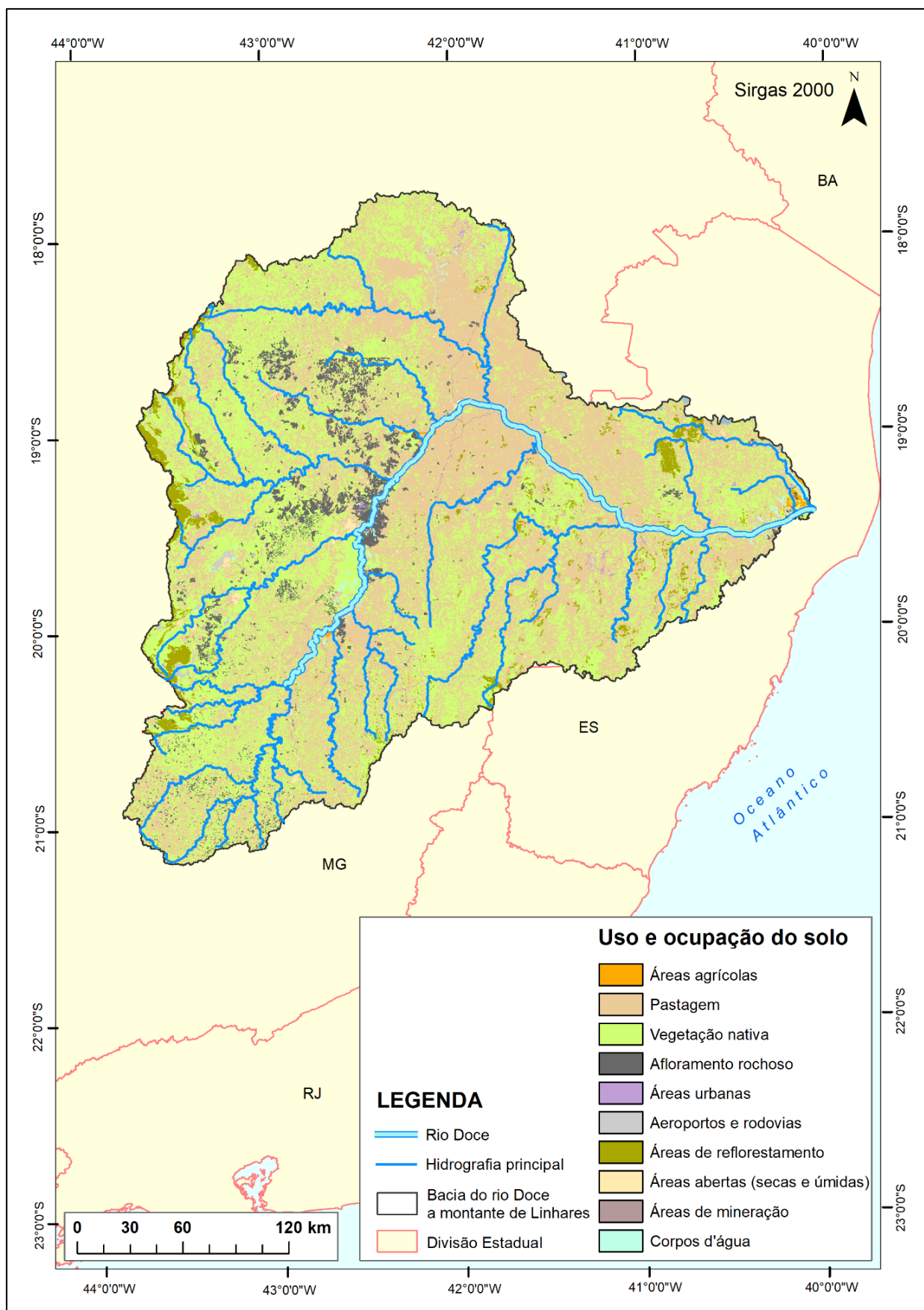


Figura 8: Modelo Digital de Elevação da Bacia do Rio Doce a montante de Linhares com resolução de 10 metros.



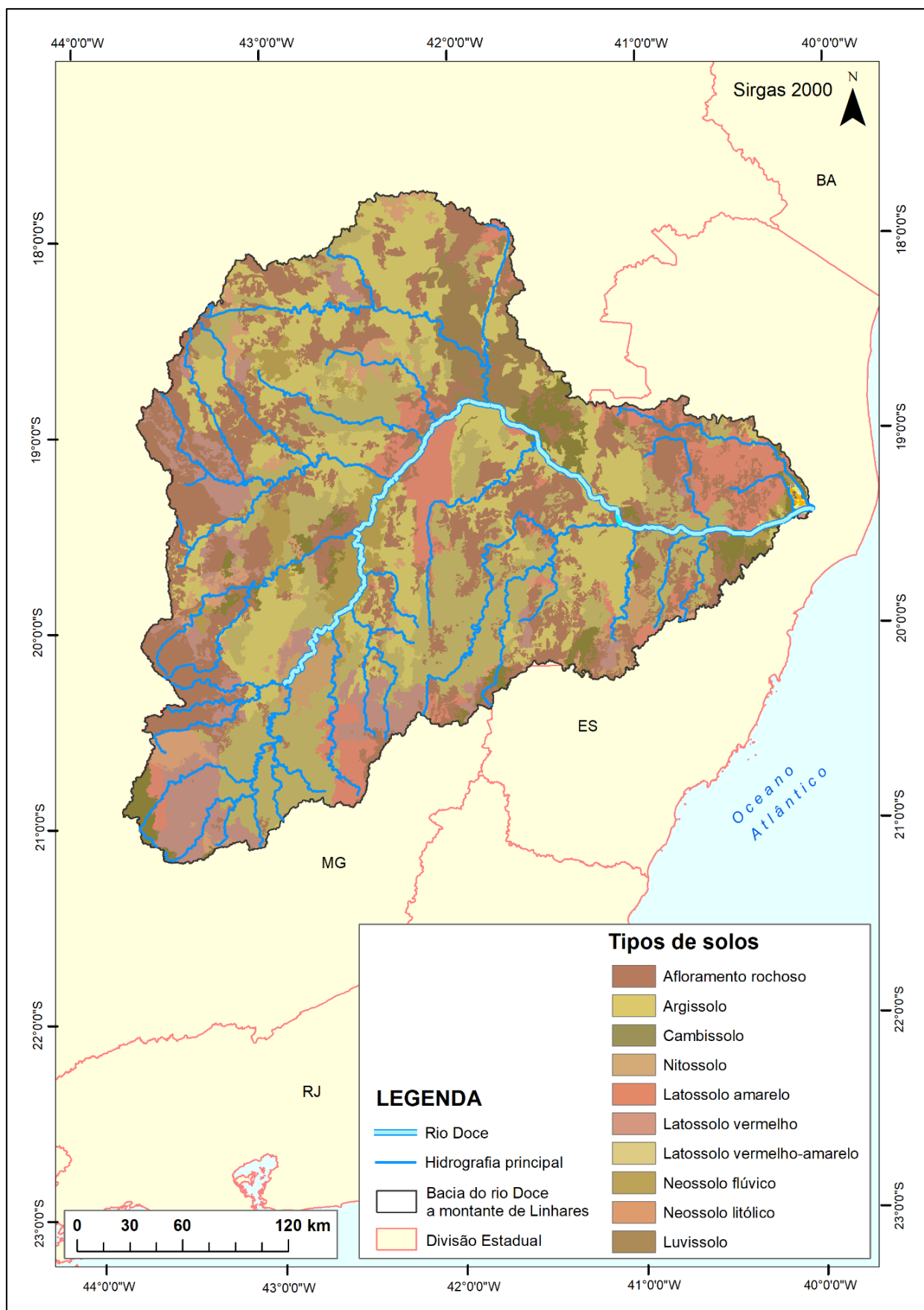
Fonte: ANA adaptado, 2018.

Figura 9: Mapa de Uso e Ocupação do solo da Bacia do Rio Doce a montante de Linhares, contendo 10 classes.



Fonte: ANA adaptado, 2018.

Figura 10: Mapa pedológico da Bacia do Rio Doce a montante de Linhares, contendo 10 classes de solos.



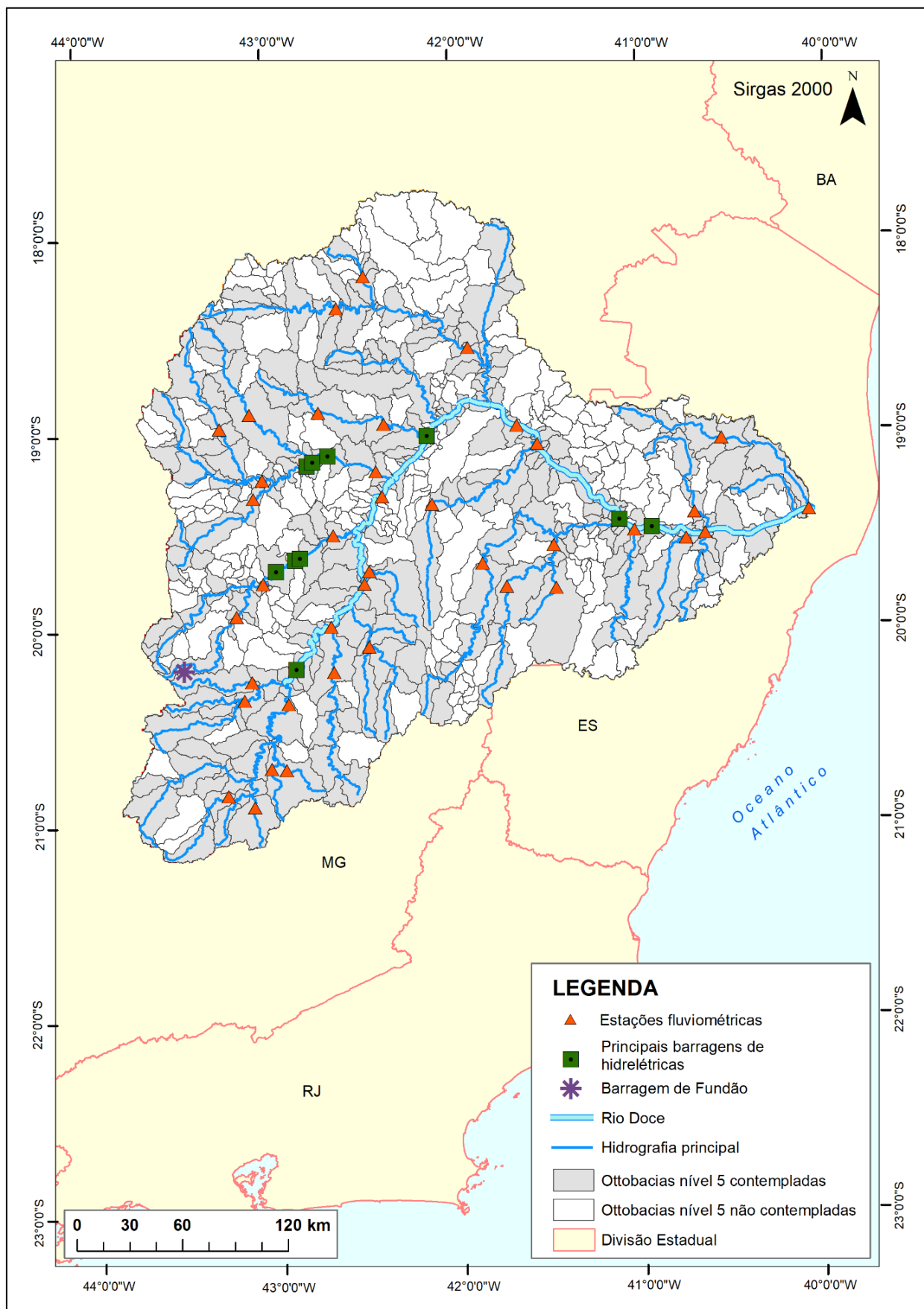
Fonte: IBGE adaptado, 2018.

O mapa pedológico original possui associações de solos incorporadas ao tipo de solo predominante. A partir do uso de imagens disponibilizadas pelo Google Earth, que possuem alta qualidade, foi possível que fossem identificados os limites de manchas com as associações dos solos com maior tendência ao escoamento superficial sem necessidade de ida a campo. As associações são: neossolo litólico + afloramento rochoso e neossolo litólico + gleissolo háplico. Nos mapas originais, essas associações estão incorporadas ao tipo de solo predominante e, com o uso das imagens, foi possível sua separação.

As estações fluviométricas foram também espacializadas em mapa de otobacias nível 5, para que fossem visualizadas as sub-bacias contempladas e as não contempladas pelo modelo aplicado (Figura 11).



Figura 11: Espacialização das estações fluviométricas na Bacia do Rio Doce a montante de Linhares e divisão da bacia em ottobacias nível 5.



O método de classificação e codificação de bacias hidrográficas pelo método do engenheiro brasileiro Otto Pfastetter é natural e hierárquico, iniciando-se pela identificação do rio principal, e posteriormente dos maiores rios de uma determinada bacia, descendo em nível de detalhe a cada etapa, até que se tenha codificado todos os trechos da rede hidrográfica (PFAFSTETTER, 1989). Cada trecho corresponde a uma área de drenagem individual, o que favorece o gerenciamento e o controle das ações do homem em áreas específicas, assim como as consequências que essas ações podem causar em todo o sistema hídrico. As otobacias são importantes ferramentas no planejamento e gestão dos recursos hídricos, bem como de fácil implementação computacional e boa interação com Sistemas de Informações Geográficas (ANA, 2012).

Embora a divisão hidrográfica pelo método Ottopfastetter seja amplamente utilizada no Brasil, não foi aplicada à modelagem, uma vez que é necessário que os exutórios das sub-bacias possuam dados para a calibração do modelo. Sendo assim, para a etapa de calibração do modelo, primeiramente foi inserido no SWAT o modelo digital de terreno da bacia e o shapefile com a posição das estações fluviométricas situadas em posições estratégicas e que possuem longa série de dados (1985 e 2017). As sub-bacias foram delimitadas de acordo com o modelo digital de terreno, tendo a posição das estações fluviométricas como ponto mais a jusante (considerando a área de drenagem efetivamente à jusante da estação).

A Figura 12 apresenta a espacialização das estações fluviométricas e as sub-bacias delimitadas a partir delas. A Tabela 8 contém os nomes dessas sub-bacias (conforme a numeração da Figura 12), enquanto a Tabela 9 apresenta características das estações fluviométricas utilizadas na etapa de calibração do modelo.

Figura 12: Posição das estações fluviométricas e sub-bacias a montante das mesmas.

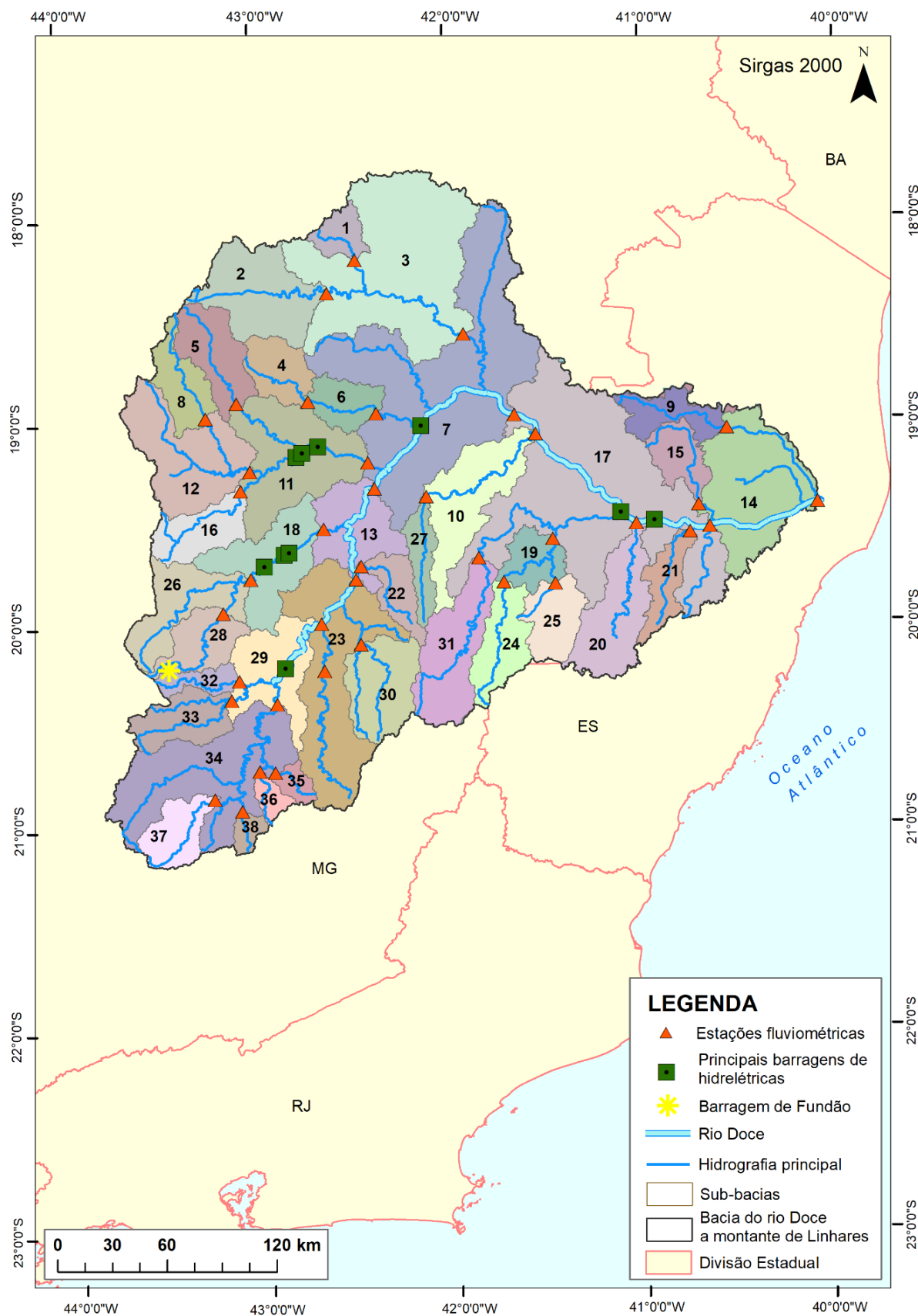


Tabela 8: Nomes das sub-bacias criadas a partir das estações fluviométricas distribuídas na Bacia do Rio Doce.

Número da sub-bacia no mapa (Figura 12)	Nome da sub-bacia
1	Bacia da estação fluviométrica Santa Maria do Suaçuí
2	Bacia da estação fluviométrica São Pedro do Suaçuí
3	Bacia da estação fluviométrica Vila Matias Montante
4	Bacia da estação fluviométrica Fazenda Corrente
5	Bacia da estação fluviométrica Senhora do Porto
6	Bacia da estação fluviométrica Porto Santa Rita
7	Bacia da estação fluviométrica Tumiritinga
8	Bacia da estação fluviométrica Dom Joaquim
9	Bacia da estação fluviométrica Barra de São Gabriel
10	Bacia da estação fluviométrica Barra do Cuieté Jusante
11	Bacia da estação fluviométrica Naque Velho
12	Bacia da estação fluviométrica Ferros
13	Bacia da estação fluviométrica Belo Oriente
14	Bacia da estação fluviométrica Linhares Cais do Porto
15	Bacia da estação fluviométrica Ponte do Pancas
16	Bacia da estação fluviométrica Fazenda Barraca
17	Bacia da estação fluviométrica Colatina
18	Bacia da estação fluviométrica Mario de Carvalho
19	Bacia da estação fluviométrica Assaraí Montante
20	Bacia da estação fluviométrica Baixo Guandu
21	Bacia da estação fluviométrica Jusante Córrego da Piaba
22	Bacia da estação fluviométrica Pingo D'Água
23	Bacia da estação fluviométrica Cachoeira dos Óculos Montante
24	Bacia da estação fluviométrica Ipanema
25	Bacia da estação fluviométrica Mutum
26	Bacia da estação fluviométrica Nova Era IV
27	Bacia da estação fluviométrica Dom Cavati
28	Bacia da estação fluviométrica Rio Piracicaba
29	Bacia da estação fluviométrica Fazenda Cachoeira D'Antas
30	Bacia da estação fluviométrica Instituto Florestal Raul Soares
31	Bacia da estação fluviométrica Santo Antônio do Manhuaçu
32	Bacia da estação fluviométrica Fazenda Ocidente
33	Bacia da estação fluviométrica Acaiaca Jusante
34	Bacia da estação fluviométrica Ponte Nova Jusante
35	Bacia da estação fluviométrica Seriquite
36	Bacia da estação fluviométrica Fazenda Varginha
37	Bacia da estação fluviométrica Braz Pires
38	Bacia da estação fluviométrica Senador Firmino



Tabela 9: Características das estações fluviométricas utilizadas na etapa de calibração do modelo SWAT.

Código	Estação	Resp./Operadora	Latitude	Longitude	Área Drenagem (km <sup>2</sup> )
56846000	Porto de Santa Rita	ANA/CPRM	-18,95	-42,36	1.965,0
56055000	Braz Pires	ANA/CPRM	-20,85	-43,24	1.089,0
56090000	Fazenda Varginha	ANA/CPRM	-20,71	-43,00	324,0
56110005	Ponte Nova Jusante	ANA/CPRM	-20,38	-42,90	6.132,0
56335001	Acaiaca Jusante	ANA/CPRM	-20,36	-43,14	1.371,0
56337000	Fazenda Ocidente	ANA/CPRM	-20,27	-43,10	531,0
56425000	Faz. Cachoeira D'Antas	ANA/CPRM	-19,99	-42,67	10.079,0
56510000	Inst. Flor. Raul Soares	ANA/CPRM	-20,10	-42,46	1.800,0
56539000	Cach. Óculos Montante	ANA/IGAM	-19,78	-42,48	15.836,0
56570000	Pingo D'Água	ANA/CPRM	-19,71	-42,45	814,0
56610000	Rio Piracicaba	ANA/CPRM	-19,93	-43,17	1.163,0
56659998	Nova Era IV	ANA/CPRM	-19,77	-43,03	3.060,0
56696000	Mário de Carvalho	ANA/CPRM	-19,52	-42,64	5.270,0
56719998	Belo Oriente	ANA/CPRM	-19,33	-42,38	24.200,0
56765000	Dom Joaquim	ANA/CPRM	-18,96	-43,24	972,0
56775000	Ferros	ANA/CPRM	-19,23	-43,02	4.058,0
56787000	Fazenda Barraca	ANA/CPRM	-19,33	-43,07	1.280,0
56800000	Senhora do Porto	ANA/CPRM	-18,89	-43,08	1.521,0
56825000	Naque Velho	ANA/CPRM	-19,19	-42,42	10.170,0
56845000	Fazenda Corrente	ANA/CPRM	-18,89	-42,71	1.064,0
56860000	São Pedro do Suaçuí	ANA/CPRM	-18,36	-42,61	2.610,0
56870000	Santa Maria do Suaçuí	ANA/CPRM	-18,20	-42,45	670,0
56891900	Vila Matias montante	ANA/CPRM	-18,57	-41,92	10.200,0
56920000	Tumiritinga	ANA/CPRM	-18,97	-41,64	55.425,0
56935000	Dom Cavati	ANA/CPRM	-19,37	-42,11	784,0
56940002	Barra do Cuieté Jus.	ANA/CPRM	-19,07	-41,54	3.250,0
56978000	Sto. Ant. do Manhauçu	ANA/CPRM	-19,68	-41,84	2.287,0
56988500	Ipanema	ANA/CPRM	-19,80	-41,71	1.420,0
56989001	Mutum	ANA/CPRM	-19,81	-41,44	1.187,0
56989400	Assaraí montante	ANA/CPRM	-19,59	-41,46	3.190,0
56998400	Barra de São Gabriel	ANA/CPRM	-19,04	-40,53	1.070,0
56992000	Baixo Guandu	ANA/CPRM	-19,52	-41,01	2.135,0
56994500	Colatina	ANA/CPRM	-19,53	-40,62	75.800,0
56995500	Ponte do Pancas	ANA/CPRM	-19,42	-40,69	919,0
56993551	Jusante Córrego da Piaba	ANA/CPRM	-19,56	-40,73	873,0
56075000	Porto Firme	ANA/CPRM	-20,67	-43,09	4.251,0
56085000	Seriquite	ANA/CPRM	-20,72	-42,92	342,0
56065000	Senador Firmino	ANA/CPRM	-20,91	-43,10	291,0

Em seguida, foram inseridos no SWAT os mapas de solo e de uso e ocupação do solo da bacia do rio Doce. Para cada classe de solo e de uso e ocupação do solo, o modelo associa um conjunto de parâmetros e variáveis de entrada que são retirados de seu banco de dados ou fornecidos pelo modelador. Dados de solo da bacia foram retirados de levantamentos exploratórios de reconhecimento de solos, tanto para a porção mineira quanto para a porção espírito-santense (PANOSO, 1978; JACOMINE et al., 1979; PANOSO, 1980; MOTTA et al., 2004; IBGE, 2007). Já os dados das classes de uso do solo foram retirados do banco de dados existente no modelo.

Com base nas informações cartográficas, o modelo dividiu a bacia em 1705 Unidades de Resposta Hidrológica (URH), que são áreas de comportamento hidrológico semelhantes, com apenas uma pedologia correspondente a uma classe de uso e ocupação do solo.

Na etapa seguinte foram inseridos os dados climatológicos no modelo. O SWAT utiliza os seguintes dados: precipitação, temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento. A precipitação utilizada é proveniente de dados reais medidos nas estações pluviométricas de responsabilidade da ANA e operadas pela CPRM (Tabela 10), enquanto, para as demais variáveis, foram utilizados dados de um banco de dados mundial denominado Centros Nacionais de Previsão Ambiental (*The National Centers for Environmental Prediction – NCEP*) pela Reanálise de Sistemas de Previsão Climática (*Climate Forecast System Reanalysis – CFSR*), o qual foi concluído para um período de 36 anos, que compreende de 1979 a 2014. A CFSR foi projetada e executada como uma superfície global de alta resolução para fornecer a melhor estimativa de dados climáticos durante esse período. Este site permite que seja feito download de dados climatológicos no formato de arquivo SWAT para um determinado local do globo terrestre e um período de tempo. Com relação à pluviosidade, para cada sub bacia, o modelo utiliza dados da estação pluviométrica localizada mais próxima ao seu centroide. Foram adicionados ao modelo os dados das 90 estações pluviométricas apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10: Estações pluviométricas de longa série histórica utilizadas na modelagem hidrológica.

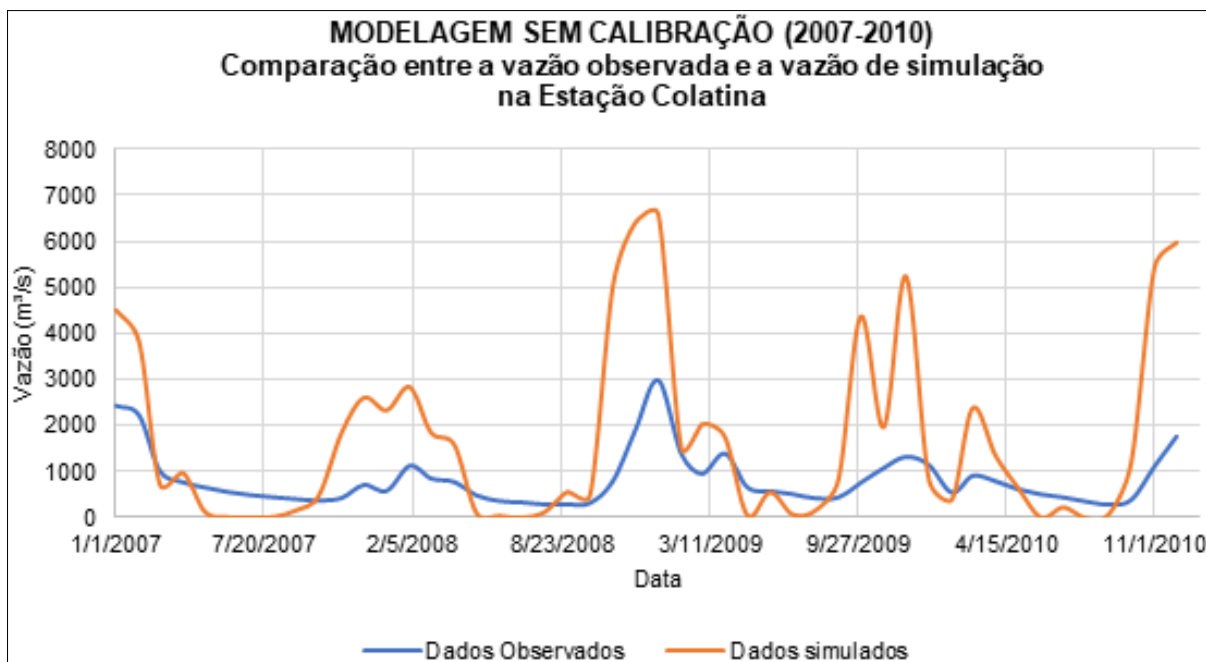
Resp./Operadora	Código	Estação	Latitude	Longitude
ANA/CPRM	2042010	Abre Campo	-20,69056	-43,29944
ANA/CPRM	2043009	Acaiaca Jusante	-20,67028	-43,08806
ANA/CPRM	2041023	Afonso Cláudio montante	-20,36250	-43,14389
ANA/CPRM	1742019	Água Boa	-20,39000	-43,18028
ANA/CPRM	1840000	Águia Branca	-17,84556	-42,07556
ANA/CPRM	1941012	Alto Rio Novo	-17,99222	-42,39389
ANA/CPRM	1941006	Assaraí montante	-18,57472	-41,91778
ANA/CPRM	1941003	Baixo Guandu	-18,23861	-41,74861
ANA/CPRM	1940016	Barra de São Gabriel	-18,88306	-41,95028
ANA/CPRM	1941005	Barra do Cuieté jusante	-18,77694	-41,48278
ANA/CPRM	1839006	Barra Nova	-18,55278	-42,76417
ANA/CPRM	1942030	Belo Oriente	-19,31639	-42,39611
ANA/CPRM	2042014	Bicuíba	-18,59278	-43,41250
ANA/CPRM	1942002	Bom Jesus do Galho	-18,61194	-42,27861
ANA/CPRM	2043026	Braz Pires	-18,97639	-41,64028

Resp./Operadora	Código	Estação	Latitude	Longitude
ANA/CPRM	1942031	Cach. dos Óculos montante	-19,76944	-42,47694
ANA/CPRM	1943010	Caeté	-18,36306	-42,60222
ANA/CPRM	1940020	Caldeirão	-18,27972	-43,00056
ANA/CPRM	1841003	Campanário	-18,77222	-42,93111
ANA/CPRM	1742014	Capelinha	-18,20111	-42,45528
ANA/CPRM	1940005	Cavalinho	-19,79889	-41,70611
ANA/CPRM	1840010	Cedrolândia	-19,06167	-41,53278
ANA/CPRM	1841018	Central de Minas	-19,67833	-41,83611
ANA/CPRM	1940006	Colatina - Corpo de Bombeiros	-19,16167	-41,86222
ANA/CPRM	2043059	Colégio Caraça	-19,01667	-43,44417
ANA/CPRM	1943002	Conc. do Mato Dentro	-19,44028	-43,11861
ANA/CPRM	1842005	Coroaci	-19,59472	-41,45806
ANA/CPRM	2143003	Desterro do Melo	-19,21750	-43,37417
ANA/CPRM	1841019	Divino de Laranjeiras	-19,99889	-42,34750
ANA/CPRM	1942008	Dom Cavati	-19,25028	-43,01444
ANA/CPRM	2041008	Dores do Manhumirim	-19,34306	-41,24611
ANA/CPRM	2043056	Fazenda Água Limpa jusante	-19,92278	-43,17778
ANA/CPRM	2042031	Fazenda Cachoeira D'Antas	-19,94528	-43,40111
ANA/CPRM	2043027	Fazenda Ocidente	-19,81111	-41,43778
ANA/CPRM	2043011	Fazenda Paraíso	-19,37361	-42,10500
ANA/CPRM	2142004	Fazenda Umbaúbas	-19,49250	-41,16167
ANA/CPRM	2041048	Fazenda Vargem Alegre	-19,83361	-42,31778
ANA/CPRM	1943003	Ferros	-19,52472	-42,64417
ANA/CPRM	2040008	Garrafão (DNOS)	-19,88083	-43,36750
ANA/CPRM	1841020	Governador Valadares	-20,10806	-41,72833
ANA/CPRM	1842007	Guanhães	-20,10361	-42,44000
ANA/CPRM	1941009	Ibituba	-20,29889	-42,47806
ANA/CPRM	1941000	Ipanema	-20,21472	-42,65222
ANA/CPRM	1940012	Itaimbé	-20,01139	-42,67417
ANA/CPRM	1941018	Itanhomi	-20,09694	-43,48806
ANA/CPRM	1940000	Itarana	-20,68250	-42,80667
ANA/CPRM	1940022	Jacupemba	-20,38472	-42,90278
ANA/CPRM	1943024	José de Melo	-20,28556	-43,09889
ANA/CPRM	1741006	Ladainha	-20,84750	-43,24194
ANA/CPRM	2043002	Lagoa Grande	-20,51667	-43,01667
ANA/CPRM	1941008	Laranja da Terra	-21,14917	-43,52000
ANA/CPRM	1742017	Malacacheta	-20,27722	-42,32556
ANA/CPRM	1841009	Mantenópolis	-20,17056	-41,96111
ANA/CPRM	1942029	Mario de Carvalho	-19,90111	-41,05806
ANA/CPRM	2042017	Matipó	-20,07861	-41,12139
ANA/CPRM	1943025	Morro do Pilar	-18,98556	-40,74611
ANA/CPRM	1941019	Mutum	-19,69111	-41,02000
ANA/CPRM	1942032	Naque Velho	-19,18861	-42,42278

Resp./Operadora	Código	Estação	Latitude	Longitude
ANA/CPRM	1940013	Novo Brasil	-19,52361	-41,01417
ANA/CPRM	1940009	Pancas	-19,53083	-40,62306
ANA/CPRM	2142002	Patrocínio do Muriaé	-19,23750	-40,59139
ANA/CPRM	2043010	Piranga	-19,69222	-40,39806
ANA/CPRM	2042018	Ponte Nova jusante	-19,66361	-40,83528
ANA/CPRM	2043014	Porto Firme	-19,87444	-40,87444
ANA/CPRM	2042008	Raul Soares montante	-19,27417	-40,32083
ANA/CPRM	1941004	Resplendor jusante	-19,05778	-40,51639
ANA/CPRM	1940023	Rio Bananal	-19,22028	-40,85333
ANA/CPRM	2042011	Rio Casca	-19,05917	-41,02750
ANA/CPRM	1943001	Rio Piracicaba	-19,80528	-40,67889
ANA/CPRM	1843012	Rio Vermelho	-19,95500	-40,74167
ANA/CPRM	1943007	Santa Barbara	-17,62944	-41,73722
ANA/CPRM	2041017	Santa Cruz Caparaó	-17,69167	-42,52611
ANA/CPRM	1943008	Santa Maria do Itabira	-18,76306	-41,30833
ANA/CPRM	2040007	Santa Maria de Jetibá	-19,90278	-43,66639
ANA/CPRM	1842008	Santa Maria do Suaçuí	-19,68972	-43,58556
ANA/CPRM	1941011	Santo Antônio do Manhuaçu	-19,21889	-43,58806
ANA/CPRM	1940001	São João de Petrópolis	-20,76944	-42,30111
ANA/CPRM	1842020	São João Evangelista	-20,17917	-43,94278
ANA/CPRM	2042016	São Miguel do Anta	-20,30306	-43,61583
ANA/CPRM	1842004	São Pedro do Suaçuí	-21,05028	-42,51556
ANA/CPRM	1941010	São Sebastião da Encruzilhada	-21,15000	-42,20111
ANA/CPRM	1843011	Serro	-21,19278	-43,61389
ANA/CPRM	1841011	Tumiritinga	-19,58861	-40,19806
ANA/CPRM	2043025	Usina da Brecha	-20,32278	-41,70417
ANA/CPRM	1943027	Usina Peti	-18,83889	-41,11028
ANA/CPRM	1940010	Valsugana Velha montante	-18,80972	-40,69056
ANA/IGAM	2143007	Vargem do Engenho	-20,14333	-40,97528
ANA/CPRM	1943035	Vau da Lagoa	-20,02806	-40,74417
ANA/CPRM	1942006	Vermelho Velho	-19,95333	-40,55250
ANA/CPRM	1841001	Vila Matias montante	-18,95028	-39,76444

O modelo foi rodado no período de 2004 a 2013 utilizando os dados inseridos no mesmo nas etapas discutidas nos itens anteriores. A Figura 13 apresenta os hidrogramas simulado e medido na estação fluviométrica Colatina, para o período 2007-2010.

Figura 13: Resultado da simulação hidrológica na etapa anterior à calibração.



Conforme pode ser observado, os resultados da modelagem inicial não se mostraram satisfatórios, havendo, dessa forma, necessidade de se proceder a calibração do modelo.

A calibração de um modelo é realizada com a finalidade de fazer com que valores simulados se aproximem ao máximo aos valores medidos, utilizando coeficientes estatísticos como o Nash-Sutcliffe (NS) e o Percentual bias (PBIAS) para comparação. Para a bacia do rio Doce, valores de vazão diária simulados nos exutórios das sub-bacias foram comparados com os valores de vazão medidos nas estações fluviométricas durante o processo de calibração.

Para a calibração do SWAT na bacia do rio Doce, foi utilizado o software SWAT-CUP (ABBASPOUR et al., 2005), tendo sido escolhido o algoritmo de parametrização Sufi-2. Este algoritmo vem sendo o mais utilizado em modelagem de bacias hidrográficas por todo o globo, principalmente devido a sua facilidade de aplicação. Além disso, o software conta com a lista de parâmetros utilizados dentro do modelo SWAT e seus respectivos valores mínimos e máximos aceitáveis. O Quadro 1 apresenta os parâmetros que foram calibrados com o uso do SWAT CUP. Estes foram escolhidos a partir de revisão de literatura e do estudo detalhado de cada um dos parâmetros. Para a calibração, foram utilizados dados de 2007 a 2010 (4 anos) e o de validação de 2011 a 2013 (3 anos).

Quadro 1: Parâmetros utilizados na calibração do modelo.

Parâmetro	Descrição
ALPHA_BF	Fator de fluxo de base ou constante de recessão (dias)
CANMX	Quantidade de água interceptada (mm)
SURLAG	Coefficiente de retardamento do escoamento superficial direto
GW_DELAY	Intervalo de tempo para recarga do aquífero (dias)
GW_REVAP	Coefficiente de ascensão de água à zona de saturação
GWQMN	Nível limite de água no aquífero livre para ocorrer o fluxo de retorno (mm)
CN2	Curva número inicial para condição de umidade do solo II
REVAPMN	Profund. de limiar de água no lençol freático para que ocorra reevaporação (mm)
SLSUBBSN	Comprimento médio da declividade (m)
RCHRG_DP	Coefficiente de percolação da água para o aquífero profundo (dias)
SOL_K	Condutividade hidráulica do solo (mm/h)
SOL_AWC	Armazenamento de água no solo (mm H <sub>2</sub> O/mm solo)
SOL_Z	Profundidade da superfície do solo ao fundo da camada (mm)
EPCO	Fator de compensação de captação de plantas
ESCO	Coefficiente de compensação de evaporação de água no solo
CH_K2	Condutividade efetiva do canal (mm/h)
CH_N2	Coefficiente de Manning para o canal principal
BIOMIX	Eficiência da mistura biológica

Foram realizadas diversas simulações com mais de 1000 iterações cada, quando os parâmetros foram sendo ajustados até que a estatística Nash-Sutcliffe fosse considerada satisfatória. Os parâmetros ajustados e os modos de ajuste encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11: Parâmetros calibrados.

Parâmetro	Valor calibrado	Tipo de ajuste
ALPHA_BF	0.000273	substituição
CANMX	4.2242	adição
SURLAG	-1.848833	adição
GW_DELAY	99.985001	adição
GW_REVAP	-0.009426	adição
GWQMN	678.208008	adição
CN2	-0.30706	multiplicação
REVAPMN	23.533335	adição
SLSUBBSN	-0.27217	multiplicação
RCHRG_DP	0.02162	multiplicação
SOL_K	-4.76673	multiplicação
SOL_AWC	-0.022075	multiplicação
SOL_Z	0.41853	multiplicação
EPCO	0.3741	adição
ESCO	0.020701	adição



Parâmetro	Valor calibrado	Tipo de ajuste
CH_K2	5.591664	adição
CH_N2	0.168383	adição
BIOMIX	0.16243	multiplicação

O coeficiente escolhido para análise da calibração e validação do modelo foi o Nash-Sutcliffe (NS), que é o indicador estatístico de uso mais comum entre os usuários do SWAT. Para um ajuste perfeito entre os dados simulados e observados, o valor de NS deve ser o mais próximo possível de 1, sendo que resultados menores que zero significam que o uso da média dos dados observados é melhor que a simulação feita. Para o período de calibração o NS foi de 0,75 e para o período de validação foi de 0,43 e as comparações entre os dados observados e os dados simulados são mostrados na Figura 14 e na Figura 15.

Figura 14: Gráfico calibração do modelo (vazão simulada vs vazão observada ao longo do período).

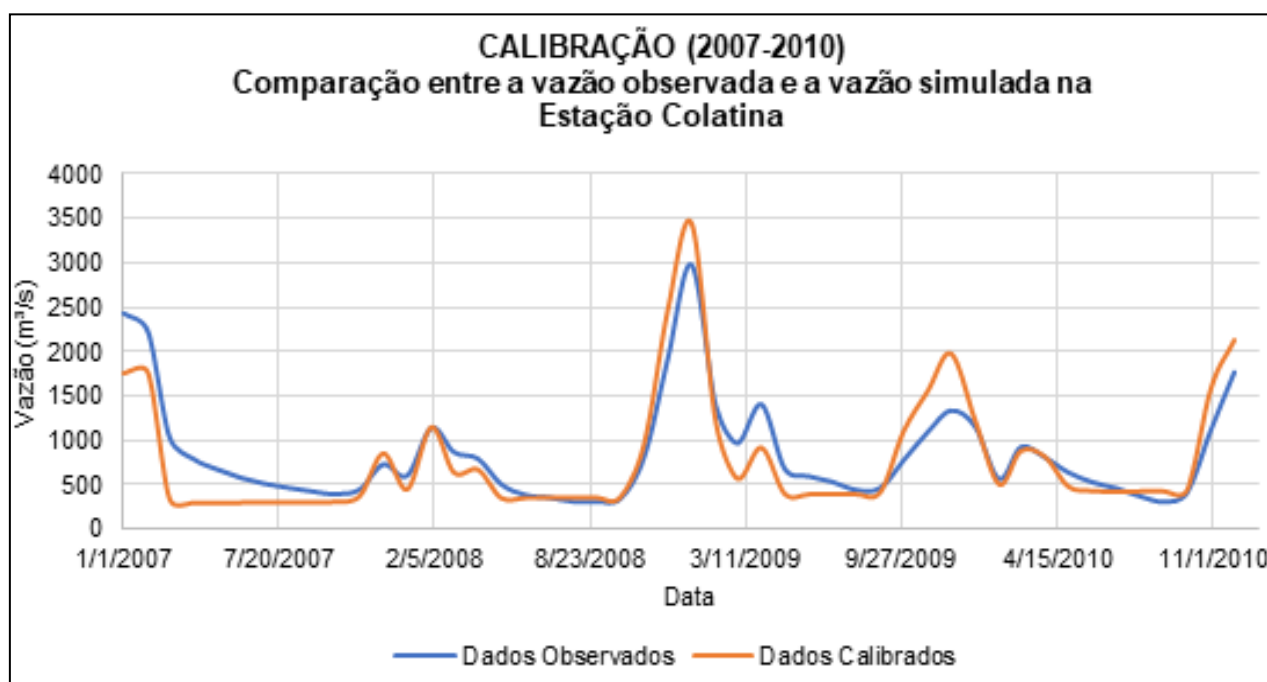
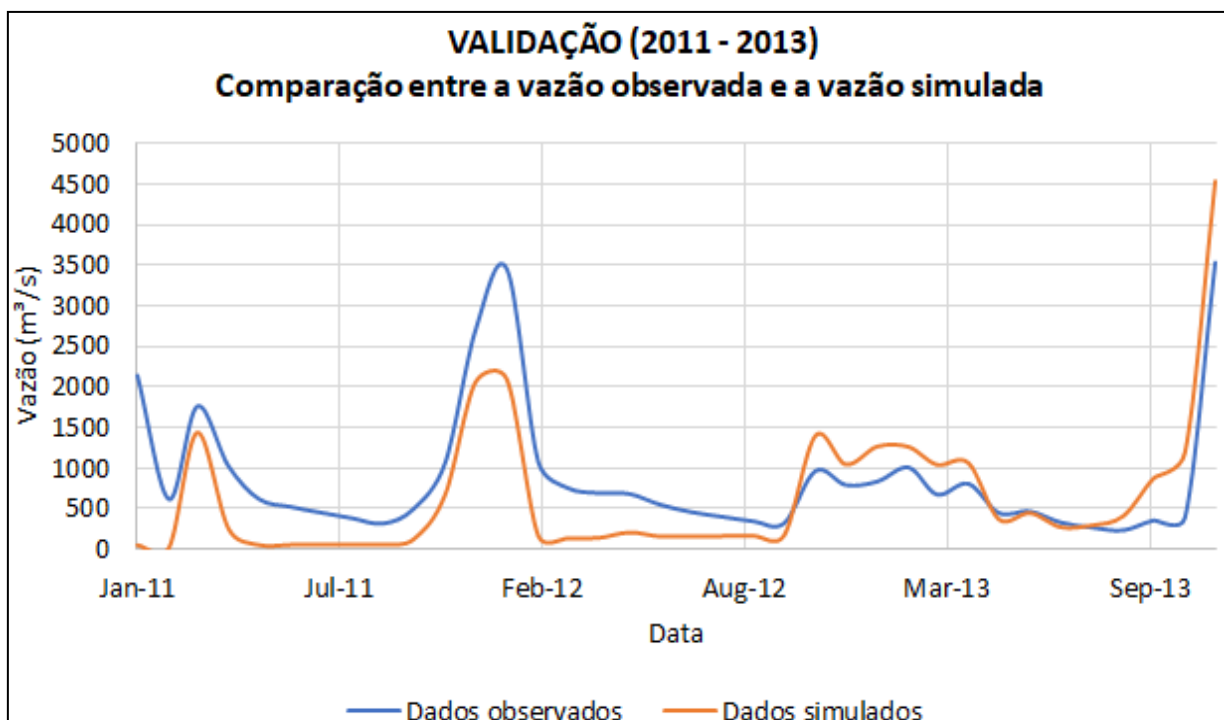


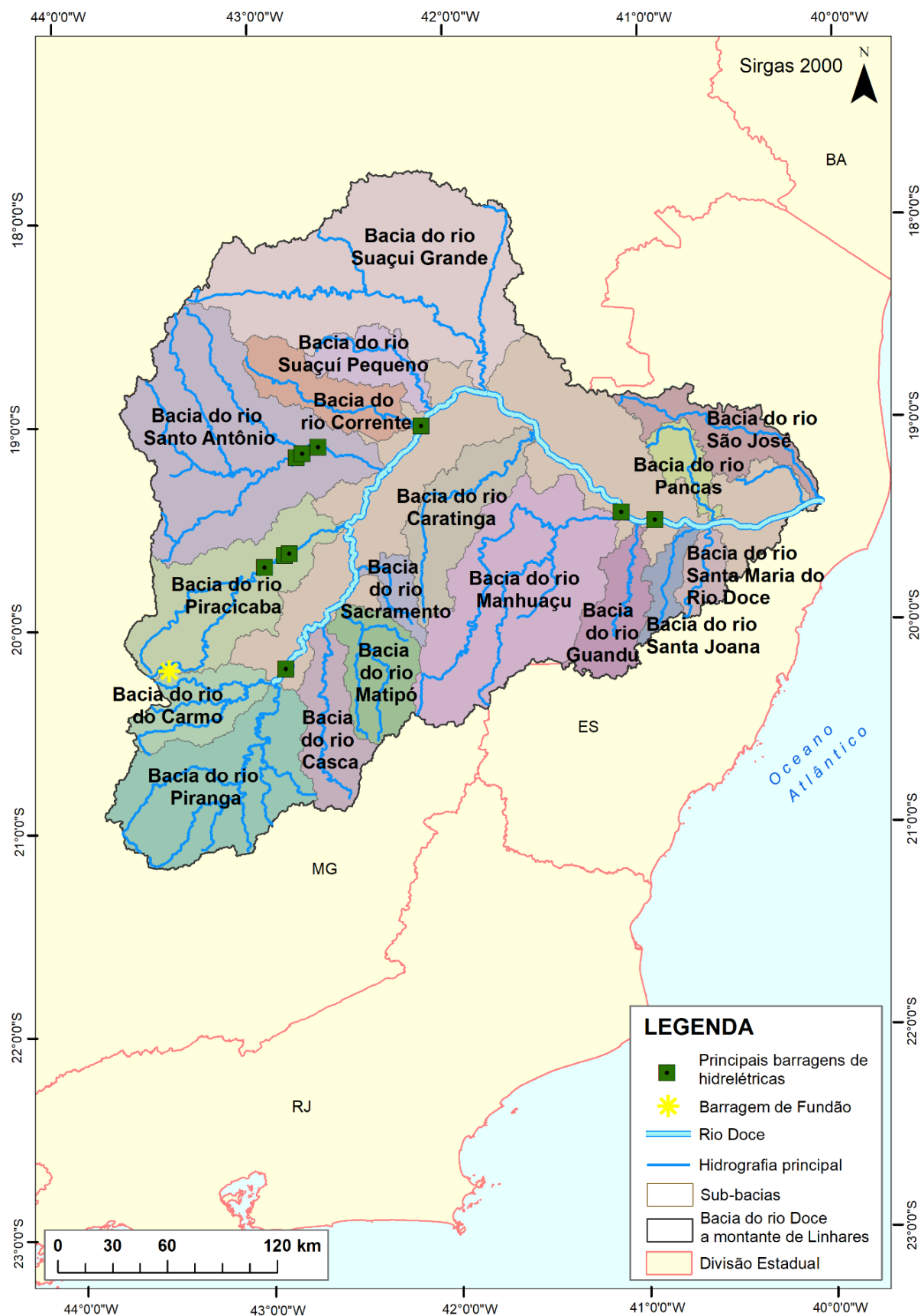
Figura 15: Gráfico validação do modelo (vazão simulada vs vazão observada ao longo do período).



Após a calibração e a validação do modelo a bacia foi dividida em regiões com base na hidrografia principal (Figura 16), a fim de se caracterizar a quantidade de água que chega ao rio Doce advinda das suas diferentes sub-bacias formadoras.



Figura 16: Divisão da bacia do rio Doce para análise do aporte de água por região.

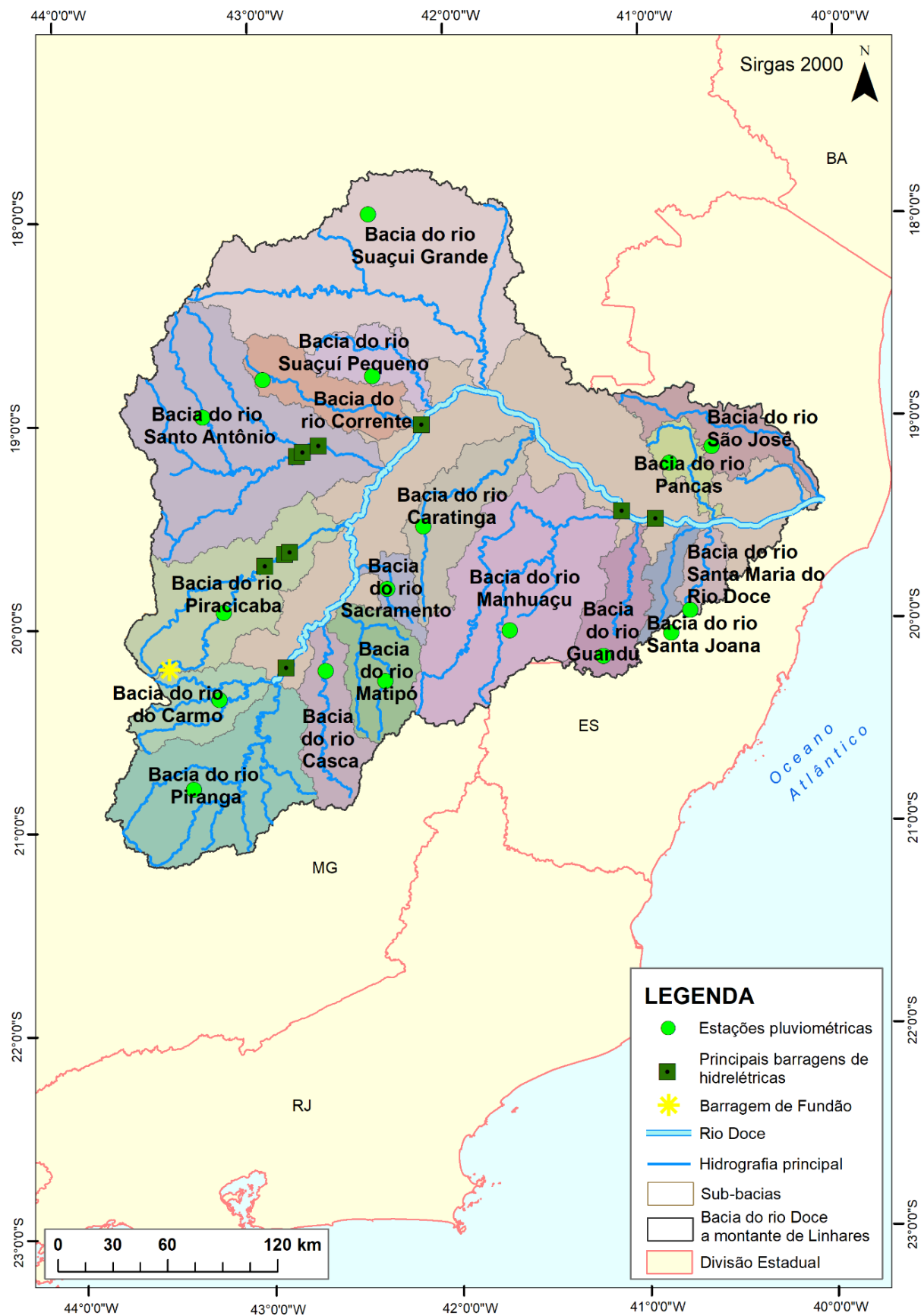


Para este processo, foi necessária uma simulação com dados atuais, visando entender hidrológicamente a bacia do rio Doce durante o período de outubro de 2018 a março de 2020. Para tanto, o modelo requer dados pluviométricos para o mesmo período. Estes dados foram buscados em bases que possuem estações telemétricas (CEMADEN, Sistema HIDRO – Telemetria da ANA e INMET), cujos dados são disponibilizados na internet diariamente ou em tempo real, e foram sendo compilados para alimentar o modelo SWAT durante as simulações hidrológicas mais recentes. Essas bases, porém, não possuem dados consistentes e podem conter falhas. Sendo assim, foi escolhida uma estação de dado atual para cada região hidrográfica, desde que possuíssem o menor número de dias com falha ao longo do período analisado (setembro de 2018 a agosto de 2019). As estações estão detalhadas na Tabela 12 e especializadas na Figura 17.

Tabela 12: Estações telemétricas utilizadas para análise pluviométrica 7 dias antes de cada amostragem.

Bacia do rio	Estação telemétrica e código
Suaçuí Grande MG	Água Boa - Centro (310060901A)
Suaçuí Pequeno MG	Sardoá – Centro (316550301A)
Corrente MG	Guanhães (A533)
Caratinga MG	PCH Inhapim Jusante (1942062)
Santo Antônio MG	Dom Joaquim – Centro (312260301A)
São José ES	São Domingos do Norte (320465801A)
Pancas ES	Pancas (320400501A)
Manhuaçu MG	Chalé – Centro (311600101A)
Piracicaba MG	Piracicaba Centro (315570201A)
Santa Maria do Rio Doce ES	Santa Teresa - Alto Caldeirão (320460902A)
Guandu ES	Afonso Cláudio – Piracema (320010208A)
Santa Joana ES	Alto Rio Possmoser (320455901A)
Sacramento MG	GCH Bom Jesus do Galho (1942078)
Matipó MG	PCH Tulio Cordeiro de Mello Montante 2 (2042053)
Casca MG	Rio Casca Centro (315490301A)
Carmo MG	PCH Furquim Jusante (2043084)
Piranga MG	Senhora de Oliveira – Centro (316600601A)

Figura 17: Espacialização das estações telemétricas ao longo da bacia do rio Doce.



Para a análise da influência do reservatório da UHE Aimorés (Eliezer Batista), foram utilizados dados de vazões medidas da Agência Nacional de Águas. A estação base foi a UHE Aimorés montante (56919500). Porém, quando a série fluviométrica não dispunha de informações para as datas consideradas foram utilizadas informações relativas à estação Tumiritinga (56919500), a mais próxima a montante do reservatório apresentando registros (outubro de 2018 e de janeiro a março de 2019). A análise foi dividida em duas etapas, a primeira durante os 7 dias anteriores às amostragens e a segunda durante a realização de cada campanha. As duas estações estão localizadas a montante do início do lago da citada usina, bem perto uma da outra.

A partir das vazões observadas existentes, foi calculado o tempo de detenção (Equação 1) das águas no lago nos períodos que antecederam as campanhas para amostragens de água e sedimentos.

Equação 1: Cálculo do tempo de detenção teórico em reservatórios

$$t_d = 86400 \frac{V}{Q}$$

Onde  $t_d$  é o tempo de detenção em dia;  $V$  é o volume útil do reservatório em  $m^3$  e  $Q$  é a descarga líquida (vazão) em  $m^3/s$ .

Por sua vez, a avaliação do transporte e produção de sedimentos para a bacia do Rio Doce foi realizada com o emprego do modelo hidrossedimentológico MGB-SED, o qual consiste no acoplamento de um modelo de erosão e transporte de sedimentos no canal de drenagem (MGB-SED) desenvolvido por Buarque (2015) e posteriormente aperfeiçoado por Fagundes et al. (2020) e Föeger et al. (2022), ao Modelo de Grandes Bacias (MGB) originalmente desenvolvido por Collischonn e Tucci (2001). O modelo MGB, desenvolvido para simular o processo de transformação de chuva em vazão em grandes bacias hidrográficas (áreas de drenagem maiores que 1000 quilômetros quadradas), é um modelo distribuído e conceitual de simulações diárias, ou seja, são utilizadas equações físicas e conceituais para simular o ciclo hidrológico na superfície terrestre (COLLISCHONN et al., 2007; PAIVA; COLLISCHONN; TUCCI, 2011). Portanto, o MGB-SED possui um módulo hidrológico e um módulo de sedimentos, de forma que o modelo hidrológico/hidráulico alimenta o módulo de sedimento com informações (ex: vazões, volumes de escoamentos superfícies, entre outros) necessárias para as estimativas da geração de sedimentos na bacia e o transporte de sedimentos nos rios.

No modelo MGB-SED, baseado no modelo MGB, existem três níveis de divisão espacial da bacia partir de dados topográficos de um Modelo Digital de Elevação (MDE): a própria bacia; as sub-bacias; e as minibacias. A bacia é a área total que será representada no modelo hidrológico. As minibacias são as menores unidades em que a bacia é dividida (discretizada), dentro das quais ocorrem os processos de propagação fluvial, onde os processos de translação e atenuação de ondas de cheias são relevantes na compreensão das dinâmicas da bacia. As sub-bacias são unidades maiores do que as minibacias e menores do que a bacia, que podem ser utilizadas para a definição de valores dos parâmetros do modelo de forma que cada uma possa ter valores distintos dos parâmetros e, portanto, melhor

representando a variabilidade espacial das características da bacia e suas respostas nos fluxos de sedimentos.

Utilizando-se dos resultados da simulação hidrológica e hidráulica realizada pelo MGB, o modelo MGB-SED foi desenvolvido para representar a geração, o transporte e a redistribuição de sedimentos em grandes bacias hidrográficas, incluindo a troca lateral de sedimentos entre os canais e suas respectivas planícies de inundação (BUARQUE, 2015). No MGB o escoamento superficial é gerado de acordo com a abordagem Dunneana, e a evapotranspiração é calculada pela equação de Penman-Monteith. A propagação do escoamento na rede de drenagem pode ser feita pelo método de Muskingum-Cunge, pelo modelo hidrodinâmico Inercial, adotado no presente estudo (FÖEGER et al., 2022). O MGB-SED é composto de três módulos: bacia, rio e planície.

No módulo de bacia é estimada a geração de sedimentos em cada minibacia (área de contribuição de cada trecho de drenagem), por meio da equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE) (WILLIAMS, 1975), representada pela Equação 2.

Equação 2: Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE)

$$SED_{i,j}^k = \alpha * (Dsup_{i,j}^k * qpico_{i,j}^k * Ap_{i,j}^k)^\beta * K_j * C_j * P_j * LS_{i,j}^K * FG_j$$

onde i e j são índices que indicam as minibacias e a URH, k o pixel ao qual a equação está sendo aplicada. Na equação, SED [t] é a carga de sedimentos resultante da erosão do solo,  $\alpha$  e  $\beta$  são coeficientes de ajuste,  $Q_{sup}$  [mm/ha] é o volume de escoamento superficial, qpico [m³/s] é a taxa de pico do escoamento superficial, Ap [ha] é a área superficial do pixel, K [0,013.t.m².h/m³.t.cm] é o fator de erodibilidade do solo, C [-] é o fator de cobertura e manejo do solo, P [-] é o fator de práticas conservacionistas, LS [-] é o fator topográfico,  $FG_j$  é o fator de rochas. O volume de sedimentos gerado pela MUSLE é dividido em três classes de partículas de acordo com o percentual delas existentes no solo: silte, argila e areia.

O modelo utiliza o conceito de minibacias, para representação das características espaciais das bacias, as quais, por sua vez, são subdivididas em unidades de resposta hidrológica (regiões hidrológicamente homogêneas definidas a partir da combinação de mapas de tipo e de uso do solo), onde são realizadas as propagações de volumes de sedimentos gerados por meio de reservatórios lineares combinados a um coeficiente de retardo, uma vez que nem todo sedimento produzido alcança instantaneamente os cursos d'água, conforme apresentado pela Equação 3 (BUARQUE, 2015).

Equação 3: Coeficiente de retardo do reservatório superficial

$$QS_{i,j}^t = \frac{1}{TKS_i} * VSED_{i,j}^t$$

onde QS [t/s] é a descarga sólida total,  $VSED_{i,j}$  [t] é o volume no reservatório de sedimentos da URH j da minibacia i em questão, TKS [s] é o tempo de retardo do reservatório superficial.

No módulo rios, o transporte de sedimentos em suspensão ao longo dos canais é realizado utilizando equação de transporte unidimensional sem o termo de difusão para partículas de silte e argila. Para a

areia é utilizada a equação da continuidade de Exner, já que essas partículas são transportadas como carga de fundo, sofrendo processos de erosão e deposição no canal, que são calculadas em função da capacidade de transporte do escoamento conforme a equação de YANG (1984). No módulo de planícies, a troca lateral de sedimentos em suspensão entre os rios e suas planícies de inundação é considerada, visto que pode existir a deposição dessas frações (silte e argila). Além disso a presença do módulo de planícies permite o amortecimento dos picos de concentrações de sedimentos e o retardo da propagação no canal (BUARQUE, 2015). O MGB-SED permite ainda, considerar e avaliar a influência de reservatórios na propagação das vazões em seu interior e seus efeitos sobre o transporte de sedimentos. A aplicação do modelo hidrossedimentológico MGB-SED na bacia do Rio Doce envolveu as seguintes etapas:

1. Preparação dos dados de entrada do MGB-SED;
2. Calibração e validação do modelo hidrológico;
3. Calibração e validação do módulo de sedimentos no período pré-rompimento;
4. Simulação de sedimentos para o período do pós-rompimento.

Em relação aos dados de entrada, Föeger et al. (2022) argumentam que o MGB-SED necessita de poucos dados para simulação, sendo essa uma das suas principais vantagens. Os dados necessários para aplicação do MGB-SED estão elencados abaixo e os métodos de obtenção foram detalhados na sequência:

- Discretização da bacia hidrográfica e obtenção de dados topográficos;
- Definição das Unidades de Resposta Hidrológica;
- Dados hidrológicos e climáticos;
- Parâmetros da vegetação;
- Parâmetros da MUSLE;

A discretização da bacia do Rio Doce foi realizada por meio da manipulação do MDE, onde foi empregado o complemento *IPH-Hydro Tools* (SIQUEIRA et al., 2016). Foi adotado o MDE disponibilizado pelo programa Copernicus DEM - *Global and European Digital Elevation Model* (COP-DEM) (ESA, 2023). Entre as versões do COP-DEM disponíveis foi adotado o de melhor resolução espacial (30 metros). Convém destacar que embora um MDE de alta resolução seja valioso para análises detalhadas, sua aplicação em toda a bacia do Rio Doce é inviável devido a restrições computacionais para seu processamento e disponibilidade de dados que incorpore não apenas a totalidade da bacia do Rio Doce, mas áreas próximas a ela. Além disso, diversos estudos realizados na bacia obtiveram bons resultados com essa resolução ou até menor (BARRETO, 2023; FAGUNDES, 2018a; PAIVA, et al., 2022). Nesse contexto, os principais dados espaciais extraídos referem-se à delimitação da bacia, segmentação da rede de drenagem, definição das minibacias e sub-bacias.

Considerando que a bacia do Rio Doce é costeira e apresenta baixas declividades nas regiões próximas a foz, foi necessário realizar o procedimento de recondicionamento do MDE devido à dificuldade de geração automática da rede de drenagem em áreas planas. Para o recondicionamento, foi adotada a hidrografia obtida a partir do Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas referente ao ano de 2017,



que contém apenas os cursos d'água com área maior ou igual a 5 km<sup>2</sup> disponibilizada pela ANA (2018). O procedimento foi executado por meio da ferramenta *DEM reconditioning* disponível no ArcHydroTools 3.0, complemento do programa ArcGIS Pro 3.0.

Sequencialmente, os demais procedimentos de manipulação do MDE seguiram a ordem estabelecida pelo IPH-*Hydro Tools*: utilização do método MHS (*Modified Heuristic Search*) para remoção de falhas, definição das direções de escoamento, definição do fluxo acumulado e definição da rede de drenagem matricial.

Na segmentação da rede de drenagem foi adotado o método *Fixed Length Segmentation* (Segmentação com Comprimento Fixo), método que permite a segmentação de trechos de drenagem de extensão previamente definida, sendo adotada extensão de 10 quilômetros. Adicionalmente, para uma melhor representação dos processos hidrológicos e de transporte de sedimentos, os rios Doce, do Carmo e Gualaxo do Norte, foram segmentados considerando trechos de 1 quilômetro. Assim, a segmentação resultou em 2256 trechos de drenagem com comprimentos que não diferem de 1 km (rios Doce, do Carmo e Gualaxo do Norte) e 10 km (demais cursos d'água). A delimitação da bacia do Rio Doce e a hidrografia extraída do processamento do MDE é apresentada na Figura 18. Da mesma forma que a rede de drenagem foi segmentada em 2256 trechos, foram estabelecidas as áreas de drenagem de cada trecho, definidas como minibacias. A delimitação das minibacias, que representam a área de contribuição de cada trecho da hidrografia, é essencial para a modelagem hidrossedimentológica, pois é em função dessa unidade territorial que as informações topográficas para modelagem são obtidas e que os resultados são gerados, ou seja, o modelo gera resultados no exutório de cada uma das 2256 minibacias. A Figura 18 apresenta a delimitação espacial das minibacias.

A definição das sub-bacias considerou a localização das estações fluviométricas (Figura 3) e os reservatórios contidos na Tabela 7, pois a principal finalidade da sub-bacias refere-se ao procedimento de calibração, onde os valores dos parâmetros calibráveis podem ser distintos em cada sub-bacia. Todavia, quando diferentes estações estiverem muito próximas apenas uma foi considerada na geração de sub-bacia. Assim, foram definidas 60 sub-bacias, que foram numeradas para facilitar o processo de calibração. A representação das sub-bacias é ilustrada na Figura 19.

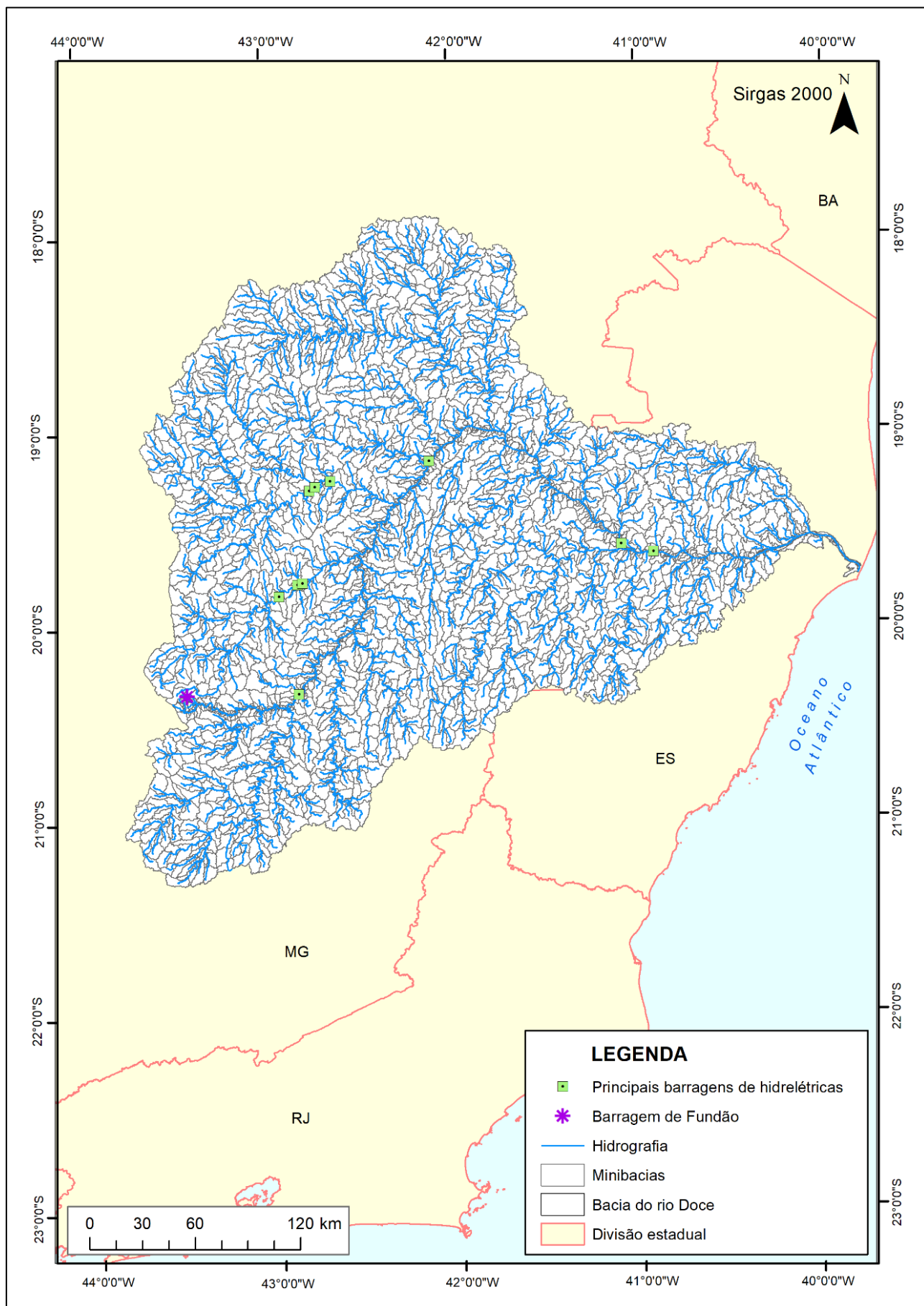
Obtidas as características espaciais da bacia do Rio Doce, foram definidas as URHs, que são áreas que apresentam comportamento hidrológico semelhante e onde são contabilizadas o escoamento superficial, a erosão do solo e outros comportamentos hidrológicos nas bacias hidrográficas (KUMAR; MISHRA, 2015). As URHs foram construídas considerando as informações pedológicas e de uso e ocupação de solo. Baseado no trabalho de Fan et al. (2015) os tipos de solos, apresentados na Figura 10, foram reclassificados em 4 classes em função da capacidade de geração de escoamento superficial: solos profundos; solos rasos; solos úmidos; e solos semi-impermeáveis. Assim, a reclassificação considerou: argissolos, nitossolos e latossolos, como classe de “solo profundo”; cambissolos, luvissolos e neossolos, como classe de “solo raso”; Gleissolo e espodossolo como “solos úmidos”; afloramento rochoso como “solos semi-impermeáveis”.

Da mesma forma, as classes de uso e ocupação do solo apresentadas na Figura 9, foram reclassificadas em 6 classes, em função de seu comportamento hidrológico, da seguinte forma: vegetação nativa e reflorestamento, como “Florestas”; áreas agrícolas, como “Agricultura”; pastagem, permaneceu como classe de mesmo nome (Pastagem); áreas abertas, como “Áreas úmidas”; aeroporto, afloramento rochoso, rodovias, áreas urbanas e mineração, como “Áreas semi-impermeáveis”; e água.

As reclassificações de tipo de solo e uso e ocupação do solo foram sobrepostos para a criação das URHs. No entanto, algumas combinações geradas não são diferenciáveis e o resultado da sobreposição foi reavaliado. O Mapa final das URHs para a bacia do Rio Doce, ficou composto por 9 classes e está apresentado na Figura 20.

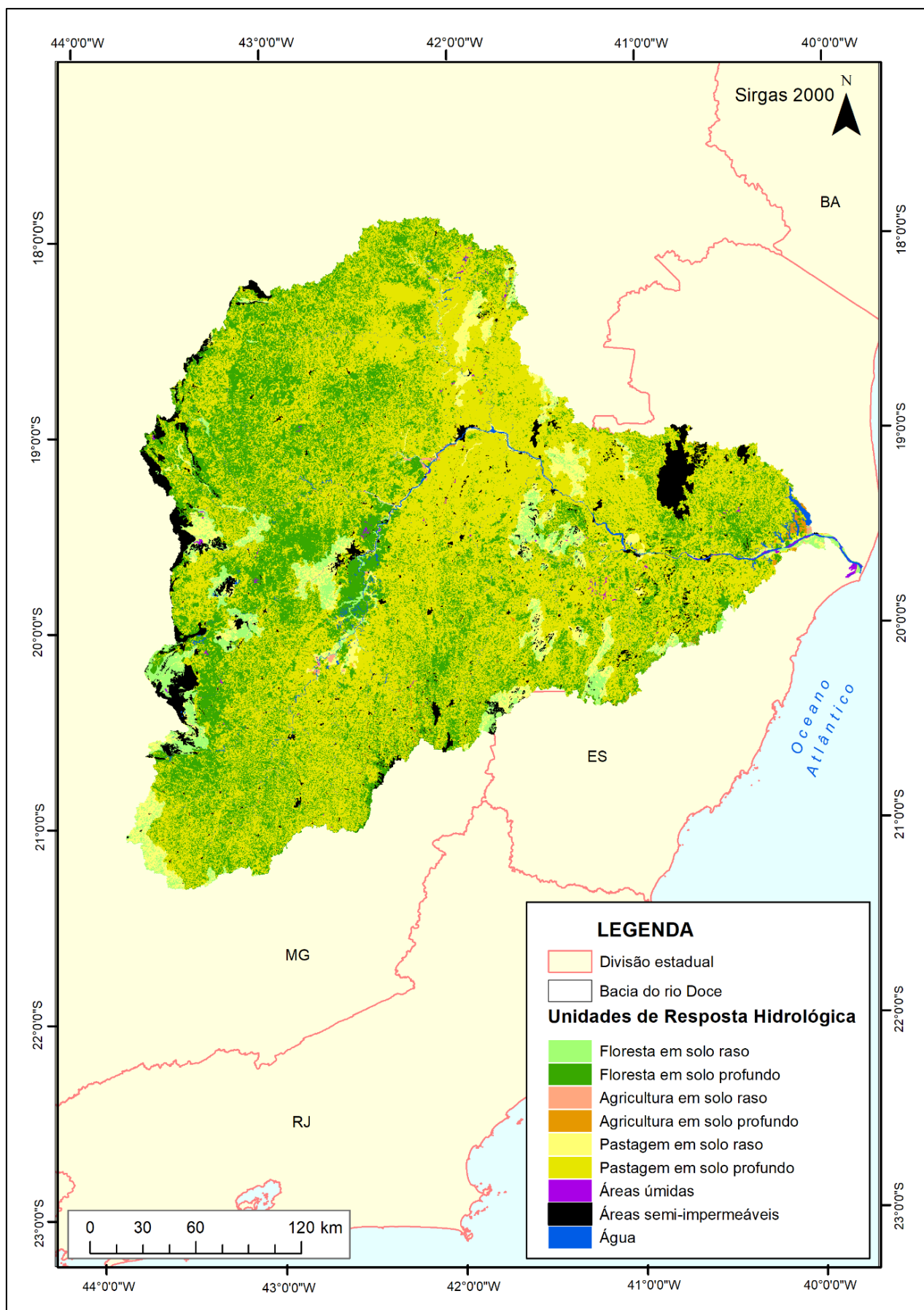


Figura 18: Representação das 2256 minibacias para simulação hidrossedimentológica da bacia do Rio Doce.



O mapa apresenta a Bacia do rio Doce, com as sub-bacias numeradas de 1 a 60. A hidrografia principal é representada por linhas azuis. A divisão estadual é mostrada com cores: BA (amarelo), ES (verde), MG (laranja) e RJ (roxo). A Barragem de Fundão é marcada com um asterisco amarelo. A escala varia de 0 a 120 km. A legenda indica: Barragem de Fundão (asterisco amarelo), Sub-bacias (linha preta), Hidrografia principal (linha azul), Bacia do rio Doce (área hachurada) e Divisão estadual (cores).

Figura 20: Unidades de resposta hidrológica para simulação hidrossedimentológica da Bacia do Rio Doce.



Com base nas informações espaciais obtidas no processamento do MDE, nas URHs e nas relações geomorfológicas (equações para cálculo da largura e profundidade dos rios em função da área de drenagem) estabelecidas por Fagundes (2018), foi realizado por meio de rotina computacional específica do IPH-Hydro Tools, a extração das informações topográficas de cada minibacia e respectivo trecho de drenagem, gerando um único arquivo de entrada do MGB-SED.

Em relação aos dados hidrológicos, foram considerados dados pluviométricos diários das 101 estações localizadas na bacia do Rio Doce e em áreas próximas a seus limites, conforme Figura 1 e Tabela 1. Por sua vez, dados diários de 61 estações de vazão identificadas na Tabela 3 foram considerados na simulação, cuja principal finalidade refere-se à verificação e adequação do modelo hidrológico, para posterior simulação de sedimentos. Foram considerados ainda, as normais climatológicas de 20 estações para espacialização de dados climáticos, conforme a Tabela 6.

Os parâmetros fixos da vegetação empregados no modelo incluem o albedo, o Índice de Área Foliar, a altura da vegetação e a resistência superficial. Esses parâmetros variam em função do tipo de vegetação e da sazonalidade e foram reproduzidos os valores estabelecidos para a bacia do Rio Doce por Fagundes (2018). O fator *LS* da MUSLE foi determinado na etapa de pré-processamento, para cada pixel do MDE, com rotina computacional específica (BUARQUE, 2015). O fator de erodibilidade (*K*), o fator de cobertura e manejo do solo (*C*) e fator de práticas conservacionistas (*P*) foram obtidos com base no trabalho de Fagundes (2018).

Uma vez definidos todos os dados de entrada do MGB-SED, procedeu-se inicialmente com o ajuste do módulo hidrológico, para posterior simulação da geração e transporte de sedimentos. Os parâmetros calibráveis do modelo hidrológico são aqueles para os quais o modelo é mais sensível e, portanto, estão associados às propriedades físicas dos solos contidos nas URHs e são variáveis por sub-bacia para melhor representar a variabilidade hidrológica da bacia (VERGASTA et al., 2021). Brito Neto et al. (2021) e (COLLISCHONN; TUCCI, 2001) detalham os parâmetros considerados calibráveis na simulação hidrológica.

A calibração foi realizada inicialmente ajustando manualmente os parâmetros de solo para cada sub-bacia de montante para jusante, até obter uma correspondência visual satisfatória entre as vazões observadas e as simuladas em cada período. Em seguida, foi empregada a calibração automática. O período de calibração hidrológica abrangeu de janeiro de 1990 a dezembro de 2014 e a validação foi conduzida durante o período de janeiro de 1970 a dezembro de 1989.

Os resultados da calibração e validação hidrológica do MGB-SED tiveram seus desempenhos verificados por meio do coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe (NS) segundo as faixas de classificação propostas por Moriasi et al. (2007). Nessa classificação, valores de NS superiores a 0,75 são considerados como “Muito Bom” e foram observados em 33% das estações fluviométricas na etapa de calibração e em 26% na validação. Valores superiores a 0,5 de NS são considerados no mínimo como “Satisfatório” e foram observados em 89% das estações na etapa de calibração e em 86% na etapa de validação. Com base nessas medidas de desempenho e no alinhamento das curvas de permanência construídas para cada estação por meio dos dados observados e simulados, considera-



se que o modelo hidrológico está devidamente calibrado e validado, sendo possível iniciar a simulação de sedimentos.

Apenas três parâmetros são considerados calibráveis na simulação de sedimentos com o MGB-SED, sendo:  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $TKS$ , apresentados nas equações 2 e 3, respectivamente. Os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  são coeficientes da MUSLE. As concentrações de sedimentos simuladas são amplificadas ou reduzidas proporcionalmente à variação do parâmetro  $\alpha$ , enquanto o parâmetro  $\beta$ , sua posição exponencial na equação da MUSLE, intensifica os picos e vales dos sedimentogramas à medida que seu valor diminui (FÖEGER et al., 2022). Em relação ao parâmetro  $TKS$  quanto menor o seu valor mais intenso serão os picos e vales dos sedimentogramas, além de influenciar no deslocamento dos sedimentos (FAGUNDES, 2018).

Conforme Tabela 4, considerando que a maioria das estações de medição de sedimentos iniciaram a série histórica de dados no ano de 1998 e o rompimento da barragem de Fundão em novembro de 2015, foi estabelecido o período de 1998 a 2014 para a calibração e validação da simulação de sedimentos. O período de 2005 a 2014 foi considerado para calibração e de 1998 a 2004 para validação.

As medidas de desempenho consideradas no processo de calibração do MGB-SED foram o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS), o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), os quais descrevem o grau de colinearidade entre os dados simulados e observados, além do viés percentual (*percent bias* – PBIAS) onde valores negativos indicam que o modelo está subestimando os dados observados; enquanto, para valores positivos, o modelo está superestimando, e quanto mais próximos de zero, menor o erro geral do modelo (BRITO NETO et al., 2021).

A calibração de sedimentos foi realizada ajustando manualmente os parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $TKS$  para cada sub-bacia até que as métricas de desempenho demonstrassem valores considerados satisfatórios. Para o cálculo das métricas de desempenho os dados simulados foram comparados apenas para os dias em que foram obtidos dados observados nas 31 estações sedimentológicas consideradas na Tabela 4. As métricas foram obtidas tanto para as concentrações de sedimento em suspensão (CSS), quanto para descarga sólida em suspensão (t/d) definida pelo produto entre a CSS (mg/L), vazão simulada ( $m^3/s$ ) e 0,0864 (fator para conversão de unidades). Válido destacar ainda, que de modo geral, a calibração foi realizada para melhor descrever a descarga sólida em suspensão, devido às incertezas e variabilidade nas medições de CSS.

Os resultados das métricas foram classificadas segundo os critérios estabelecidos por Moriasi et al. (2007) onde valores de NS superiores ou iguais a 0,3 são considerados, no mínimo, como satisfatórios e valores menores que 0,3 como Não Satisfatórios. Para os coeficientes  $r$  e  $R^2$ , são considerados satisfatórios valores superiores a 0,5 e Não Satisfatórios valores iguais ou inferiores a 0,5. Em relação a classificação dos valores de PBIAS, valores superiores a  $\pm 60$  são considerados Não Satisfatórios e demais valores como no mínimo Satisfatórios. Os parâmetros de calibração de sedimentos para as 60 sub-bacias estão apresentados na Tabela 13. Convém destacar que especificamente para a sub-bacia

do rio Santa Maria do Doce não há estações sedimentológicas com registros históricos de CSS, portanto os parâmetros foram estimados buscando melhor ajuste para a estação Colatina, que se encontra próxima a sua foz, mas já no Rio Doce.

Tabela 13: Parâmetros calibrados para cada sub-bacia do Rio Doce.

Sub-Bacia	$\alpha$	$\beta$	TKS	Sub-Bacia	$\alpha$	$\beta$	TKS
1	4,000	0,650	1,000	31	14,000	0,600	1,365
2	4,015	0,650	1,000	32	7,264	0,650	1,516
3	3,000	0,650	1,000	33	5,160	0,600	1,183
4	3,000	0,650	1,000	34	5,400	0,650	1,000
5	0,310	0,500	1,000	35	10,100	0,960	1,500
6	0,620	0,500	1,000	36	10,100	0,960	1,000
7	4,340	0,760	1,000	37	10,100	0,960	1,500
8	10,533	0,845	1,320	38	10,750	0,720	1,352
9	10,706	0,854	1,162	39	9,685	0,720	1,000
10	15,219	0,775	1,041	40	9,690	0,550	1,000
11	15,617	0,574	1,000	41	10,285	1,056	1,371
12	12,346	0,846	1,159	42	8,408	0,712	1,000
13	8,957	0,663	1,083	43	10,486	0,786	1,347
14	5,617	0,500	1,000	44	12,501	0,753	1,325
15	14,000	0,850	1,000	45	7,090	0,560	1,000
16	14,000	0,730	1,000	46	6,270	0,770	1,500
17	5,774	0,500	1,000	47	8,899	1,159	1,500
18	5,617	0,500	1,000	48	6,069	0,850	1,198
19	2,470	0,560	1,000	49	12,299	0,735	1,153
20	4,457	0,560	1,000	50	19,441	0,894	1,296
21	4,457	0,560	1,000	51	22,441	0,751	0,989
22	4,457	0,560	1,000	52	4,941	0,660	1,000
23	4,457	0,560	1,000	53	5,559	0,660	1,000
24	4,457	0,560	1,000	54	8,176	0,480	1,000
25	10,100	0,960	1,500	55	10,934	0,828	1,139
26	12,934	0,837	5,362	56	20,516	1,000	1,246
27	6,163	0,994	1,227	57	2,544	0,460	1,000
28	6,682	0,852	1,126	58	0,618	0,960	1,000
29	0,672	0,530	1,000	59	6,176	0,850	3,000
30	6,564	0,724	1,216	60	7,090	0,560	1,000

A síntese das métricas de sedimentos para o período de calibração e validação, considerando tanto a concentração de sedimentos em suspensão e quanto descarga sólida em suspensão, está apresentada na Tabela 14. As estações Resplendor Jusante (56948005) e Tumiritinga (56920000) não foram consideradas nos cálculos por apresentar pouco ou nenhum dado no período de calibração e validação, respectivamente. Conforme observado na Tabela 14, a análise estatística realizada entre os dados

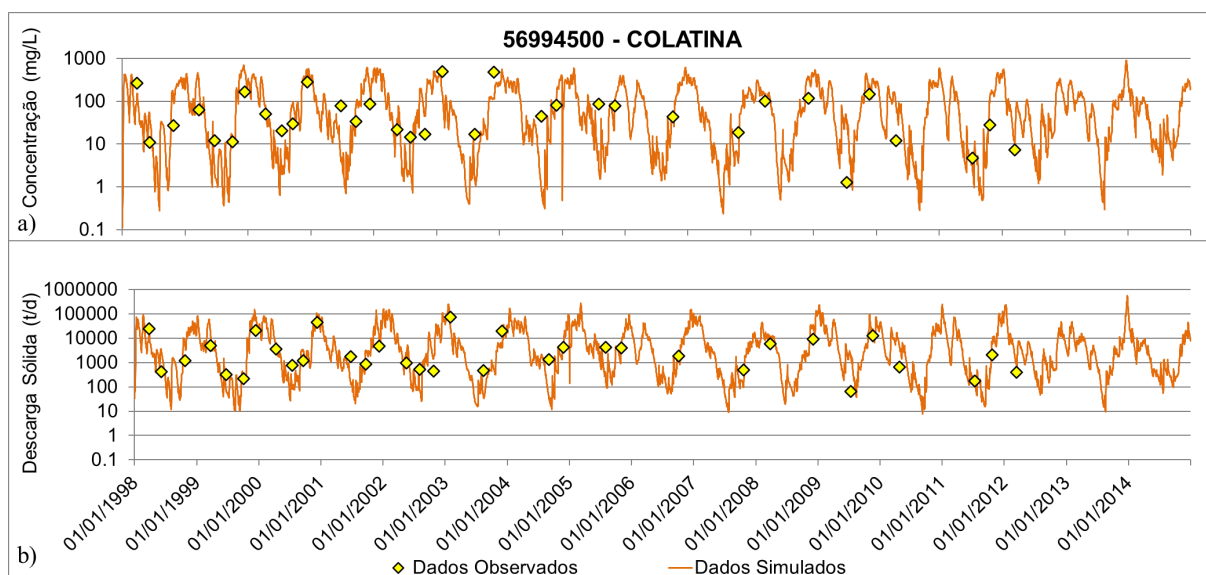
observados e simulados indicaram que a maioria das estações apresentaram no mínimo um ajuste satisfatório, principalmente para a descarga sólida em suspensão. Em relação às diferenças entre as métricas de calibração e validação, tal comportamento é recorrentemente observado na simulação de sedimentos como aponta Moriasi et al. (2007).

Tabela 14: Síntese das medidas de desempenho na calibração e validação do modelo hidrossedimentológico da bacia do Rio Doce.

Etapa	Métrica	Sedimentos em suspensão (mg/L)		Descarga sólida em suspensão (t/d)	
		Satisfatório	Não Satisfatório	Satisfatório	Não Satisfatório
Calibração	NS	47%	53%	77%	23%
	r	77%	23%	83%	17%
	R <sup>2</sup>	57%	43%	67%	33%
	PBIAS	90%	10%	97%	3%
Validação	NS	27%	73%	50%	50%
	r	63%	37%	90%	10%
	R <sup>2</sup>	37%	63%	70%	30%
	PBIAS	60%	40%	63%	37%

Os valores diários de sedimentos em suspensão e de descarga sólida em suspensão simulados para a estação Colatina referentes ao período de calibração e validação é apresentado na Figura 21. Mesmo com a limitação na quantidade de dados observados, é notável que as simulações tendem a seguir o comportamento dos dados observados em relação à ocorrência de períodos com concentrações de sedimentos baixas e/ou elevadas, o que também é perceptível com a descarga sólida em suspensão. Assim, com base nos resultados da simulação e nas métricas de desempenho, o modelo MGB-SED foi considerado calibrado e validado.

Figura 21: Gráfico do modelo (Dados Observados vs Dados Simulados ao longo do período). a) série de concentração de sedimentos em suspensão (mg/L) e b) série de descarga sólida em suspensão (t/d).



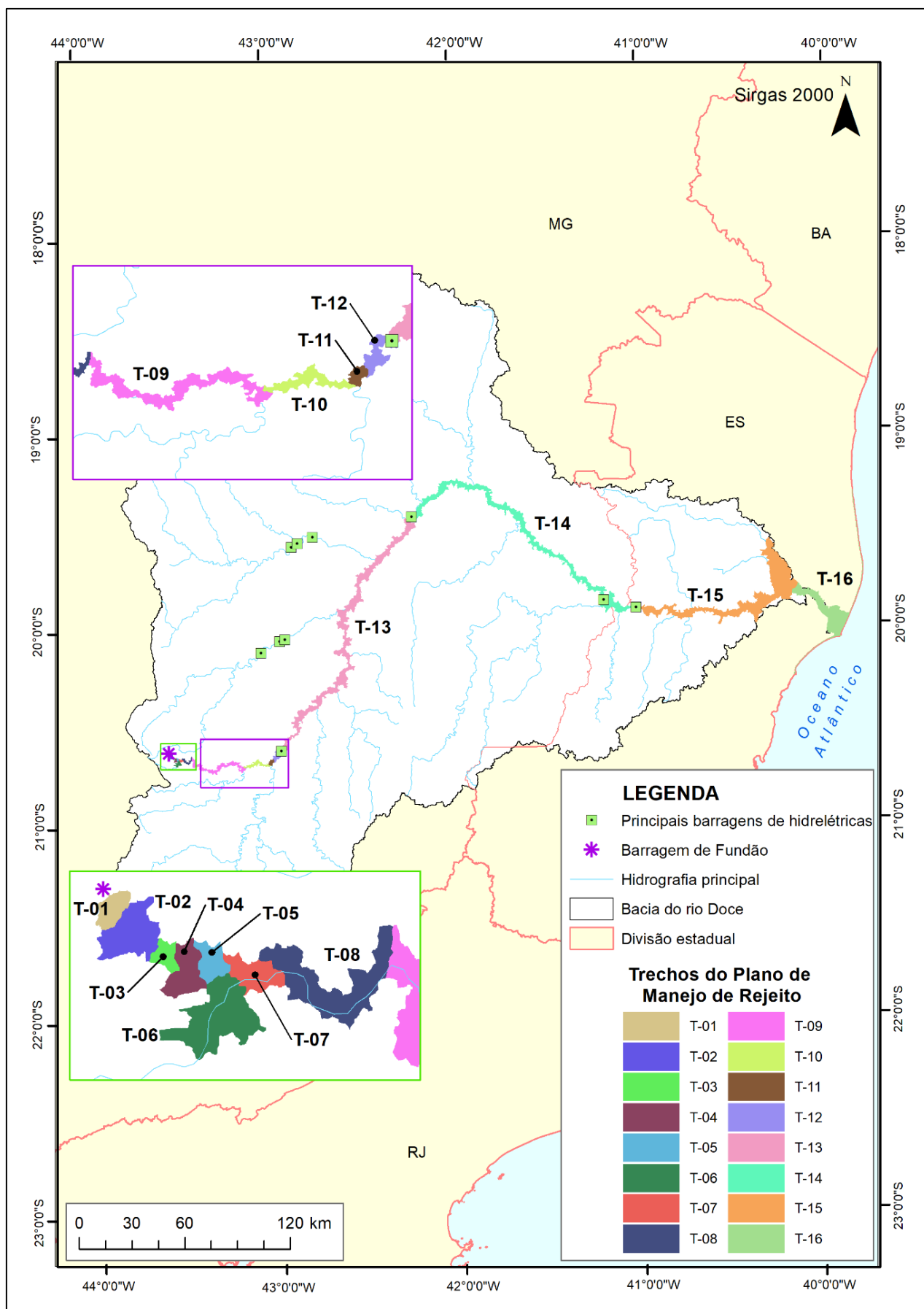
Para simulação da geração e transporte de sedimentos na bacia do Rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão em novembro de 2015, foram solicitados junto a Fundação Renova dados da estimativa de volume de depósitos de rejeitos e sedimentos remanescentes medidos após o rompimento da barragem de Fundão a pedido da Fundação Renova, conforme apresentado no Planos de Manejo de Rejeitos (PMR).

De acordo com o PMR, as áreas afetadas pelo rompimento da barragem foram segmentadas em 17 trechos (Fundação Renova, 2018a,b). O PMR considerou como objeto de análise as áreas físicas diretamente afetadas pelos rejeitos oriundos do rompimento da barragem de Fundão, como as planícies de inundação, as margens e calhas dos rios, as lagoas lindeiras aos rios, bem como as vertentes da bacia de contribuição, delimitando a área afetada (Fundação Renova, 2018a). A divisão geoespacial dos trechos foi fornecido pela Fundação Renova, conforme apresentado na Figura 22.

Todavia, neste trabalho não foi considerado o trecho 17, por se referir a região costeira adjacente a foz do Rio Doce onde o modelo MGB-SED não é aplicável. Adicionalmente, segundo informações da Fundação Renova, o PMR do referido trecho ainda se encontra em elaboração. Assim, apenas os dados de volume de depósitos de rejeitos e sedimentos remanescentes do trecho 1 ao 16, que compreendem o marco do rompimento até a foz do Rio Doce, foram utilizados na modelagem hidrosedimentológica com incorporação de ressuspensão do rejeito.



Figura 22: Representação espacial dos trechos do Plano de Manejo de Rejeitos fornecidos pela Fundação Renova.



Os volumes de depósitos de rejeitos e sedimentos remanescentes medidos após o rompimento da barragem de Fundão para cada trecho do PMR e fornecidos mediante solicitação a Fundação Renova, estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Volume de depósito de rejeitos e agregados fornecidos pela Fundação Renova para os trechos do PMR.

Trecho	Volume Rejeito e Agregados (m³)			Total (m³)
	Intracalha	Extracalha	Lagoas	
1 a 4	7.153.400	3.654.500		10.807.900
5	447.215	335.323		782.538
6	87.596	961.727	0	1.049.323
7	57.075	189.393	0	246.468
8	152.953	480.495	0	633.448
9	831.042	5.107.806	101.855	6.040.703
10	1.230.175	816.040	242	2.046.457
11	648.170	41.055	1.309	690.534
12	8.923.121	0	0	8.923.121
13*	1.925.050	36.262	1.411	1.962.723
14*	3.380.164	336.686	2.263	3.719.113
15	22.508	0	48.250	70.758
16			9.900	9.900

Notas: \* inclui os volumes de depósito de rejeitos dos reservatórios das UHEs Baguari, Aimorés e Mascarenhas.

Simultaneamente, também foi utilizado o documento “Volume 3 – Aplicação do plano de manejo de rejeito nos trechos 1 ao 4”, igualmente fornecido pela Fundação Renova, para identificar individualmente o volume de depósito de rejeito contido nos trechos 1 a 4, que na Tabela 15 estão apresentados de forma conjunta. Da mesma forma, também foi consultado o documento “Atualização do volume 10: aplicação do plano de manejo de rejeito nos trechos 13 e 14” para especificar os volumes de depósito contidos nos lagos dos reservatórios das UHEs de Baguari, Aimorés e Mascarenhas, que estão inseridos nos respectivos trechos. É importante destacar que o trecho 12 apresentado na Tabela 15 representa o volume de depósito contido no reservatório da UHE Risoleta Neves.

Depreende-se pelo exposto, que os sedimentos contendo rejeitos depositados no Rio Doce estão sujeitos a processos de erosão e deposição. Nesse sentido, o modelo MGB-SED considera que partículas finas (silte e argila) não podem ser erodidas e depositadas simultaneamente, com cada condição ocorrendo isoladamente. O modelo baseou-se no trabalho de Krishnappan (2000) para estabelecer leis de potência para estimar a fração de sedimento depositada no leito ou a fração suscetível de ressuspensão, com ambos os processos sujeitos à magnitude da tensão de cisalhamento do leito do rio. A decisão de erosão ou deposição em cada trecho de rio é determinada comparando as tensões de cisalhamento do fundo do trecho com as do trecho de montante permitindo a erosão do material depositado, outrora, limitando o volume erodido ao depositado anteriormente. Sedimentos contidos nos reservatórios das UHEs, por sua vez, ficam retidos neles sem haver ressuspensão.

Assim, para incorporação dos volumes de depósito de rejeitos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão dispostos na Tabela 15, as cargas de sedimentos finos depositadas no leito do Rio Doce e nos tributários (Rejeitos no fundo da intracalha dos Trechos 1 a 16) foram considerados passíveis de

ressuspensão no escoamento. Porém, a modelagem da ressuspensão teve início apenas em 2018, visto que, para a maioria dos trechos, a estimativa do volume de depósito de rejeito foi realizada a partir do final de 2017 (FUNDAÇÃO RENOVA, 2017,2018a,b,c,d, 2021, 2022a,b).

Nesse contexto, a partir da representação geoespacial dos trechos do PMR foram identificadas e quantificadas as minibacias correspondentes em cada trecho do PMR que se sobrepõe a calha de seus respectivos cursos d'água. Na sequência, o volume de rejeito e agregados foram distribuídos uniformemente entre as minibacias contidas em cada trecho do PMR, visto que todas as minibacias e seus respectivos trechos de drenagem associados, apresentam comprimento aproximado de 1km. Considera-se ainda que a ressuspensão está limitada apenas aos sedimentos finos (silte e argila) e, portanto, o volume de rejeito apropriado para as minibacias foram distribuídos igualmente entre argila e silte na simulação com o MGB-SED.

Coeficientes das formulações propostas por Krishnappan (2000) foram ajustados para representar as condições específicas do Rio Doce, comparando os dados simulados com os dados observados das estações de monitoramento da ANA (localizadas no Rio Doce), PMQQS e para a estação E21 (Linhares/ES). Foram aplicadas as mesmas métricas de desempenho adotadas na etapa de calibração e validação do modelo MGB-SED, assim como suas respectivas classificações. Conforme Tabela 16 a maioria das estações apresentaram ajustes satisfatórios, com maior destaque para a representação da descarga sólida em suspensão. Importante destacar que a métrica NS foi aqui considerada apenas como uma forma de avaliar em quais locais (sub-bacias) a calibração ficou melhor, pois seus resultados não são confiáveis devido à escassez de dados medidos de sedimentos, diferentemente da aplicação dessa métrica para as vazões que estão disponíveis diariamente.

Tabela 16: Síntese das medidas de desempenho do ajuste da ressuspensão de rejeito para a bacia do Rio Doce no MGB-SED

Métrica	Sedimentos em suspensão (mg/L)		Descarga sólida em suspensão (t/d)	
	Satisfatório	Não Satisfatório	Satisfatório	Não Satisfatório
NS	31%	69%	59%	41%
r	91%	9%	88%	13%
R <sup>2</sup>	59%	41%	78%	22%
PBIAS	53%	47%	59%	41%

Para avaliar o impacto na descarga sólida em suspensão devido a ressuspensão do rejeito, considerou-se uma simulação hipotéticas que aqui será chama de “simulação base”, a qual consiste em simular o período pós rompimento como se ele não tivesse ocorrido. Portanto, para o mesmo período foi adotada uma condição de inexistência do rompimento da Barragem de Fundão, para simples comparação dos resultados com a simulação que incorpora os efeitos da ressuspensão do rejeito no fundo da intracalha. Essa comparação permitiu estimar o percentual de elevação da descarga sólida em suspensão devido à ressuspensão do rejeito existente na calha do rio.

Adicionalmente, para avaliar o comportamento dos volumes de depósitos de rejeito entre os períodos do PMBA/Fest, comparou-se o volume de depósito de rejeito ao final de cada período com o volume

inicial de depósito para cada trecho do PMR. Excetuaram-se o trecho 12 e segmentos dos trechos 13 e 14, que representam os lagos dos reservatórios das UHEs, locais onde a ressuspensão não foi considerada. Por sua vez, o percentual de retenção de sedimentos em suspensão em função dos reservatórios foi estimado pelo balanço entre a soma da descarga sólida que chega ao reservatório e a soma da descarga líquida defluente.

## **2.2.2 Caracterização e análise de interrelações envolvendo ações na bacia hidrográfica e aspectos de quantidade/qualidade da água e biodiversidade aquática**

A partir dos documentos mencionados anteriormente, foram identificados dados e informações referentes às ações da Fundação Renova, e estes foram organizados em tabelas de dados brutos, os quais foram processados e tratados, gerando um banco de dados base.

Para caracterização do cenário de qualidade de água a ser simulado, inicialmente foi realizado um estudo sobre as cargas geradas pelos municípios da bacia do Rio Doce, os percentuais destas cargas em relação à carga total da bacia e as distâncias destes municípios da calha principal do Rio Doce. Foram estimadas as cargas orgânicas geradas pelos 228 municípios que compõem a bacia do Rio Doce, a partir da seguinte equação (TSUTIYA, 2004; Von Sperling, 2007):

Equação 4: Vazão de esgoto

$$Q = \frac{P \cdot q}{86400} \cdot R$$

onde: Q = vazão em L/s; P = população do município em habitantes, obtida junto ao IBGE; q = consumo médio per capita, L/hab.dia; e R = Coeficiente de Retorno.

O coeficiente de retorno R foi estabelecido em 0,8, e representa a relação média entre o volume de esgoto gerado e de água consumida e é determinado pela ABNT NBR 9649/1986. O valor 86.400 é utilizado para transformar um valor diário de vazão em valor por segundo.

A norma ABNT NBR 12209/2011 expressa que na ausência ou impossibilidade de determinação através de investigação local podem ser usados valores na faixa de 45 a 60 g DBO/hab.dia para a Carga Unitária de DBO. No PIRH do Rio Doce foi adotado o valor de 54 g/hab.dia, sendo, portanto, este valor adotado no presente projeto. A carga total de DBO estimada para cada município foi obtida pela multiplicação da carga unitária pela sua população.

Os dados obtidos junto ao SNIS referem-se ao Índice de Coleta de Esgotos (IN015) e ao Índice de Tratamento de Esgotos (N016), os quais foram obtidos para os municípios dos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo no portal [SNIS-Série Histórica](#), referente ao ano 2021. Além dos indicadores, foram baixados dados de caracterização dos municípios, como nome, nome da prestadora de serviço, população e código do IBGE para cada município e, a partir deste último dado, foram identificados os municípios pertencentes à bacia do Rio Doce, por meio do programa de geoprocessamento ArcGIS, da empresa Esri. Em seguida, os dados foram processados no programa Tableau Desktop, onde os

municípios foram diferenciados de acordo com suas participações, ou não, no Programa 31 - Programa de Coleta e Tratamento de Esgoto e Destinação de Resíduos Sólidos (P31) da Fundação Renova. A partir desta análise preliminar foram construídos gráficos, tabelas e mapas relativos aos indicadores IN015 e IN016 para os conjuntos de municípios participantes e não participantes do PG 31, os quais passam a serem identificados no decorrer deste texto como “PG31” e “Outros Municípios”, respectivamente. Estes indicadores também foram aplicados às cargas totais estimadas para cada município, resultando nas estimativas de cargas remanescentes aportadas aos corpos receptores. Ressalta-se que foram utilizados para os dados do SNIS e dados do IBGE aqueles relativos ao ano de 2021, por estes serem os mais recentes disponibilizados pela série histórica do SNIS no momento inicial do presente trabalho.

De posse dos valores de cargas totais para cada município procedeu-se a análise destas no programa Tableau, identificando o quanto cada município colabora, em valores percentuais, com o total da carga gerada por toda a bacia hidrográfica. Para os municípios com menos de 25.000 habitantes e que não são contíguos à calha do Rio Doce, ou seja, que não lançam seus esgotos diretamente neste rio, foi considerado que suas cargas são assimiladas pelos efeitos de autodepuração de seus corpos receptores. Desta forma estes municípios não foram considerados (como entradas pontuais) no [Diagrama Unifilar](#) que servirá de base para a modelagem de qualidade de água.

Para os demais municípios, ou seja, aqueles localizados junto à calha do Rio Doce, foram levantados dados para a estimativa da produção de esgotos domésticos, os pontos de lançamento de seus esgotos a partir de informações contidas em bancos de dados públicos ([Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas](#), [Atlas Esgotos ETE 2013](#), [Atlas de Saneamento](#), [IBGE Cidades](#)), em documentos de [licenciamento ambiental](#) e em planos municipais de saneamento básico (PMSB), no [Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce \(PIRH\)](#) e em sua versão [atualizada PIRH 2023](#).

Uma vez definido o conjunto de municípios cujos aportes de carga seriam considerados como contribuições diretas ao Rio Doce, procedeu-se as estimativas de concentrações de DBO de seus esgotos, as quais foram obtidas dividindo as cargas totais de DBO pelas vazões de esgoto produzidas, convertendo as unidades de modo que as concentrações fossem expressas em mg/L.

Os dados hidráulicos e hidrológicos foram levantados e estimados a partir de informações a respeito de estações fluviométricas identificadas em RRDM (2019) e em ambiente SIG, cujos shapes, MDE e demais arquivos foram obtidos a partir das bases espaciais citadas no item 2.1.2, de acordo com a metodologia proposta em Sperling (2007). Para os demais parâmetros e constantes foram utilizados valores indicados por Sperling (2007), os quais foram posteriormente calibrados manualmente a partir de dados de estações de qualidade de água presentes na calha do Rio Doce.

Para a identificação das eficiências mínimas de tratamentos de esgotos, foi utilizado o Sistema Integrado de Modelagem de Poluição Pontual e Difusa (SIMPPOD), sendo este um Sistema de Suporte a Decisão que permite a simulação da qualidade de água e otimização das eficiências de tratamento de esgotos e de outras fontes pontuais de poluição.

O módulo de simulação de qualidade de água do SIMPPOD é composto por modelo de simulação de qualidade de água de rios baseado no Qual- UFMG, que foi desenvolvido por Von Sperling (2007), sendo este baseado no QUAL2-E da *United States Environmental Protection Agency* (USEPA). Entretanto, não inclui algas e suas inter-relações com os constituintes. O SIMPPOD simula as variáveis Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Oxigênio Dissolvido (OD), Nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato e coliformes (CARVALHO, 2019; VON SPERLING, 2007).

O SIMPPOD também apresenta módulo de otimização. A otimização pode ser definida como um processo em que se busca (m) solução (ões) dita (s) ótima (s) de determinado problema. Especificamente, este módulo utiliza Algoritmos Genéticos (AG), os quais apresentam como principal característica a simulação da evolução das espécies como método de busca pelo indivíduo (solução) ou indivíduos (soluções) ótimos. Ou, em outros termos, a busca pela solução que apresenta características que a permitam atender o mais satisfatoriamente possível a diferentes ou a um único objetivo (LINDEN, 2012).

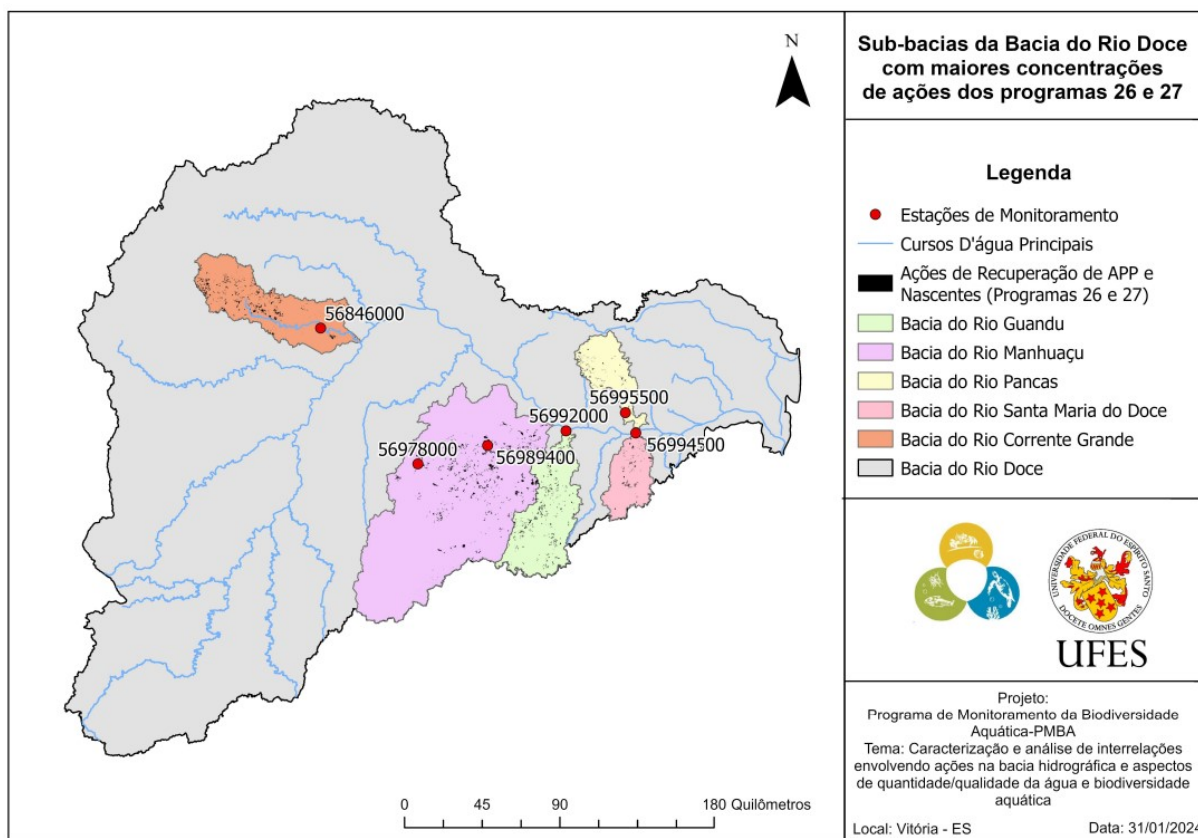
Para auxiliar na compreensão de possíveis efeitos das ações de recuperação realizadas pela Fundação Renova sobre aspectos de qualidade de água dos cursos d'água da bacia, foram levantadas junto à ANA e IGAM, informações e dados a respeito de resultados de monitoramentos relativos a postos situados mais próximos a jusante dos locais das mesmas. Especificamente, foram buscados postos de monitoramento situados próximos as jusantes dos conjuntos de ações dos Programas 26 - Programa de Recuperação de Áreas de Preservação Permanente (APPs) e Recargas Hídricas (PG26), e Programa 27 - Programa de Recuperação de Nascentes (PG27). A localização do conjunto de ações destes Programas foi repassada pela Fundação Renova em formato de arquivo vetorial, o qual foi trabalhado em ambiente de Sistema de Informações Geográficas, especificamente o programa ArcGIS da empresa ESRI. As localizações das estações foram obtidas junto ao Catálogo de Metadados da ANA (Figura 23).

Para as ações de recuperação de APP, recuperação de nascentes e restauração florestal serão selecionadas estações a jusante das sub-bacias que foram contempladas de forma mais expressivas pelos programas 26 e 27 da Fundação Renova. O parâmetro selecionado para avaliação dos efeitos das ações na qualidade da água foi turbidez. As estações foram selecionadas levando em consideração as localizações das ações e a disponibilidade de dados. Dentre as sub-bacias da bacia do Rio Doce com maiores concentrações de ações foram selecionadas para análise: Rio Pancas, Rio Manhuaçu, Rio Corrente Grande, Rio Santa Maria do Doce e Rio Guandu (Figura 23).

As somas das áreas de intervenção foram comparadas com as áreas totais das sub-bacias analisadas. Procedeu-se então à coleta e análise dos registros de Turbidez correspondentes às estações escolhidas, considerando-se períodos secos e chuvosos dos anos da série histórica



Figura 23: Mapa de Localização das ações dos Programas 26 e 27 da Fundação Renova



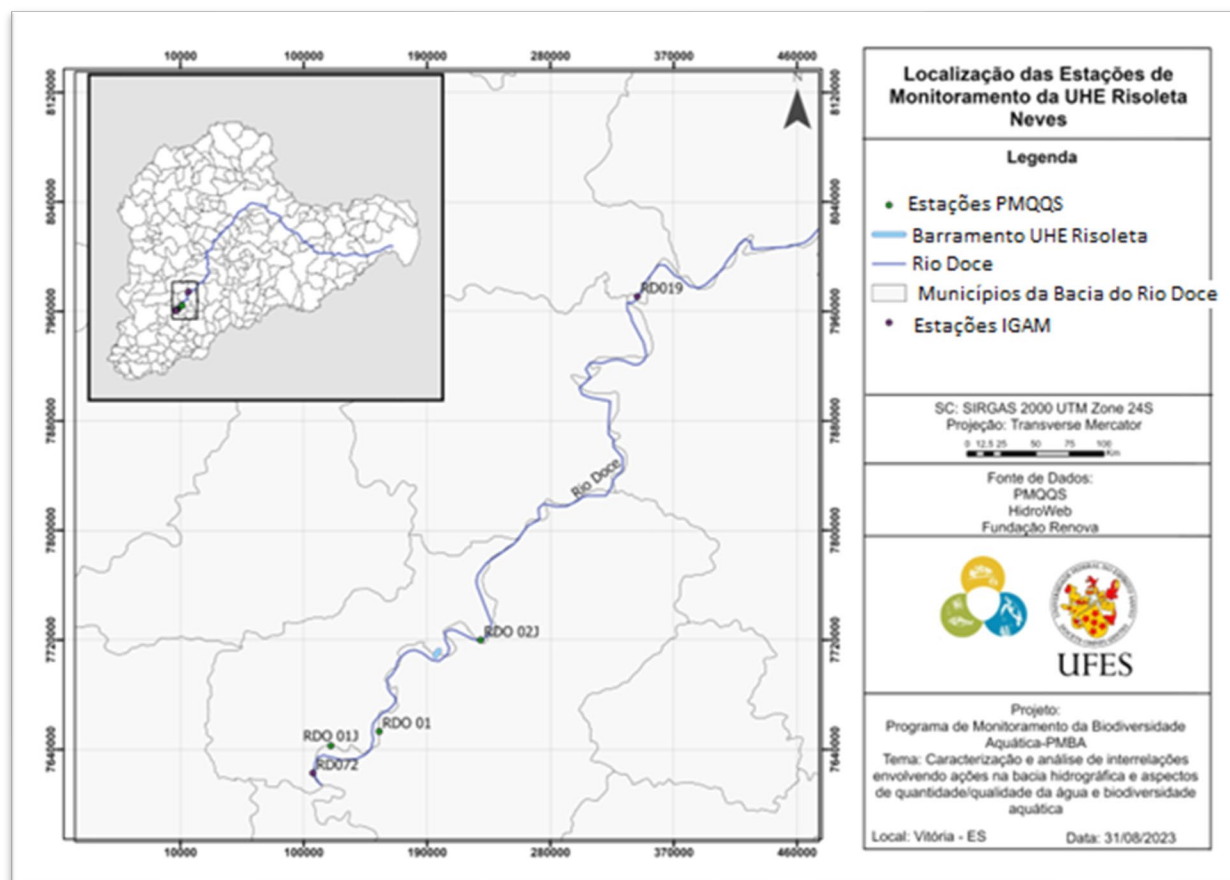
Quanto ao Saneamento Básico, eixo Esgoto, foi realizada uma avaliação da qualidade das redes de monitoramento, com relação às manchas urbanas dos municípios contemplados pelo Programa 31 da Fundação Renova. Foram avaliadas as redes de monitoramento da ANA, PMQQS, IGAM e PMBA.

Para o tema manejo de rejeitos, que consiste nas obras de dragagem do reservatório da UHE Risoleta Neves, foram selecionadas estações a montante e jusante do reservatório. Para análise dos efeitos das ações, foram considerados os parâmetros turbidez e sólidos suspensos.

Série histórica correspondente a um período de 5 anos de monitoramento do PMQQS (2018 - 2023) foi considerada. Série de dados do IGAM para um período de 23 anos (2000 - 2023) permitiu análise considerando condições anteriores ao rompimento da barragem de rejeitos. Foram, desta forma levadas em consideração séries correspondentes a estações localizadas a montante (IGAM - RDO72/PMQQS - RDO1 e RDO1J) e a jusante (IGAM - RDO19/PMQQS - RDO2J) da UHE Risoleta Neves. A localização destas estações é apresentada na Figura 24.



Figura 24: Localização das estações de monitoramento do PMQQS e IGAM consideradas.



Para a análise de uso e ocupação do solo nas sub-bacias, foi utilizada a legenda de nível 2 do MapBiomas. Mais detalhes sobre os usos e ocupações que recebem esta classificação podem ser acessados no site da rede colaborativa [MapBiomas](https://mapbiomas.org/). É importante ressaltar que a classe Mosaico de Usos refere-se a localidades onde não foi possível, para escala espacial adotada, diferenciar o uso entre Agricultura e Pecuária. Novamente, se faz necessário reforçar que a imagem adotada possui resolução espacial de 10 metros, sendo o agrupamento de classes uma metodologia comumente adotada em trabalhos de uso e ocupação do solo, devido às limitações quanto à escala espacial.

Além disso, é válido reforçar que a análise foi feita a nível de sub-bacia, e que as imagens utilizadas não possuem características que permitam a identificação de aspectos que permitem avaliar qualitativamente os fragmentos florestais. A partir das camadas vetoriais das sub-bacias e das áreas de atuação dos Programas 26 e 27 foram calculados os percentuais relativos as áreas ocupadas por cada classe de uso e ocupação, nas sub-bacias e nas áreas dos PG26 e PG 27.

### 2.2.3 Hidrologia e transporte de sedimentos

Os processamentos dos dados de fluxos foram feitos no software Winriver II da RD Instruments, a partir dos dados monitorados com o ADCP RiverRay. Foi feito ajuste de curva-chave com os dados de cota e vazão obtidos nas datas das campanhas. A partir da equação estabelecida, usando dados de níveis

d'água, foram estimadas as vazões médias diárias, para a estação E21. Os dados de vazão foram avaliados segundo sua sazonalidade.

As análises relativas a sedimentos foram feitas conforme apresentado por Carvalho (2008). Os dados para elaboração das curvas granulométricas dos sedimentos em suspensão foram obtidos através do Método do Tubo de Retirada pela Base. A classificação granulométrica dos sedimentos suspensos foi feita segundo a *American Geophysical Union*. As concentrações de sólidos suspensos e dissolvidos foram determinadas pelo mesmo método de análise, sendo obtidas concentrações de sólidos dissolvidos e sólidos suspensos em planilhas de cálculo. As curvas granulométricas foram obtidas a partir dos resultados das análises dos sedimentos realizadas pelo Método de Peneiramento. A classificação granulométrica dos sedimentos de fundo foi feita segundo metodologia indicada pela *American Geophysical Union*.

A equação  $Q_{ss} = 0,0864.Q.C_{ss}$  foi utilizada nas estimativas de descargas sólidas em suspensão, na qual  $Q_{ss}$  é a descarga sólida em suspensão (t/d);  $Q$  é a vazão ( $m^3/s$ ) e  $C_{ss}$  é a concentração de sedimentos suspensos (mg/L). As descargas sólidas totais foram estimadas pelo Método de Einstein modificado por Colby e Hembree (1955). Por este método as descargas totais de sedimentos são obtidas a partir de medições de descargas de sedimentos em suspensão na parte superior da seção de escoamento, entre a superfície e pontos localizados a uma pequena distância do fundo, e de extrapolação das cargas em suspensão medidas para a faixa situada próxima ao fundo (CARVALHO, 2008). Os cálculos foram feitos a partir de parâmetros hidráulicos correspondentes às seções monitoradas, considerando as características do material amostrado em suspensão e no leito. Foram utilizados dados de: vazão, velocidade média de escoamento, área da seção transversal, largura da seção transversal, profundidade média das verticais de coletas de sedimentos, concentração de sedimentos em suspensão, distribuição granulométrica de materiais do leito e em suspensão e temperatura da água coletados na seção. Com uso da metodologia descrita, obtêm-se as descargas sólidas em suspensão, as descargas sólidas por arraste e, também, as descargas sólidas totais.

Estabelecidos os valores de descargas de sedimentos, foram feitos ajustes de curvas “vazão x descargas de sedimentos em suspensão” e “vazão x descargas de sedimentos totais”. As equações estabelecidas foram utilizadas para as estimativas de descargas sólidas médias diárias para a estação E21.

Foram elaborados gráficos com as séries históricas de vazões e de descargas de sedimentos suspensos e totais.

Os dados de nutrientes (i.e., nitrogênio e fósforo) e metais foram fornecidos por outros Temas no âmbito do PMBA/Fest. A partir destes dados e dos obtidos nesta linha de ação foram estimados os fluxos instantâneos de nutrientes e metais, determinados pelo produto Descarga Líquida x Concentração.

## 2.3 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS

No que tange aos produtos e indicadores apresentados no presente relatório, ocorreram as seguintes mudanças de metodologia:

Foram incluídas informações referentes a modelagem hidrossedimentológica para a caracterização da geração e transporte de sedimentos da bacia do Rio Doce. Foram inseridas as fontes de coleta de dados diários hidrológicos, sedimentos em suspensão, climáticos e informações sobre reservatórios. Na seção de Análise, foram incluídas descrição do modelo hidrossedimentológico MGB-SED, assim como os principais inputs do modelo e os resultados da calibração e validação hidrossedimentológica. O modelo MGB-SED incorporou um processo de ressuspensão de rejeitos no fundo da intracalha, cujos volumes iniciais medidos foram fornecidos mediante solicitação à Fundação Renova. A modelagem da ressuspensão permitiu avaliar os efeitos da ressuspensão de rejeito. A inclusão da modelagem de sedimentos da bacia do Rio Doce proporcionou a criação do indicador de Geração e Transporte de Sedimentos.

Também foram incluídas mudanças relativas à modelagem de qualidade de água e a análise de dados de outras redes de monitoramento de qualidade de água. Sendo incluídas informações relativas à produção de esgotos pelos municípios, como estimativas de vazão de esgoto, concentração, localização, índices de coleta e tratamento, parâmetros hidráulicos e hidrológicos oriundos de estações fluviométricas, além de dados de qualidade de água obtidos junto às redes. Os procedimentos metodológicos referentes à análise dos dados das redes e aos processos de modelagem de qualidade de água e otimização foram detalhados no item 2.2.2.

### 3 RESULTADOS DOS INDICADORES

Nesta seção serão apresentados os resultados dos indicadores de qualidade ambiental e da biodiversidade aquática do Tema, os quais foram desenvolvidos pelo PMBA/Fest e obtidos ao longo de todo monitoramento na área ambiental I. Vale ressaltar que, os indicadores aqui apresentados têm como propósito clarificar e sintetizar a historicidade dos resultados, interpretação e conclusões do monitoramento, promovendo o acompanhamento espaço-temporal da qualidade ambiental e biodiversidade, além de configurarem importantes ferramentas de suporte aos gestores ambientais. A partir destes indicadores, pode-se identificar os impactos com relação direta ou indireta ao rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana (MG).

Os indicadores do PMBA/Fest vêm se consolidando ao longo do monitoramento e, seguindo a proposta estabelecida desde o Relatório Anual de 2022 (RA2022), a apresentação dos resultados será exclusivamente a partir da apresentação dos indicadores, acompanhados de legenda estendida com a explicação de sua variação espaço-temporal de forma mais direta e objetiva como se segue:

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA GLOBAL PARA COMPREENSÃO DO APORTE DE ÁGUA DOCE E DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO AMBIENTE ESTUARINO-MARINHO DO RIO DOCE

#### 3.1.1 Produção De Água Na Bacia Do Rio Doce

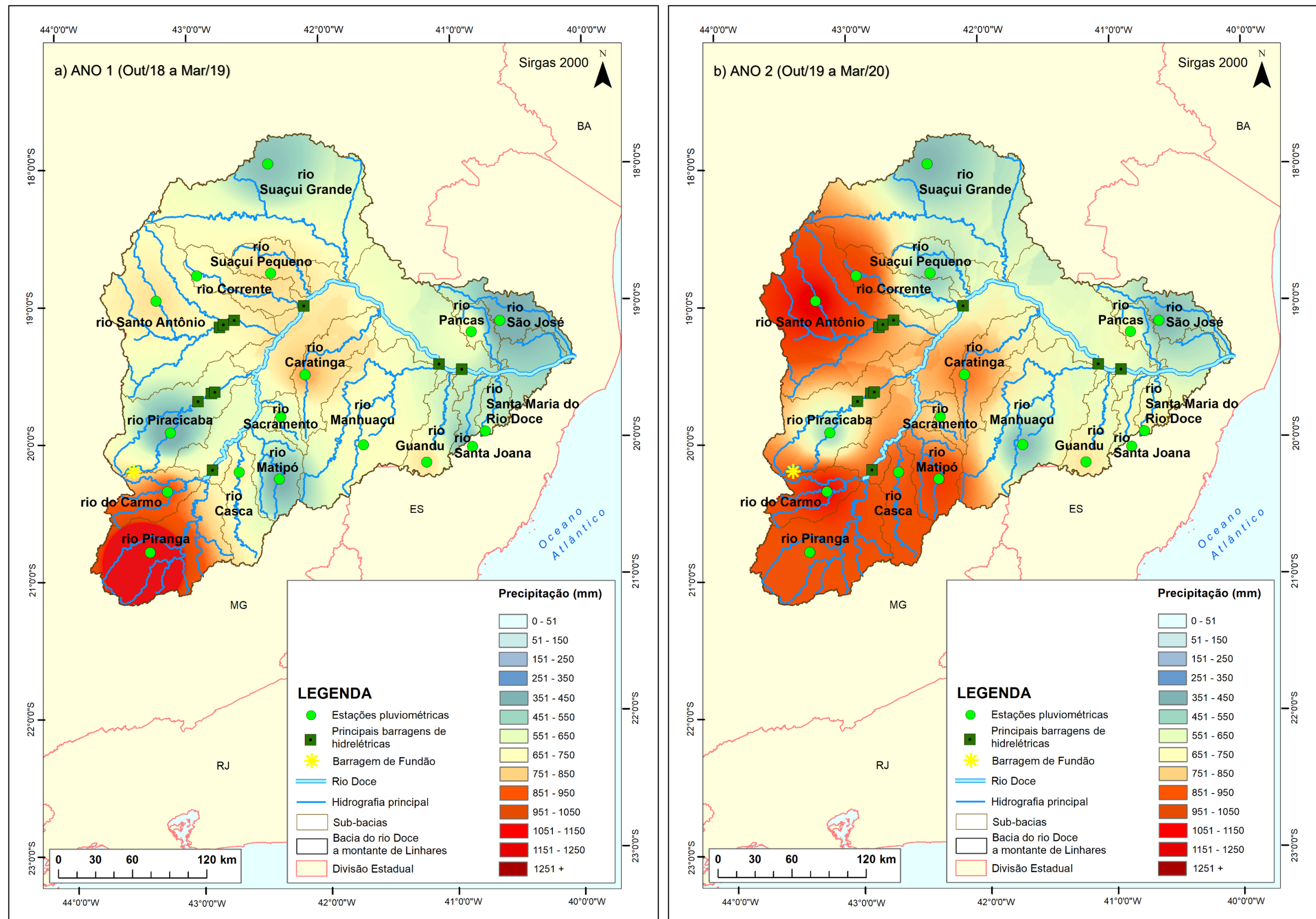
Tabela 17: Comparação das médias dos totais pluviométricos durante os períodos chuvoso e seco durante o PMBA/Fest

Região	Estação	MÉDIA DO TOTAL PLUVIOMÉTRICO (mm)										
		Ano 1 (Out/18 a Set/19)		Ano 2 (Out/19 a Set/20)		Ano 3 (Out/20 a Set/21)		Ano 4 (Out/21 a Set/22)		Ano 5 (Out/22 a Set/23)		Ano 6 (Out/23 a Jan/24)
		Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso (até janeiro/24)
Suaçuí Grande MG	Água Boa	486,8	132,2	490,1	257,4	956,2	75,4	1372,2	33,4	933,4	267,2	500,0
Suaçuí Pequeno MG	Sardoá	815,0	103,1	535,2	225,4	1011,2	165,2	1278	142,0	1587,8	260,2	805,1
Corrente MG	Guanhães	740,2	160,8	1028,4	335,9	604,3	88,8	697,8	43,0	848,6	231,8	710,2
Caratinga MG	PCH Inhapim	878,0	119,1	928,4	155,2	895	105,3	666,1	22,0	565,5	181	711,6
Santo Antônio MG	Dom Joaquim	804,0	177,7	1212,8	57,4	522	17	1349,2	70,4	1407,2	189,4	772,0
São José ES	São Domingos do Norte	344,1	182,2	479,0	210,4	846,26	161,13	1121,9	92,49	783,76	371,13	219,5
Pancas ES	Pancas	727,6	208,1	735,1	337,2	938,9	89,21	1115,6	128,2	900,13	455,91	537,1
Manhuaçu MG	Chalé	740,2	147,2	510,3	210,1	1261,2	53,94	1452	91,0	1223,6	123,4	400,8
Piracicaba MG	Piracicaba	404,8	33,8	573,7	105,4	867,8	49,4	1606,8	172,8	1620,2	136,6	814,6
Santa Maria do Rio Doce ES	Santa Teresa	642,7	147,4	763,3	283,7	1131,51	192,77	1191,1	211,9	720,19	113,41	721,9
Guandu ES	Afonso Cláudio	801,3	255,7	795,4	198,8	1102,93	205,32	973,9	95,8	1005,76	181,59	717,1
Santa Joana ES	Alto Rio Possmoser	403,5	155,8	620,8	270,1	863,51	207,91	1266,5	186,5	555,47	287,66	657,9
Sacramento MG	GCH Bom Jesus do Galho	637,6	134,0	794,7	190,3	880,8	44,2	1081,6	109,8	1078	159,8	423,4
Matipó MG	PCH Tulio Cordeiro de Mello	423,2	178,0	1057,4	145,4	877,2	55,4	1092,2	133	970,8	131,2	498,0
Casca MG	Rio Casca	784,0	290,0	967,4	168,4	1140	101,23	1059,6	94,4	1026,6	182,8	551,2
Carmo MG	PCH Furquim	947,9	427,2	1175,9	157,7	1029,2	89,5	1727,8	62,5	447,9	171,41	771,2
Piranga MG	Senhora de Oliveira	1253,0	294,8	972,4	238,6	1414,4	95,4	1653,4	265,8	1303,4	337,6	687,0
MÉDIA (mm)		696,11	185,12	802,38	208,67	961,32	105,71	1217,98	115,00	998,72	222,48	617,56

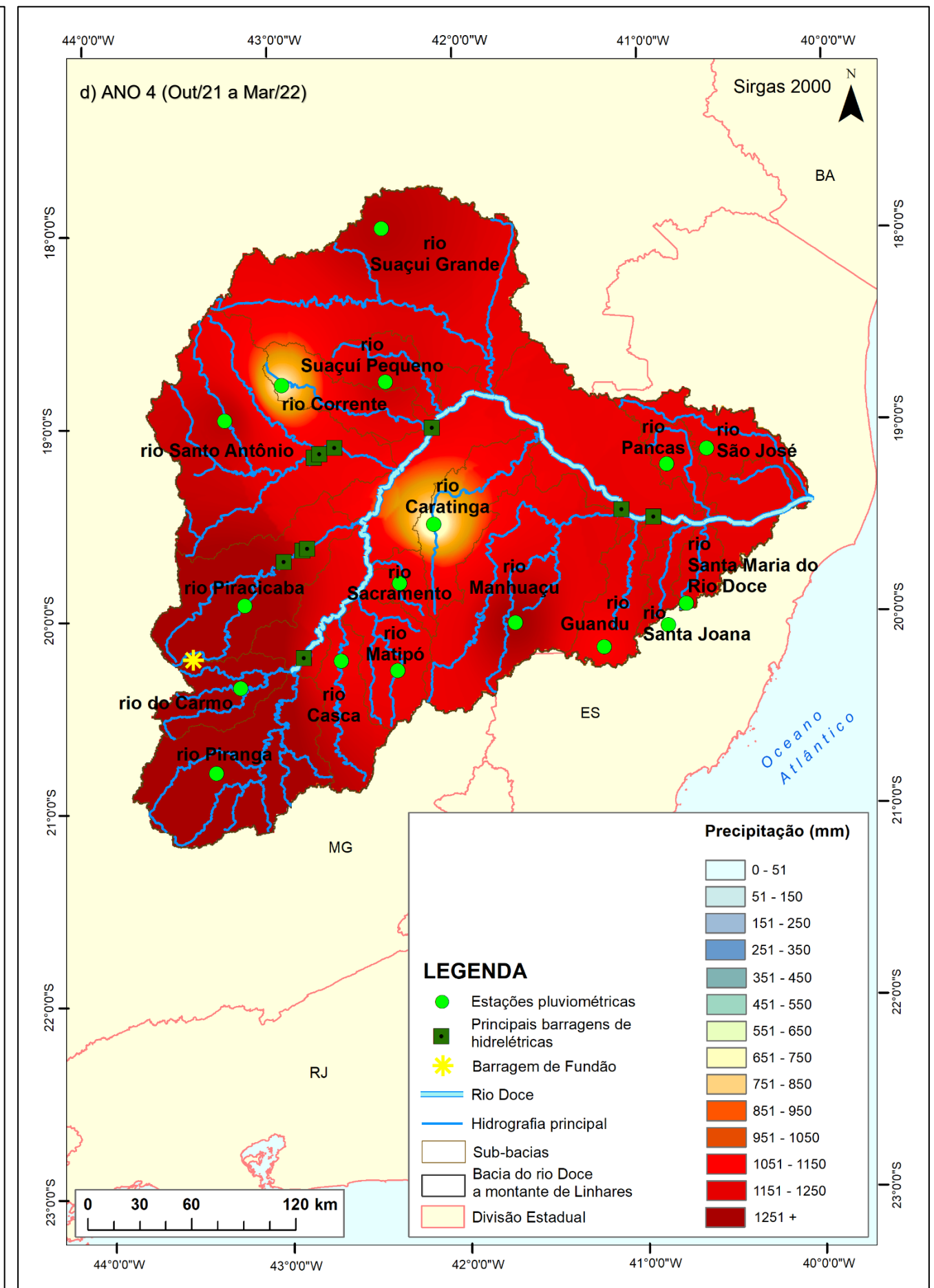
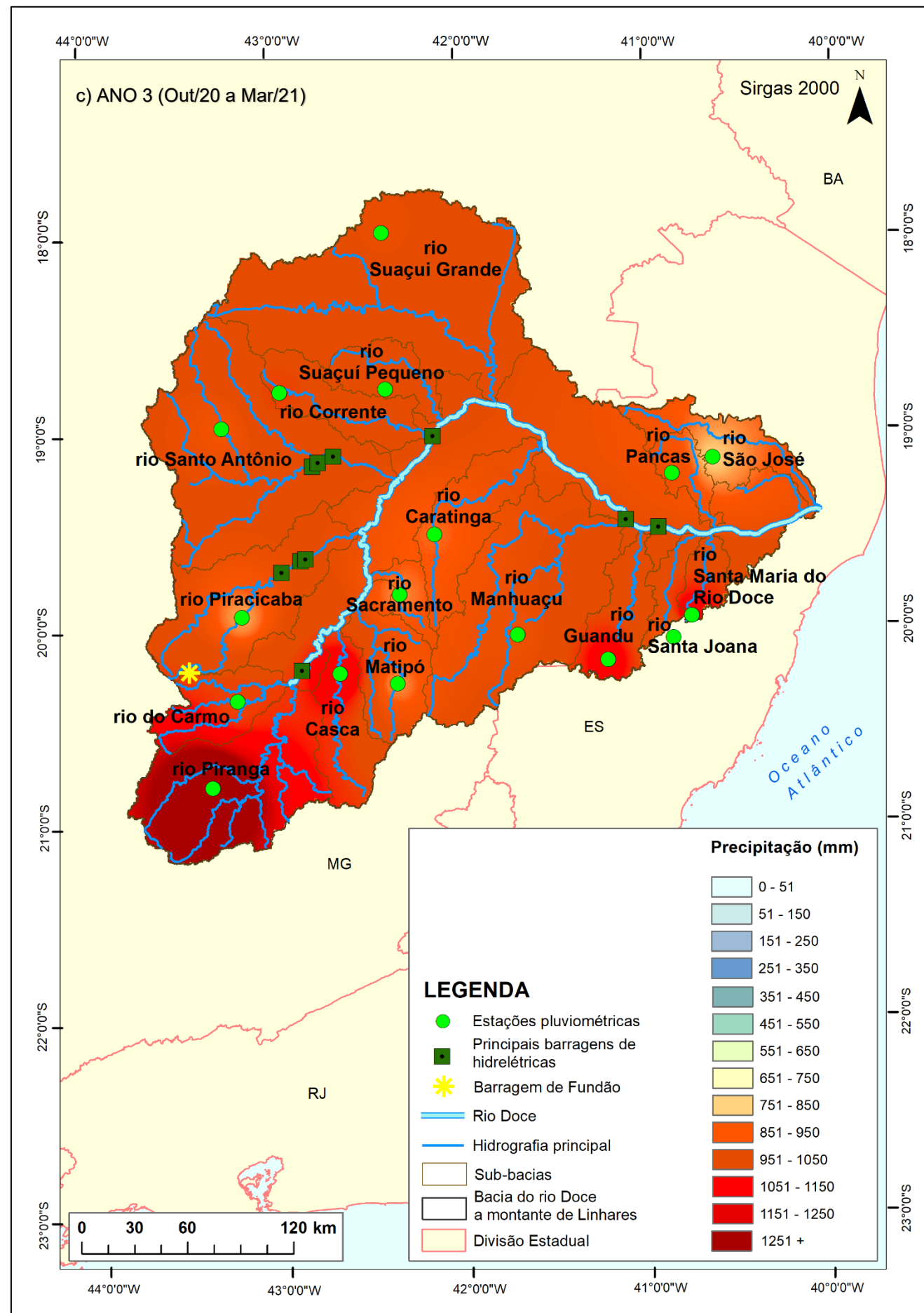
A comparação das médias dos totais pluviométricos em cada ano do PMBA/Fest (Tabela 17) é um importante fator, que faz parte da composição do indicador “Produção de Água na Bacia do Rio Doce”, uma vez que a chuva é necessária para alimentar o modelo SWAT, que faz a transformação da chuva em vazão, utilizando como base o ciclo hidrológico, que leva em consideração a declividade, os tipos de solos existentes na bacia e o uso e ocupação do território. Com a vazão simulada pelo modelo é possível calcular a produção de água na bacia. No Ano 1 do PMBA/Fest (Out/2018 a set/2019), as regiões com maiores médias foram as bacias do rio Piranga e do Carmo, bacias formadoras do Rio Doce (região de cabeceira); No Ano 2 (Out/2019 a set/2020) as maiores médias foram nas bacias do rio Santo Antônio e do Carmo. No Ano 3 (Out/2020 a set/2021) as maiores médias foram nas bacias do rio Piranga e Santa Maria do Rio Doce, no ES. Para o Ano 4 (Out/2021 a set/2022), repetiram-se as bacias com maiores médias no Ano 1, do rio do Carmo e do rio Piranga. E no Ano 5 (Out/2022 a set/2023) as bacias com maiores médias foram as do rio Suaçuí Pequeno e do rio Santo Antônio, em Minas Gerais. O período chuvoso do Ano 6 (Out/2023 a set/2024) foi avaliado apenas até janeiro de 2024. Tendo em vista que os meses de fevereiro e março concentram um grande quantitativo de precipitação pluviométrica, e que a cada ano os valores podem variar mensalmente, é importante ressaltar que os valores existentes na última coluna da Tabela 17, deixados em destaque na cor vermelha não contemplaram a totalidade do período chuvoso, e, por se tratar de uma somatória de precipitação pluviométrica, deve-se ter cuidado em sua análise, evitando uma comparação direta com os demais períodos chuvosos.

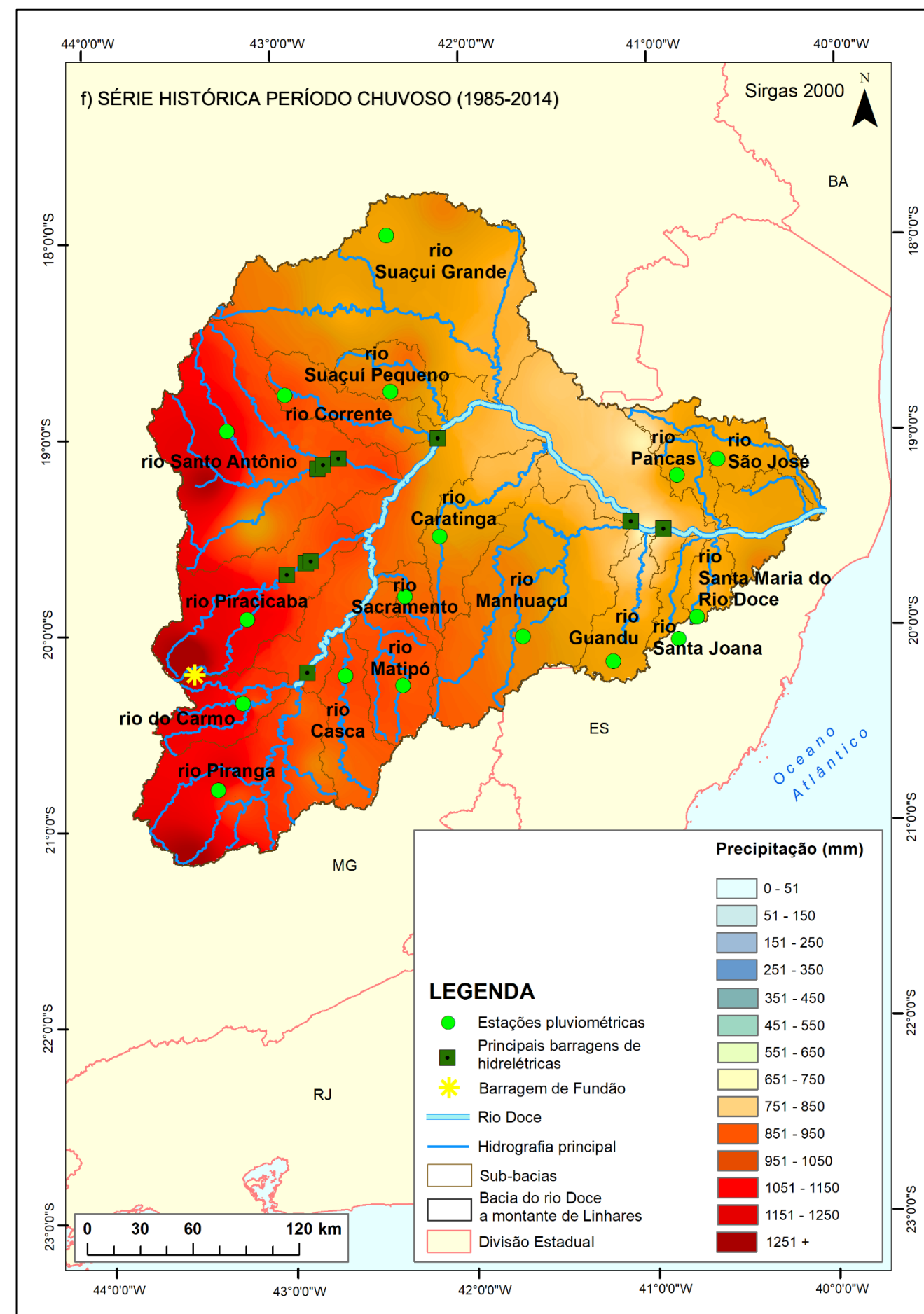
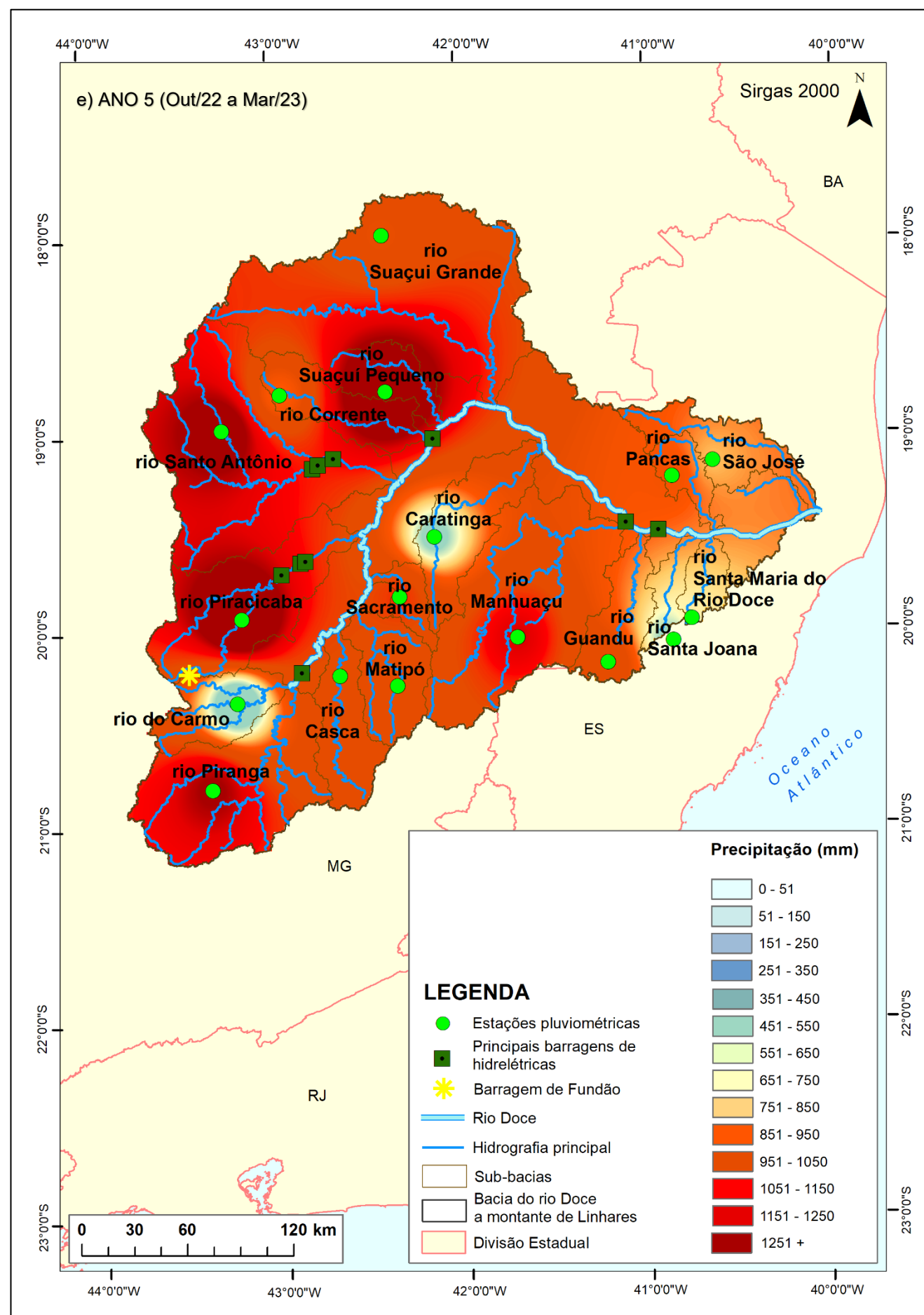


Figura 25: Interpolação IDW da distribuição de chuva na Bacia do Rio Doce no período chuvoso de cada ano do PMBA/Fest e da série histórica pré-rompimento (1985-2014) a) Ano 1 (outubro de 2018 a setembro de 2019); b) Ano 2 (outubro de 2019 a março de 2020); c) Ano 3 (outubro de 2020 a março de 2021); d) Ano 4 (outubro de 2021 a março de 2022); e) Ano 5 (outubro de 2022 a março de 2023) e f) Série histórica pré-rompimento (1985-2014).

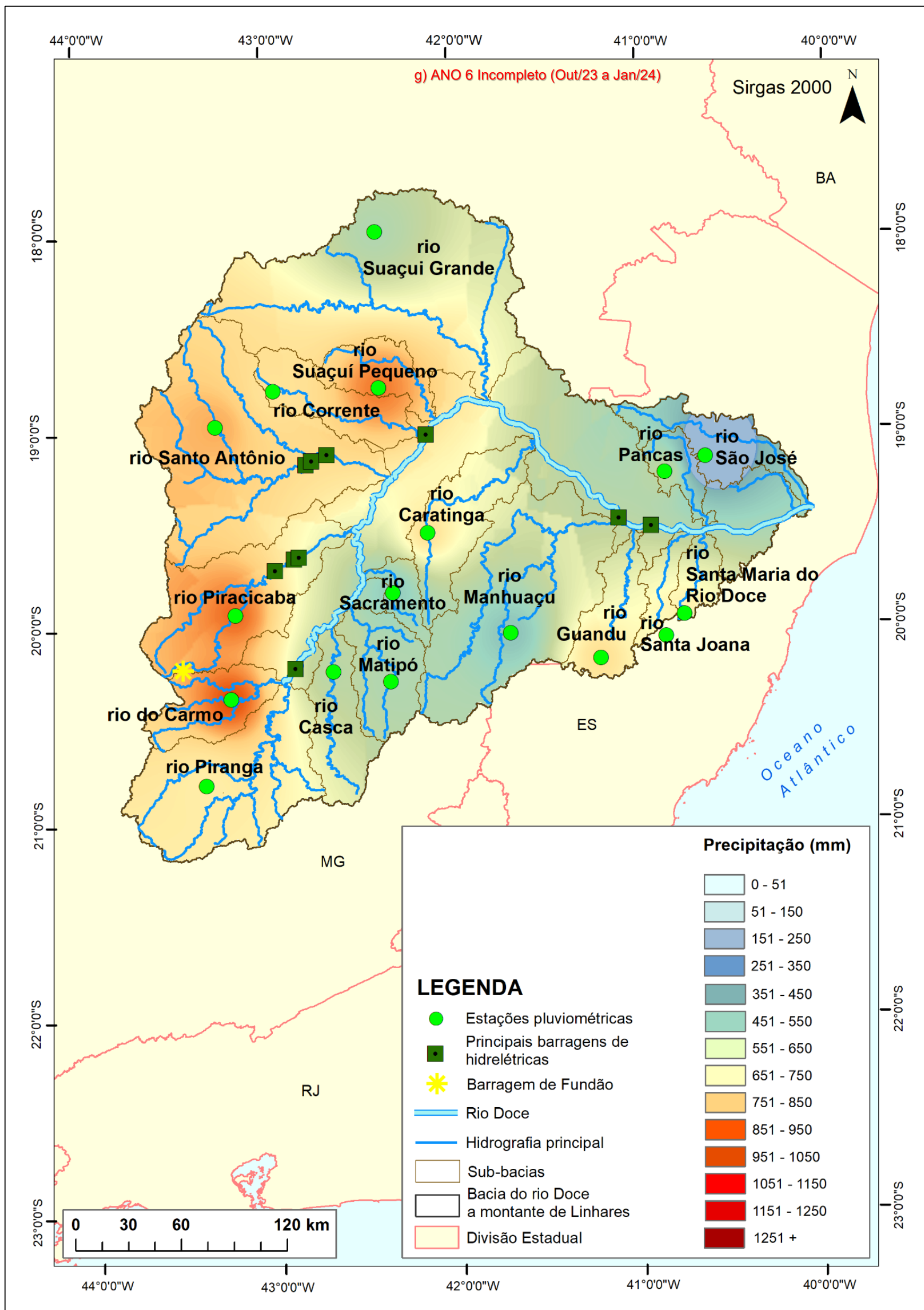






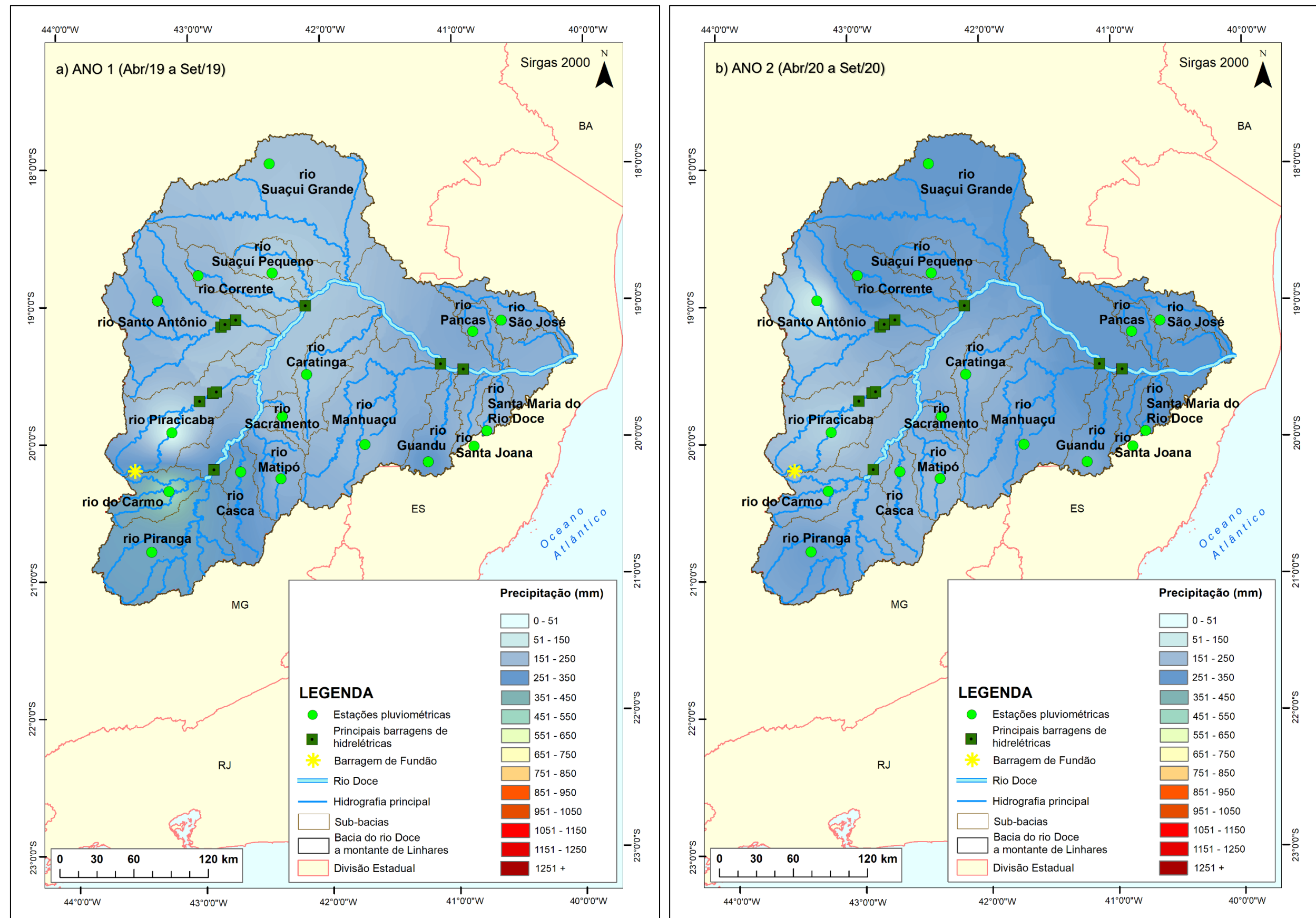




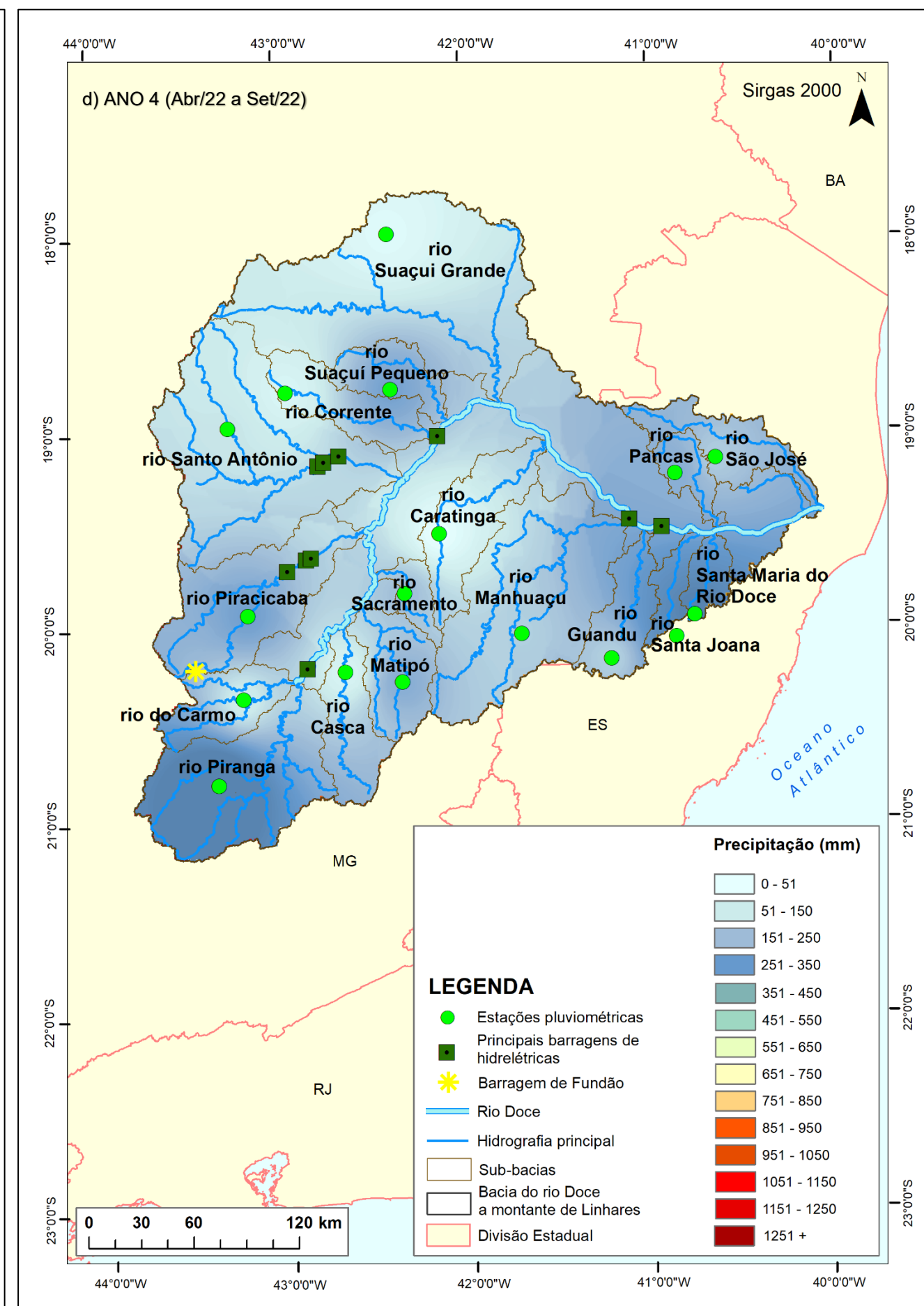
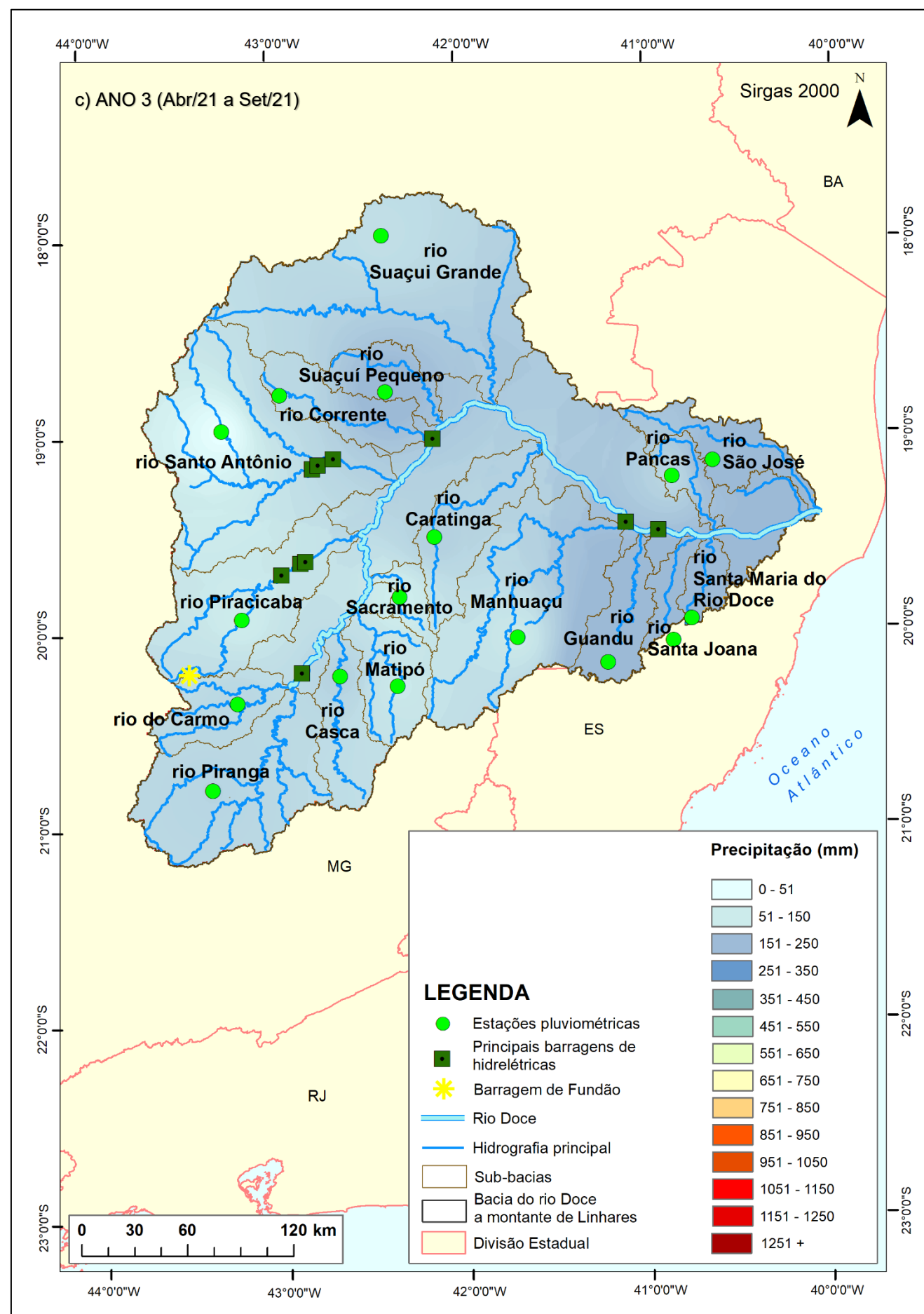


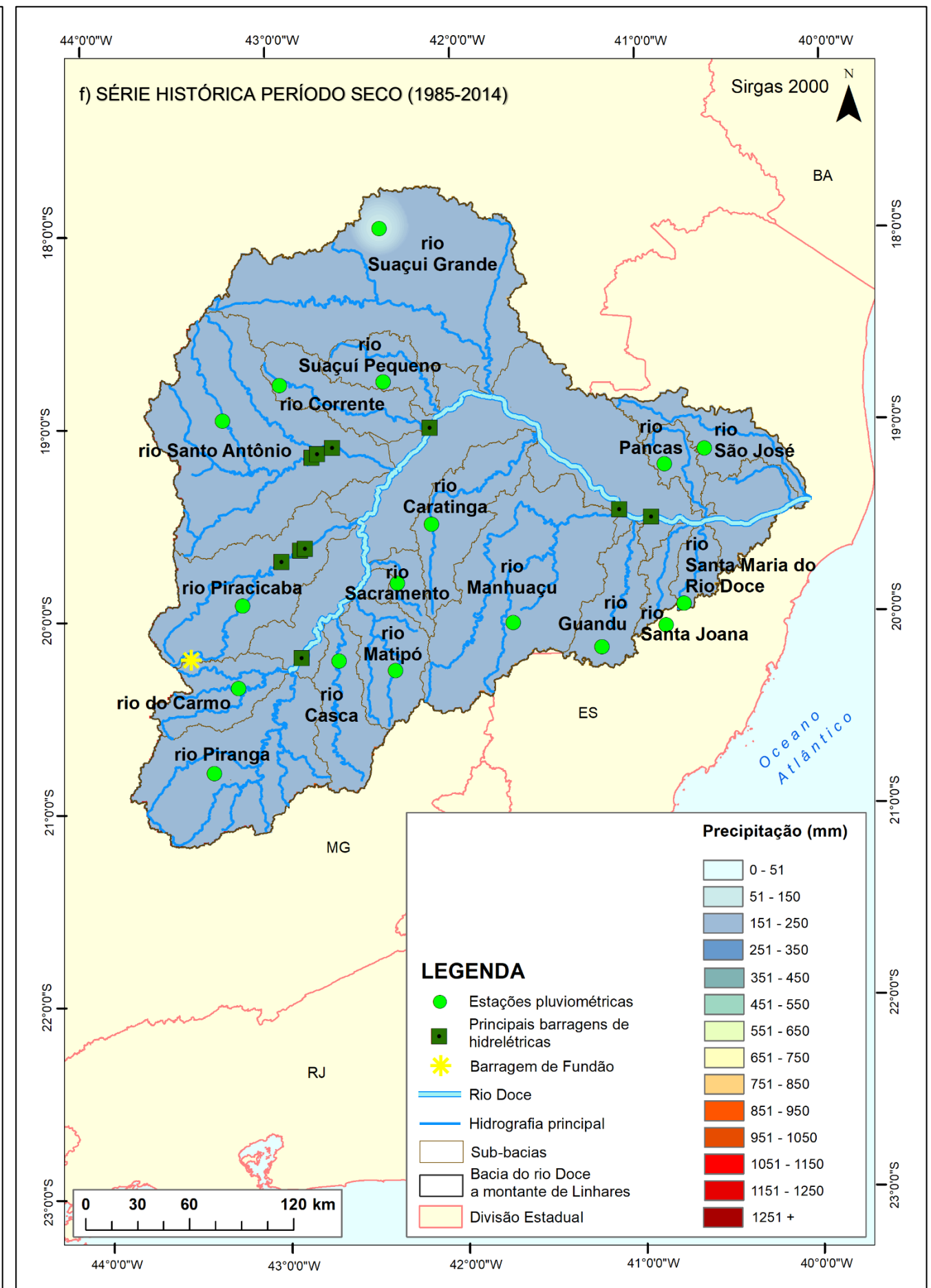
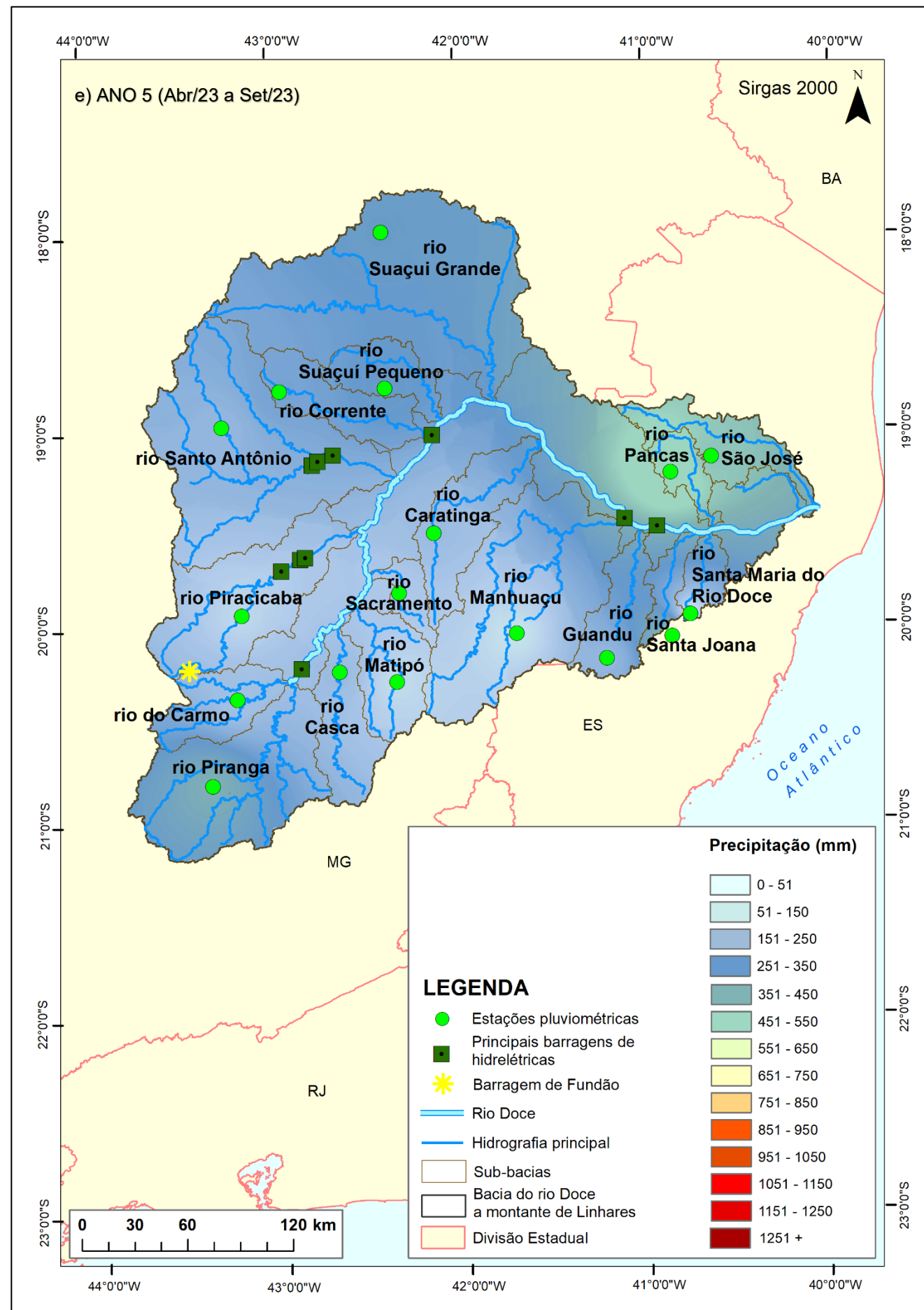
A Figura 25 representa a distribuição espaço-temporal da chuva nos períodos chuvosos do PMBA/Fest e o período chuvoso da série histórica pré-rompimento, que correspondem aos meses de outubro de um ano a março do outro, com exceção do Ano 6 do PMBA, que somente foi avaliado até o mês de janeiro de 2024. A região de cabeceira da bacia, onde se encontram os rios Santo Antônio e Piracicaba, e os rios formadores do Rio Doce – do Carmo e Piranga, é onde mais chove na bacia do Rio Doce. No Ano 1 (outubro de 2018 a março de 2019) ocorreu maior precipitação pluviométrica nas bacias dos rios Piranga e do Carmo, no Ano 2 (outubro de 2019 a março de 2020) nas bacias dos rios Santo Antônio e do Carmo, no Ano 3 (outubro de 2020 a março de 2021) nas bacias dos rios Piranga e em uma parte do ES (bacias dos rios Santa Maria do Rio Doce e Guandu) e no Ano 4 (outubro de 2021 a março de 2022) as maiores chuvas ocorreram nas bacias dos rios Piranga e Piracicaba. O Ano 1 (outubro de 2018 a março de 2019) foi menos chuvoso que a série histórica pré-rompimento, sendo este o ano em que menos choveu durante os anos de realização do PMBA/Fest. O Ano 2 (outubro de 2019 a março de 2020) continuou menos chuvoso que o período chuvoso da série histórica e o Ano 3 (outubro de 2020 a março de 2021) teve o período chuvoso que mais se aproximou da série histórica pré-rompimento. O período chuvoso do Ano 4 (outubro 2021 de a março de 2022) ficou acima da média da série histórica em quase toda a bacia do Rio Doce e já no período chuvoso do Ano 5 (outubro 2022 de a março de 2023) algumas áreas choveram mais que a série histórica enquanto outras choveram bem menos, como pode ser observado nas bacias dos rios do Carmo e Caratinga. O mapa da Figura 25 G, período chuvoso do Ano 6 (outubro de 2023 a março de 2024), não está completo, contendo apenas o período de outubro de 2023 a janeiro de 2024, portanto, o mesmo não deve ser considerado para efeito de comparação com os demais mapas de períodos chuvosos, uma vez que se trata de uma acumulação de dados de precipitação pluviométrica (ou seja, um somatório), e como não foram adicionados os meses de fevereiro e março, pode parecer que houve um déficit hídrico na bacia, o que não é verdade.

Figura 26: Interpolação IDW da distribuição de chuva na Bacia do Rio Doce no período seco de cada ano do PMBA/Fest e da série histórica pré-rompimento (1985-2014) a) Ano 1 (abril a setembro de 2019); b) Ano 2 (abril a setembro de 2020); c) Ano 3 (abril a setembro de 2021); d) Ano 4 (abril a setembro de 2022); e) Ano 5 (abril a setembro de 2023) e f) Série histórica pré-rompimento (1985-2014).





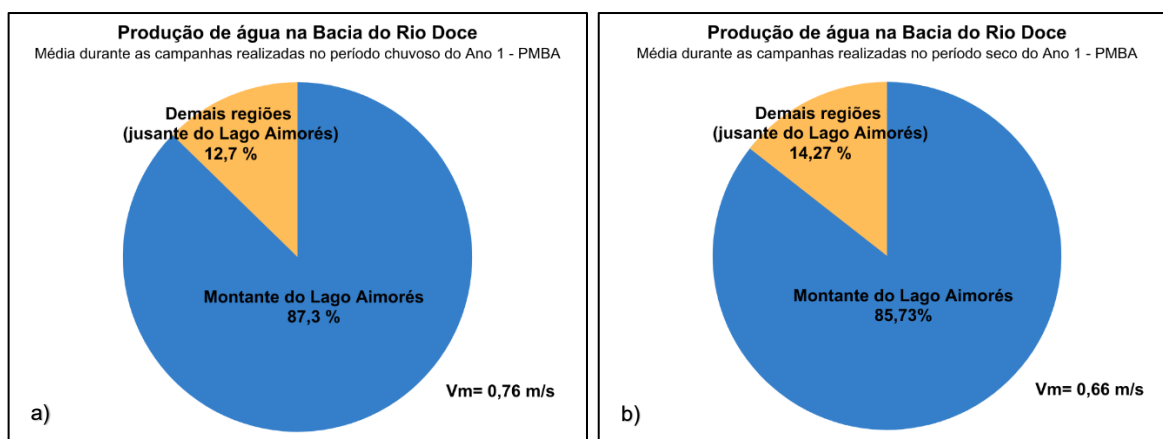






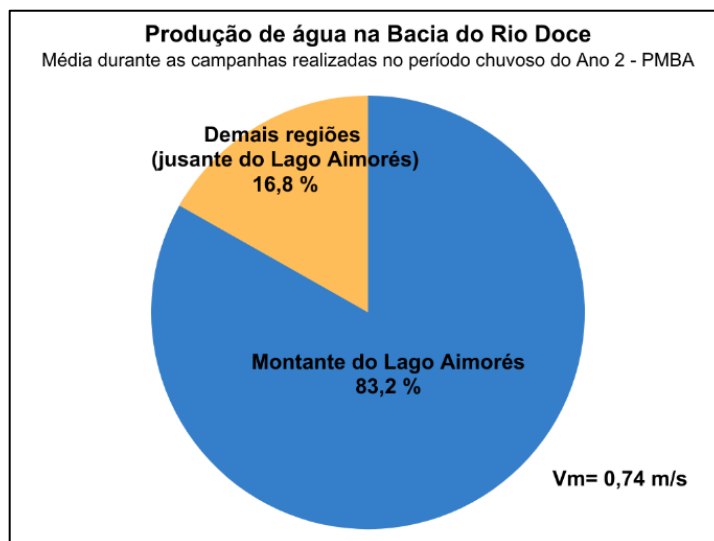
A Figura 26 representa a distribuição espaço-temporal da chuva nos períodos secos do PMBA/Fest e o período seco da série histórica pré-rompimento. Espacialmente, no Ano 1 (abril a setembro de 2019) choveu menos na região da bacia do rio Piracicaba, no Ano 2 (abril a setembro de 2020) foi menor a precipitação pluviométrica na bacia do rio Santo Antônio, no Ano 3 (abril a setembro de 2021) as bacias com menor quantidade de chuva foram as do rio Santo Antônio seguida pela do rio Sacramento, em MG. Já no Ano 4 (abril a setembro de 2022) as regiões com menor precipitação foram as dos rios Caratinga e Corrente, em MG. Entre os períodos secos dos anos monitorados pelo PMBA/Fest, o Ano 3 (abril a setembro de 2021) foi o que teve menos chuvas (Figura 26c), com uma média mensal de 105 mm. O Ano 4 (abril a setembro de 2022) teve uma média mensal de 115 mm, o Ano 1 (abril a setembro de 2019) uma média mensal de 185,12 mm e o ano com mais precipitação no período seco foi o Ano 2 (abril a setembro de 2020), com 208,67 mm.

Figura 27: Produção de água na bacia do Rio Doce a montante e a jusante do Lago do reservatório Aimorés para o Ano 1 do PMBA/Fest (outubro de 2018 a setembro de 2019) a) Período chuvoso do Ano 1 (outubro de 2018 a março de 2019); b) Período seco do Ano 1 (abril a setembro de 2019).



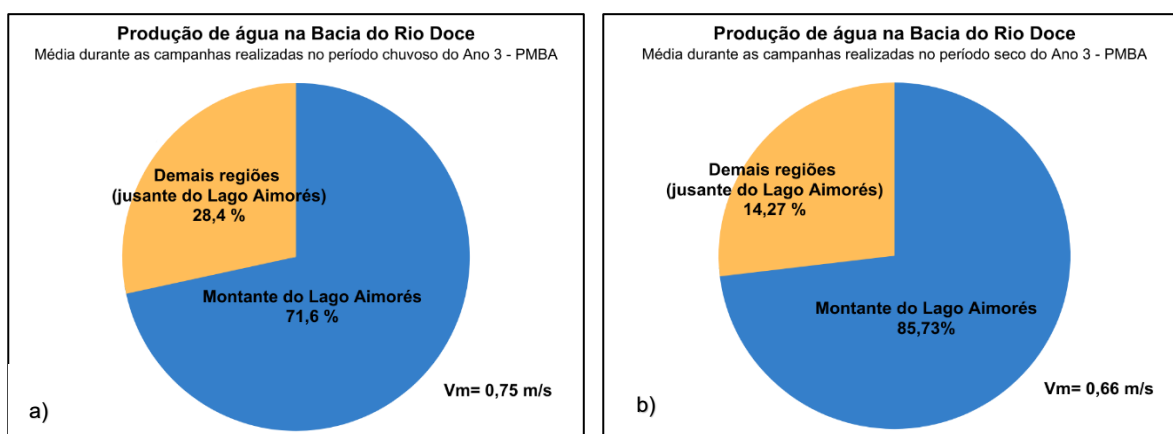
Durante as campanhas realizadas no Ano 1 do PMBA/Fest (outubro de 2018 a setembro de 2019), a média de produção de água advinda de montante do Lago Aimorés, ou seja, da parte alta da bacia (porção mineira), que aportaram na foz do Rio Doce, no período chuvoso (outubro de 2018 a março de 2019) foi de 87,3 % e no período seco foi de 85,73%. Já a velocidade média no período seco do Ano 1 (abril a setembro de 2019) foi de 0,76 m/s, enquanto no período seco foi de 0,66 m/s. Durante o Ano 1 houve campanha de monitoramento em todos os meses (Figura 27).

Figura 28: Produção de água na bacia do Rio Doce a montante e a jusante do Lago do reservatório Aimorés para o período chuvoso do Ano 2 do PMBA/Fest (novembro de 2019 a março de 2020).



Durante as campanhas realizadas no Ano 2 do PMBA/Fest (novembro de 2019 a março de 2020), a média de produção de água advinda de montante do Lago Aimorés, ou seja, da parte alta da bacia (porção mineira), que aportaram na foz do Rio Doce, no período chuvoso foi de 83,2 %, com velocidade média das águas de 0,74 m/s. Observando que não houve campanha no mês de outubro de 2019, e no período seco do Ano 2 não foram realizadas campanhas de monitoramento, devido à pandemia de COVID-19 (Figura 28).

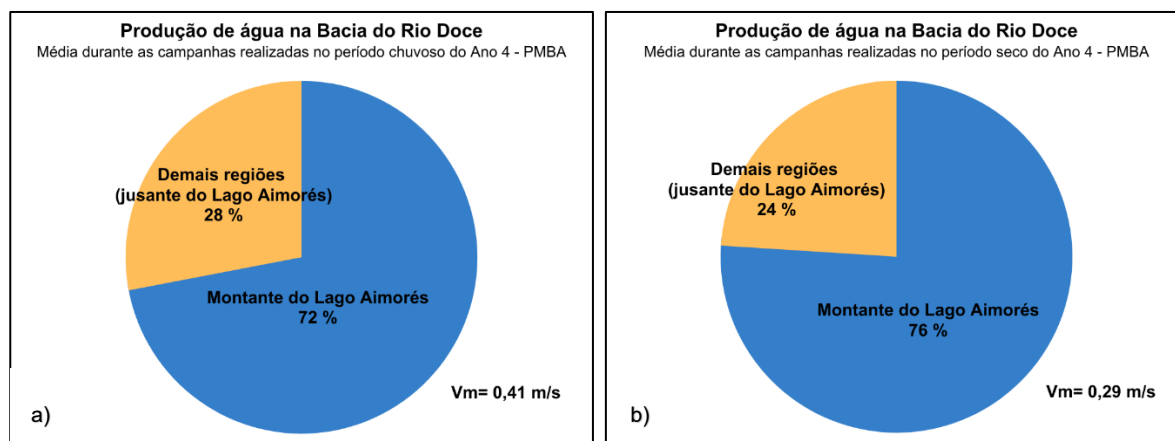
Figura 29: Produção de água na bacia do Rio Doce a montante e a jusante do Lago do reservatório Aimorés para o Ano 3 do PMBA/Fest (outubro de 2020 a setembro de 2021) a) Período chuvoso do Ano 3 (outubro de 2020 a março de 2021); b) Período seco do Ano 3 (abril a setembro de 2021).



Durante as campanhas realizadas no Ano 3 do PMBA/Fest (outubro de 2020 a março de 2021), a média de produção de água advinda de montante do Lago Aimorés, ou seja, da parte alta da bacia (porção mineira), que aportaram na foz do Rio Doce, no período chuvoso foi de 71,6 % com velocidade médias

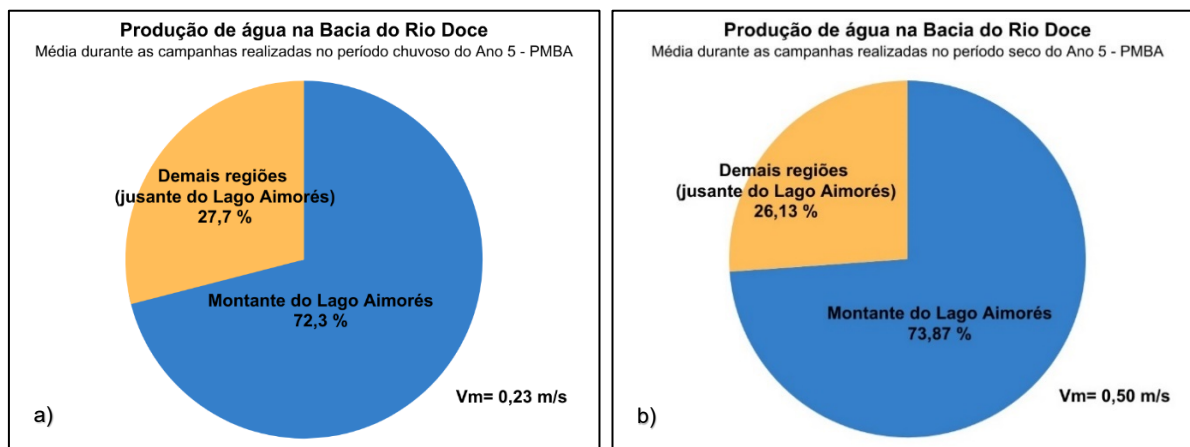
das águas de 0,75 m/s, observando que o período chuvoso corresponde aos meses de outubro a março, sendo que no Ano 3 só foram realizadas campanhas de monitoramento durante os meses de dezembro, janeiro e fevereiro no período chuvoso. Já no período seco foram realizadas campanhas de monitoramento em todos os meses correspondentes (abril a setembro de 2021) e a média de produção de água advinda de montante do Lago Aimorés que aportaram na foz do Rio Doce foi de 85,3 %, com velocidade média das águas de 0,66 m/s (Figura 29).

Figura 30: Produção de água na bacia do Rio Doce a montante e a jusante do Lago do reservatório Aimorés para o Ano 4 do PMBA/Fest (outubro de 2021 a setembro de 2022) a) Período chuvoso do Ano 4 (outubro de 2021 a março de 2022); b) Período seco do Ano 4 (abril a setembro de 2022).



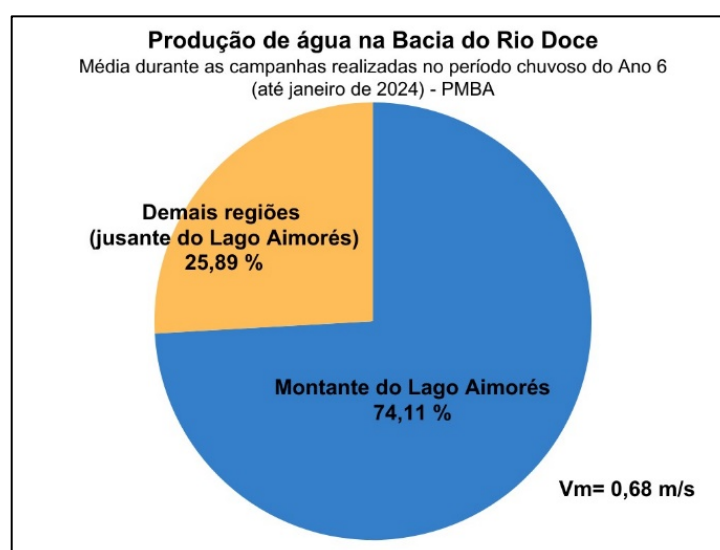
Durante as campanhas realizadas no Ano 4 do PMBA/Fest (outubro de 2021 a março de 2022), a média de produção de água advinda de montante do Lago Aimorés, ou seja, da parte alta da bacia (porção mineira), que aportaram na foz do Rio Doce, no período chuvoso foi de 72 %, com velocidade média das águas de 0,41 m/s, observando que o período chuvoso corresponde aos meses de outubro a março. No Ano 4 foram realizadas campanhas de monitoramento em quase todos os meses do período chuvoso, com exceção do mês de outubro. Já no período seco foram realizadas campanhas de monitoramento somente nos meses abril, maio e agosto, conforme o cronograma estipulado. A média de produção de água advinda de montante do Lago Aimorés que aportaram na foz do Rio Doce no período seco do Ano 4 (abril a setembro de 2022) foi de 76 % e a velocidade média das águas foi de 0,29 m/s (Figura 30).

Figura 31: Produção de água na bacia do Rio Doce a montante e a jusante do Lago do reservatório Aimorés para o Ano 5 do PMBA/Fest (outubro de 2022 a setembro de 2023) a) Período chuvoso do Ano 5; b) Período seco do Ano 5.



Durante as campanhas realizadas no Ano 5 do PMBA/Fest, a média de produção de água advinda de montante do Lago Aimorés, ou seja, da parte alta da bacia (porção mineira), que aportaram na foz do Rio Doce, no período chuvoso foi de 72,3 %, com velocidade média das águas de 0,23 m/s. Durante o Ano 5 houve campanha de monitoramento em todos os meses do período chuvoso (outubro de 2022 a março de 2023). Já durante o período seco foram realizadas campanhas de monitoramento somente nos meses maio, julho e setembro, conforme o cronograma estipulado. A média de produção de água advinda de montante do Lago Aimorés que aportaram na foz do Rio Doce foi de 73,87% e a velocidade média das águas de 0,50 m/s (Figura 31).

Figura 32. Produção de água na bacia do Rio Doce a montante e a jusante do Lago do reservatório Aimorés para o período chuvoso (incompleto) Ano 6 do PMBA/Fest (outubro de 2023 a janeiro de 2024).



Durante as campanhas realizadas no período chuvoso do Ano 6 do PMBA/Fest (outubro de 2023 a janeiro de 2024), a média de produção de água advinda de montante do Lago Aimorés, ou seja, da parte alta da bacia (porção mineira), que aportaram na foz do Rio Doce foi de 74,11 %, com velocidade média das águas de 0,68 m/s. Observando que não foram considerados os meses de fevereiro e março do período chuvoso neste relatório (Figura 32).

Tabela 18: Tempos de detenção estimados, em dias, para o reservatório da UHE Aimorés nos 7 dias que antecederam as campanhas (Variável auxiliar do indicador “Produção de Água na Bacia do Rio Doce”).

Período que antecede cada campanha	Tempo de detenção (dias)
Antes da campanha 1 (15 a 21 de outubro de 2018)	12,3
Antes da campanha 2 (12 a 18 de novembro de 2018)	5,0
Antes da campanha 3 (3 a 9 de dezembro de 2018)	8,7
Antes da campanha 4 (7 a 13 de janeiro de 2019)	4,4
Antes da campanha 5 (4 a 10 de fevereiro de 2019)	7,8
Antes da campanha 6 (11 a 17 de março de 2019)	7,8
Antes da campanha 7 (1 a 7 de abril de 2019)	7,5
Antes da campanha 8 (6 a 12 de maio de 2019)	9,0
Antes da campanha 9 (3 a 9 de junho de 2019)	11,3
Antes da campanha 10 (8 a 14 de julho de 2019)	13,9
Antes da campanha 11 (5 a 11 de agosto de 2019)	15,3
Antes da campanha 12 (9 a 15 de setembro de 2019)	16,1
Antes da campanha 13 (18 a 24 de novembro de 2019)	5,0
Antes da campanha 14 (2 a 8 de dezembro de 2019)	1,5
Antes da campanha 15 (13 a 19 de janeiro de 2020)	5,5
Antes da campanha 16 (27 de janeiro a 2 de fevereiro de 2020)	0,8
Antes da campanha 17 (9 a 15 de março de 2020)	2,0
Antes da campanha 27 (7 a 13 de dezembro de 2021)	2,3
Antes da campanha 28 (4 a 10 de janeiro de 2021)	1,8
Antes da campanha 29 (3 a 9 de fevereiro de 2021)	5,0
Antes da campanha 31 (19 a 25 de abril de 2021)	5,3
Antes da campanha 32 (3 a 9 de maio de 2021)	5,7
Antes da campanha 33 (7 a 13 de junho de 2021)	7,0
Antes da campanha 34 (5 a 11 de julho de 2021)	7,7
Antes da campanha 35 (9 a 15 de agosto de 2021)	11,7
Antes da campanha 36 (13 a 19 de setembro de 2021)	14,8
Antes da campanha 38 (1 a 7 de novembro de 2021)	2,0
Antes da campanha 39 (6 a 12 de dezembro de 2021)	1,8
Antes da campanha 40 (18 a 24 de janeiro de 2022)	1,8
Antes da campanha 41 (7 a 13 de fevereiro de 2022)	1,0
Antes da campanha 42 (7 a 13 de março de 2022)	2,3
Antes da campanha 43 (28 de março a 3 de abril de 2022)	3,4
Antes da campanha 44 (2 a 8 de maio de 2022)	4,0
Antes da campanha 45 (15 a 21 de agosto de 2022)	7,1

Período que antecede cada campanha	Tempo de detenção (dias)
Antes da campanha 46 (26 de setembro a 2 de outubro de 2022)	7,5
Antes da campanha 47 (31 de outubro a 6 de novembro de 2022)	4,7
Antes da campanha 48 (5 a 11 de dezembro de 2022)	1,9
Antes da campanha 49 (2 a 8 de janeiro de 2023)	1,6
Antes da campanha 50 (30 de janeiro a 5 de fevereiro de 2023)	1,5
Antes da campanha 51 (27 de fevereiro a 5 de março de 2023)	3,3
Antes da campanha 52 (1 a 7 de maio de 2023)	3,6
Antes da campanha 53 (3 a 9 de julho de 2023)	6,9
Antes da campanha 54 (4 a 10 de setembro de 2023)	5,5
Antes da campanha 55 (25 de setembro a 1 de outubro de 2023)	8,4
Antes da campanha 56 (30 de outubro a 5 de novembro de 2023)	5,1
Antes da campanha 57 (4 a 10 de dezembro de 2023)	7,0
Antes da campanha 58 (1 a 7 de janeiro de 2024)	2,4

Os tempos de detenção para o lago de Aimorés durante todo o PMBA/Fest foram calculados com a finalidade de mostrar a influência deste nas vazões que aportam na foz da bacia do Rio Doce. Nas semanas que antecederam as campanhas de monitoramento (Tabela 18) os tempos de detenção variaram ao longo do PMBA/Fest de menos de 1 dia (0,8) a mais de 16 dias (16,1).

Tabela 19: Tempos de detenção estimados, em dias, para o reservatório da UHE Aimorés durante as campanhas (Variável auxiliar do indicador “Produção de Água na Bacia do Rio Doce”).

Período da campanha	Tempo de detenção (dias)
Campanha 1 (22 a 27 de outubro de 2018)	9,6
Campanha 2 (19 a 23 de novembro de 2018)	6,2
Campanha 3 (10 a 14 de dezembro de 2018)	3,0
Campanha 4 (14 a 18 de janeiro de 2019)	7,6
Campanha 5 (11 a 15 de fevereiro de 2019)	6,8
Campanha 6 (18 a 22 de março de 2019)	4,3
Campanha 7 (8 a 12 de abril de 2019)	5,7
Campanha 8 (13 a 17 de maio de 2019)	8,1
Campanha 9 (10 a 14 de junho de 2019)	10,8
Campanha 10 (15 a 19 de julho de 2019)	15,0
Campanha 11 (12 a 16 de agosto de 2019)	15,8
Campanha 12 (16 a 20 de setembro de 2019)	17,4
Campanha 13 (25 a 28 de novembro de 2019)	4,6
Campanha 14 (9 a 12 de dezembro de 2019)	1,8
Campanha 15 (20 a 23 de janeiro de 2020)	2,9
Campanha 16 (3 a 6 de fevereiro de 2020)	2,4
Campanha 17 (16 e 17 de março de 2020)	0,9
Campanha 27 (14 a 17 de dezembro de 2021)	2,3
Campanha 28 (11 a 14 de janeiro de 2021)	2,5

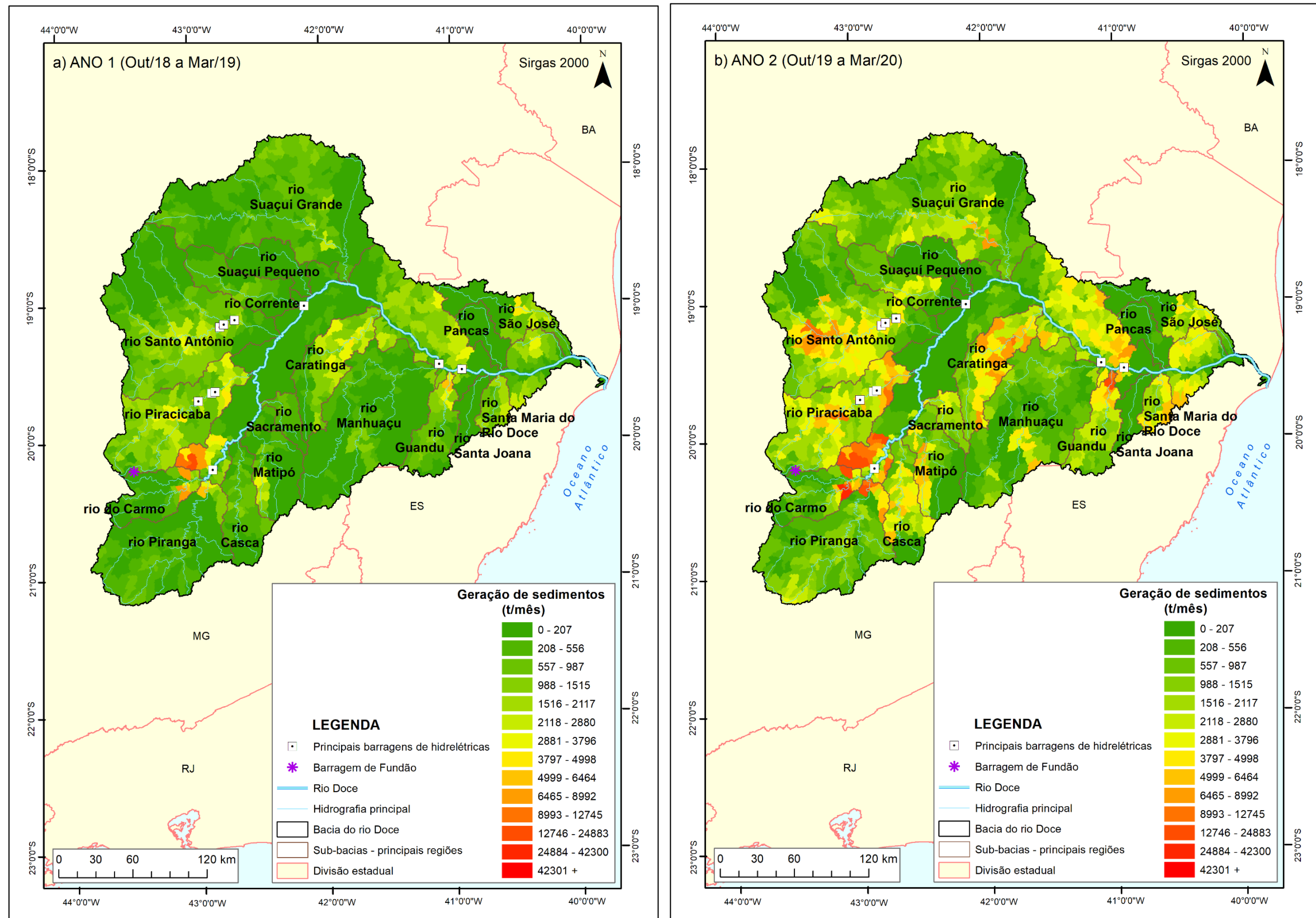
Período da campanha	Tempo de detenção (dias)
Campanha 29 (10 a 13 de fevereiro de 2021)	2,0
Campanha 31 (26 a 29 de abril de 2021)	5,9
Campanha 32 (10 a 13 de maio de 2021)	6,4
Campanha 33 (14 a 17 de junho de 2021)	7,3
Campanha 34 (12 a 15 de julho de 2021)	9,7
Campanha 35 (16 a 19 de agosto de 2021)	10,2
Campanha 36 (20 a 23 de setembro de 2021)	14,8
Campanha 38 (8 a 11 de novembro de 2021)	2,6
Campanha 39 (13 a 16 de dezembro de 2021)	2,2
Campanha 40 (25 a 28 de janeiro de 2022)	2,8
Campanha 41 (14 a 18 de fevereiro de 2022)	0,8
Campanha 42 (14 a 17 de março de 2022)	2,8
Campanha 43 (4 a 7 de abril de 2022)	3,5
Campanha 44 (9 a 12 de maio de 2022)	3,9
Campanha 45 (22 a 25 de agosto, 29 e 31 de agosto e 1 de setembro de 2022)	7,7
Campanha 46 (3 a 7 de outubro de 2022)	5,8
Campanha 47 (7 a 11 de novembro de 2022)	4,3
Campanha 48 (12 a 16 de dezembro de 2022)	1,8
Campanha 49 (8 a 12 de janeiro de 2023)	0,6
Campanha 50 (6 a 10 de fevereiro de 2023)	2,2
Campanha 51 (6 a 10 de março de 2023)	3,9
Campanha 52 (8 a 12 de maio de 2023)	4,7
Campanha 53 (10 a 14 de julho de 2023)	6,9
Campanha 54 (11 a 15 de setembro de 2023)	6,9
Campanha 55 (2 a 6 de outubro de 2023)	-
Campanha 56 (6 a 10 de novembro de 2023)	4,6
Campanha 57 (11 a 14 de dezembro de 2023)	7,9
Campanha 58 (8 a 12 de janeiro de 2024)	2,4

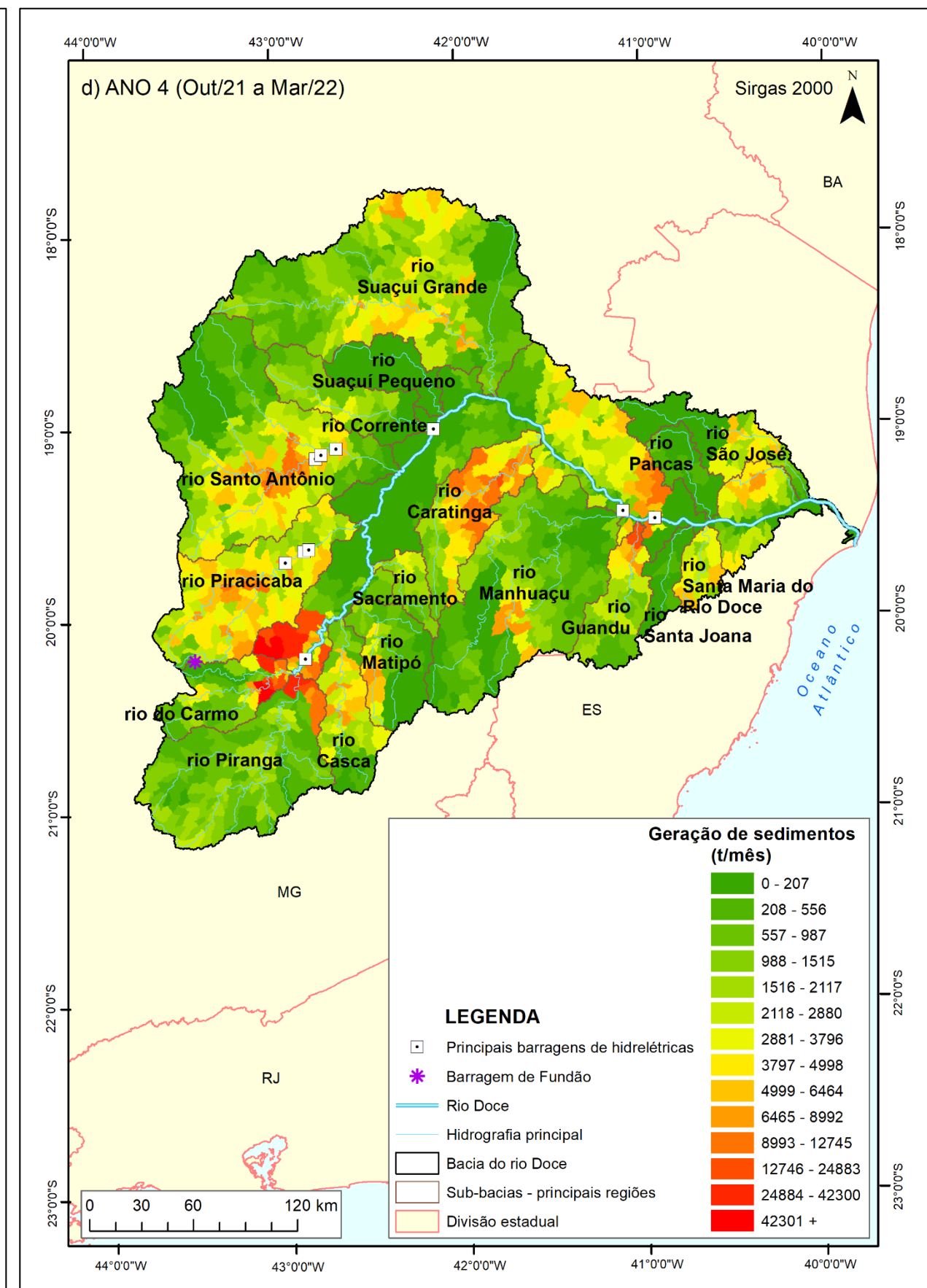
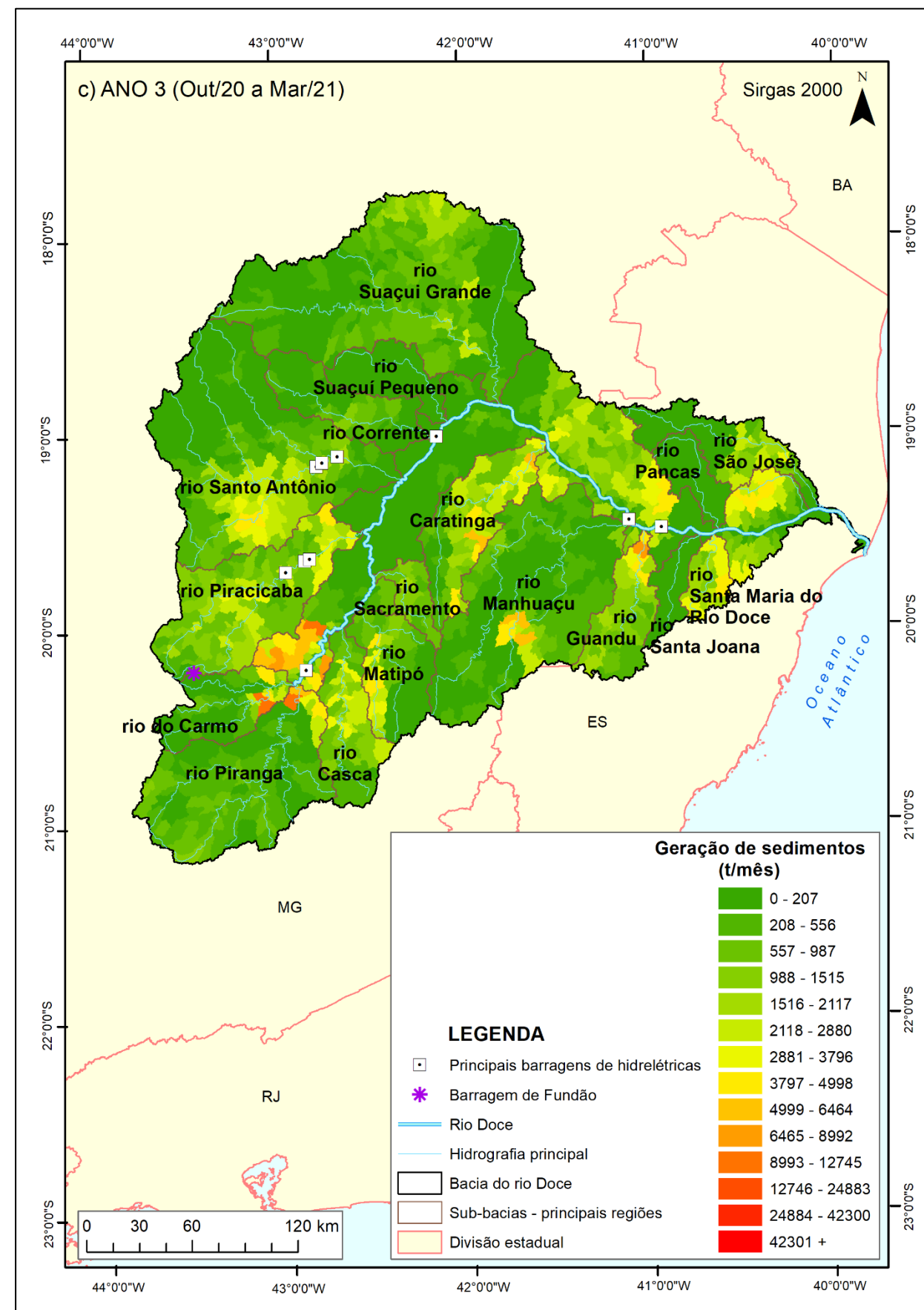
A Tabela 19 mostra os tempos de detenção durante as campanhas de monitoramento realizadas no PMBA/Fest, e variaram de menos de 1 dia (0,8) a 17,4 dias. E durante a campanha de monitoramento 55, que ocorreu de 2 a 6 de outubro de 2023, nenhuma estação próxima ao barramento da UHE Aimorés continha dados, portanto, não foi possível calcular o tempo de detenção.

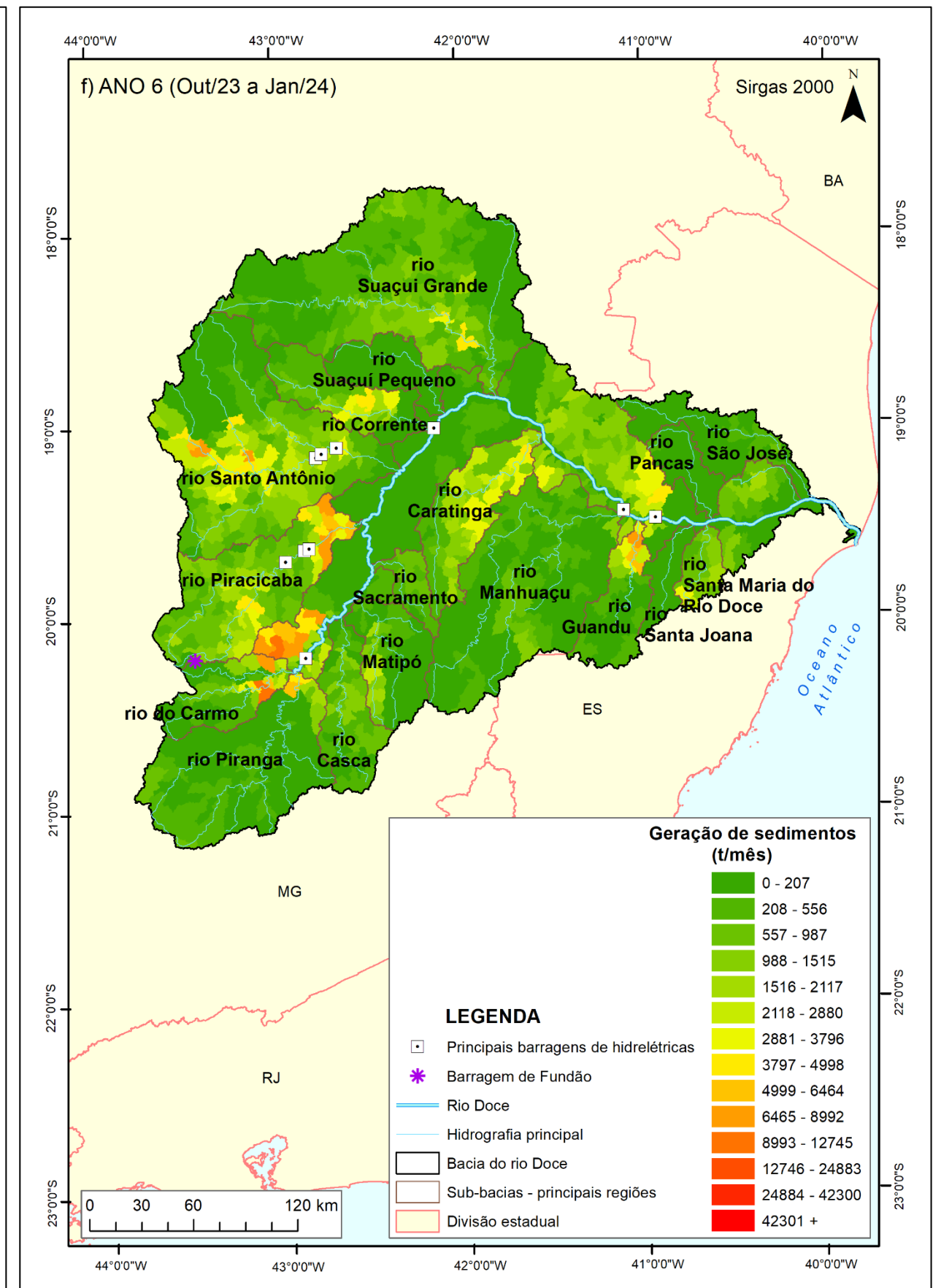
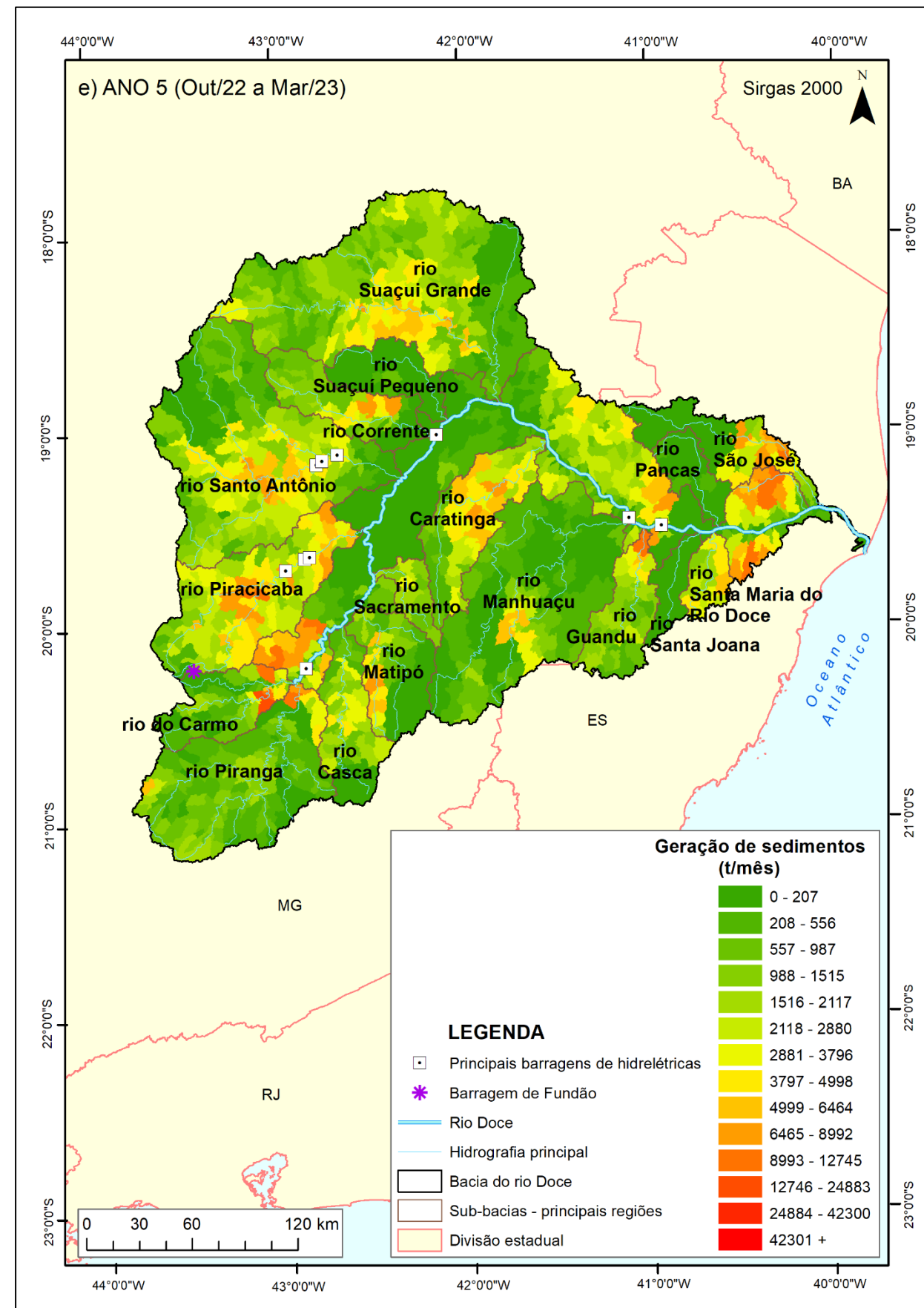


### 3.1.2 Geração e Transporte de Sedimentos

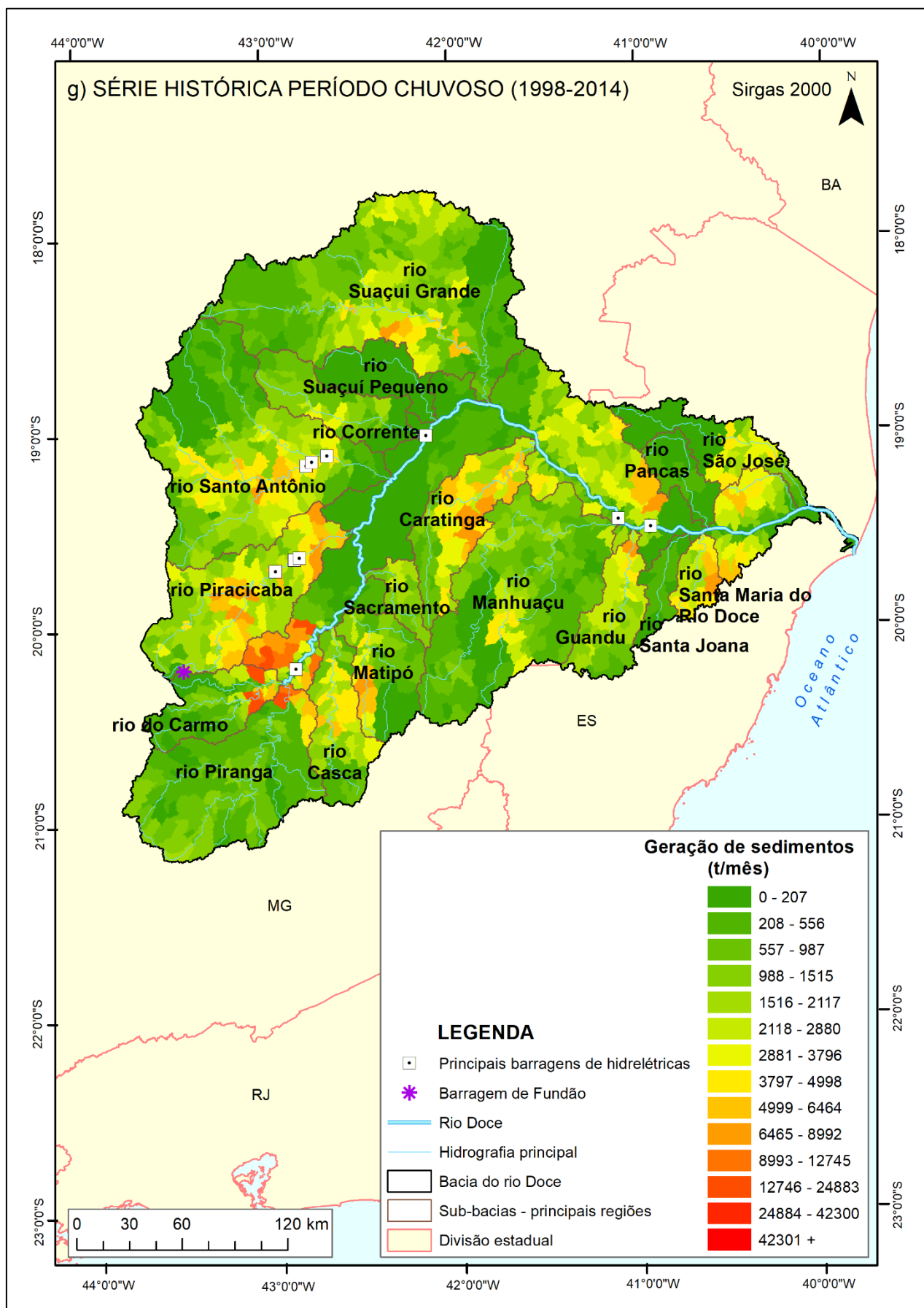
Figura 33: Estimativa da geração de sedimentos na bacia do Rio Doce no período chuvoso de cada ano do PMBA/Fest e da série histórica pré-rompimento (1998-2014): a) Ano 1 (outubro de 2018 a março de 2019); b) Ano 2 (outubro de 2019 a março de 2020); c) Ano 3 (outubro de 2020 a março de 2021); d) Ano 4 (outubro de 2021 a março de 2022); e) Ano 5 (outubro de 2022 a março de 2023); f) Ano 6 (outubro de 2023 a janeiro de 2024); e g) Período chuvoso da série histórica entre 1998 a 2014.





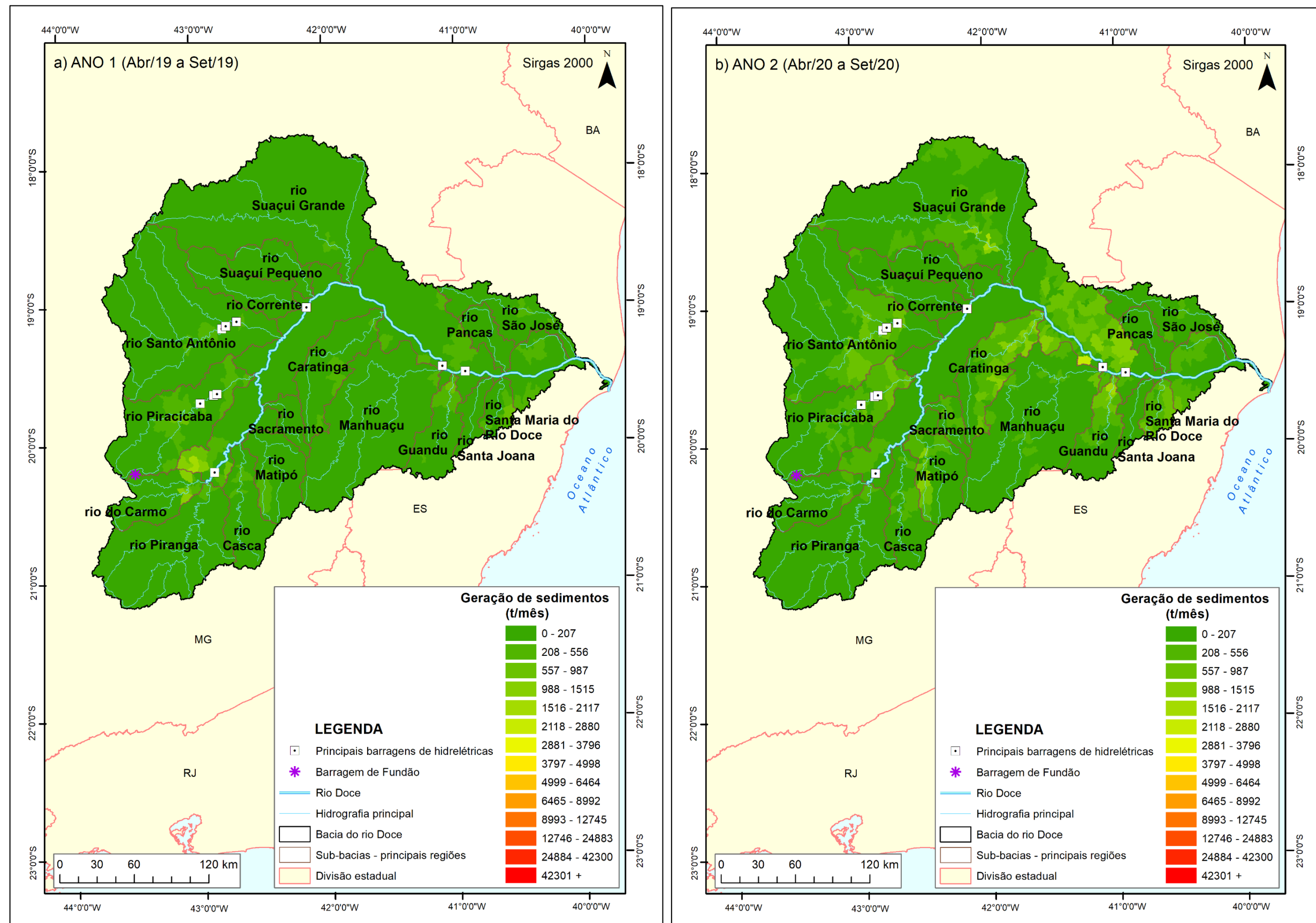


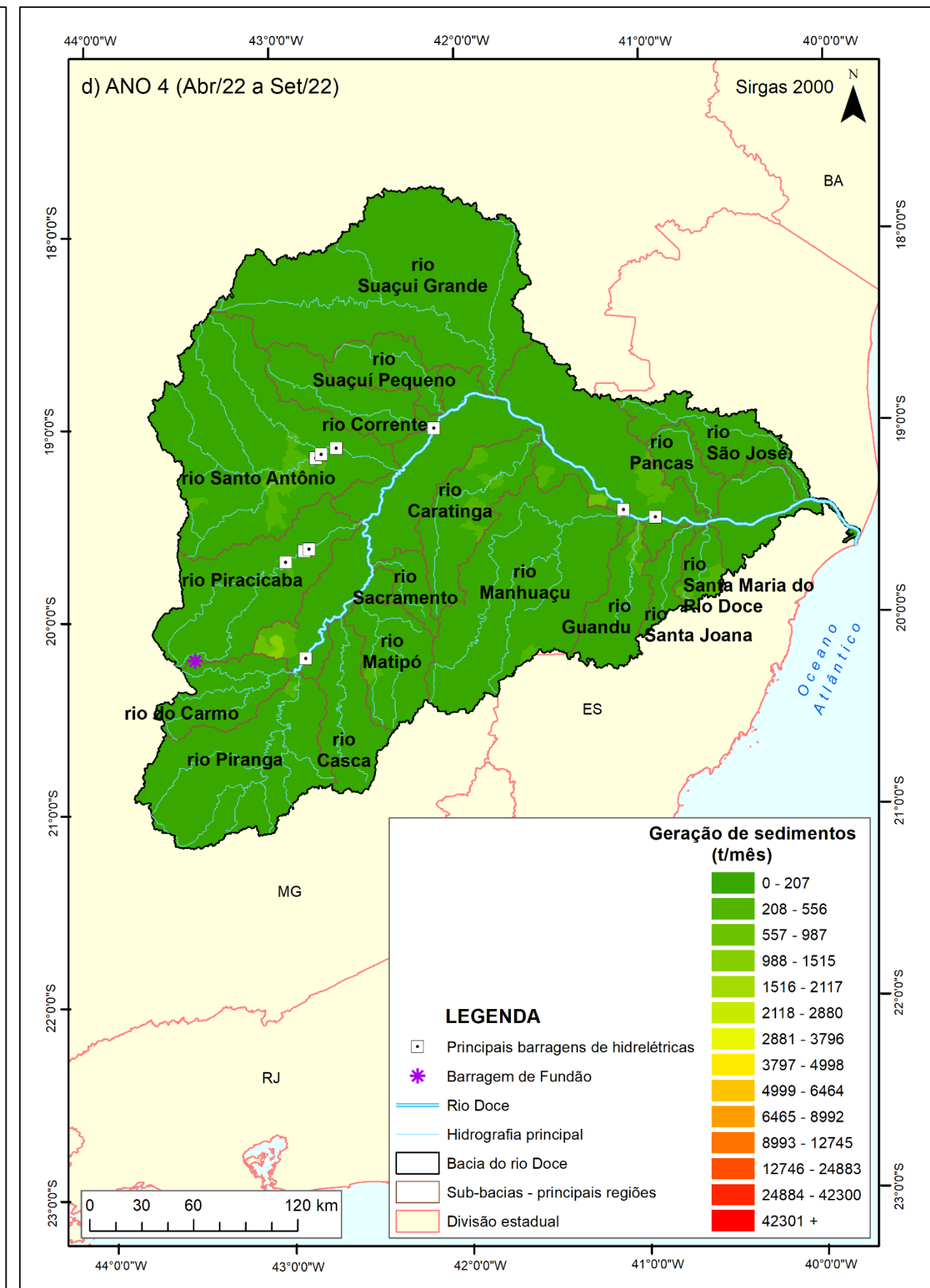
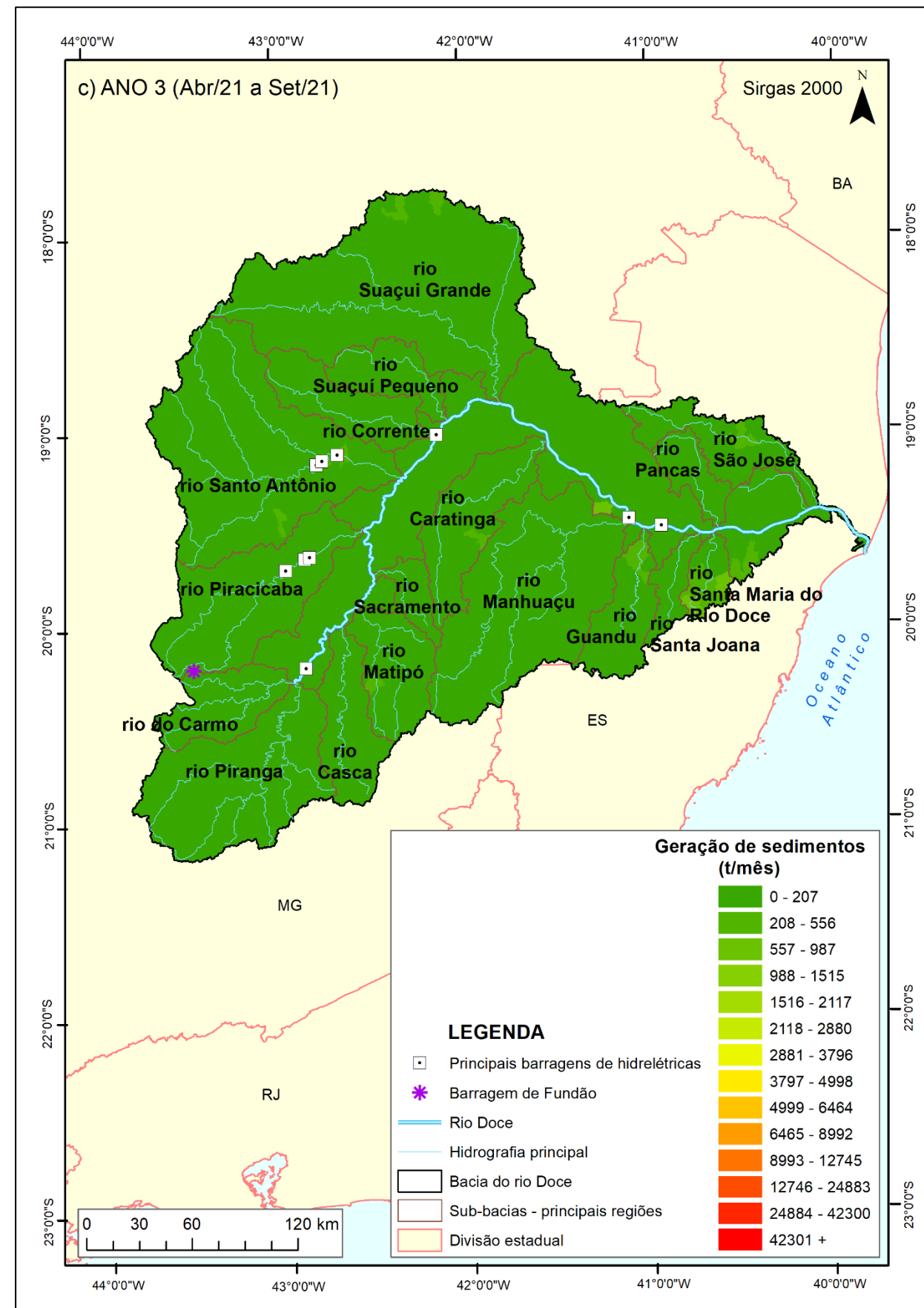




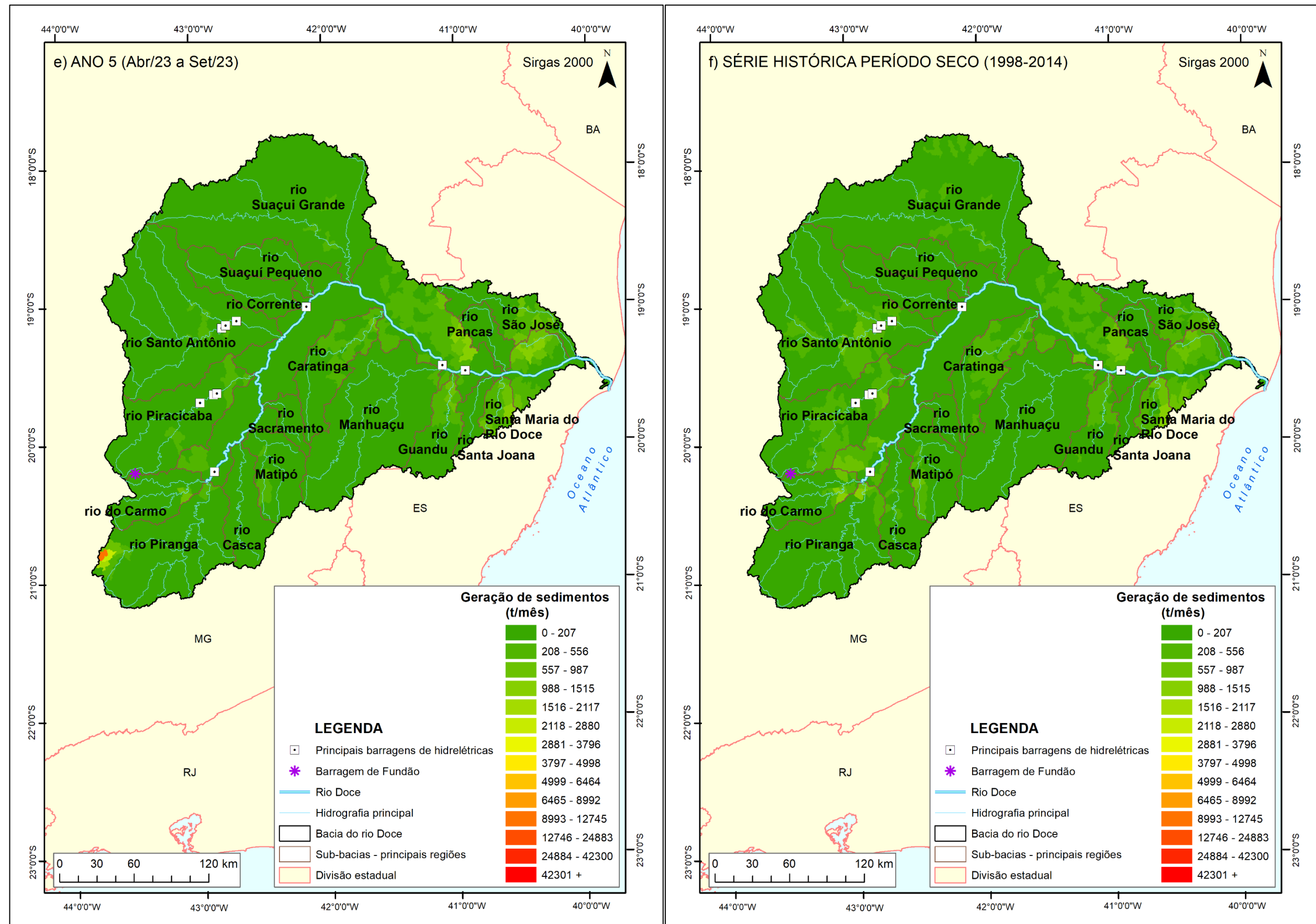
A Figura 33 representa a distribuição espaço-temporal da geração de sedimentos nos períodos chuvosos do PMBA/Fest e do período chuvoso da série histórica pré-rompimento. Os resultados apresentados nas figuras indicam que as maiores gerações de sedimentos ocorrem nas áreas de contribuições dos rios Santo Antônio, Piracicaba, Suaçuí Grande, Caratinga, Carmo, Piranga e Guandu. As bacias dos rios Caratinga, Piracicaba, Carmo e Guandu se destacam como as bacias com a maior geração de sedimentos por unidade de área. Entre as bacias com as menores estimativas de geração de sedimentos se encontram as áreas dos rios Suaçuí Pequeno, Santa Joana e Pancas acompanhando as estimativas da série histórica pré-rompimento. A sazonalidade hidrológica influenciou de forma significativa a geração de sedimentos na bacia do Rio Doce, com contribuição média nos períodos chuvosos dos 5 anos do PMBA/Fest superior a 26,8 t/mês.km<sup>2</sup> equivalente a 2,22 x 10<sup>6</sup> t/mês de sedimentos. Entre os anos do PMBA/Fest se destaca o período chuvoso do Ano 4 (outubro de 2021 a março de 2022) com a maior média de geração de sedimentos de 44,61 t/mês.km<sup>2</sup> (3,69 x 10<sup>6</sup> t/mês) na bacia do Rio Doce, o que coincide com o período de maior média pluviométrica entre os anos do PMBA/Fest, conforme apresentado na Tabela 17. Nesse contexto, também se destaca o período chuvoso dos Anos 2 (outubro de 2019 a março de 2020) e 5 (outubro de 2022 a março de 2023) contribuindo com a geração de sedimentos em pouco mais de 30 t/mês.km<sup>2</sup>. Apesar de incompleto, o período chuvoso do Ano 6 (outubro de 2023 a janeiro de 2024), apresentou geração de sedimentos estimada em 1,17 x 10<sup>6</sup> t/mês (14,19 t/mês.km<sup>2</sup>), valor que já supera a integralidade do período chuvoso do Ano 1 (outubro de 2018 a março de 2019) que totalizou geração de 9,76 x 10<sup>5</sup> t/mês (11,80 t/mês.km<sup>2</sup>). No período chuvoso do Ano 3 (outubro de 2020 a março de 2021) a geração foi estimada em 1,32 x 10<sup>6</sup> t/mês de sedimentos. Entre os períodos chuvosos, a menor geração de sedimentos foi estimada no Ano 1, que também de acordo com a Tabela 17 apresentou a menor média pluviométrica entre os períodos chuvosos.

Figura 34: Estimativa da geração de sedimentos na bacia do Rio Doce no período seco de cada ano do PMBA/Fest e da série histórica pré-rompimento (1998-2014): a) Ano 1 (abril a setembro de 2019); b) Ano 2 (abril a setembro de 2020); c) Ano 3 (abril a setembro de 2021); d) Ano 4 (abril a setembro de 2022); e) Ano 5 (abril a setembro de 2023); e f) Período seco da série histórica entre 1998 e 2014.









A Figura 34 representa a distribuição espaço-temporal da geração de sedimentos nos períodos secos do PMBA/Fest e no período seco da série histórica pré-rompimento. A simples comparação entre a Figura 33 e a Figura 34 demonstra que a geração de sedimentos está totalmente relacionada ao regime hidrológico da bacia do Rio Doce, com alta geração de sedimentos no período chuvoso e baixa geração de sedimentos no período seco. Entre todos os períodos secos a geração de sedimentos da bacia do Rio Doce foi inferior a 3 t/mês.km<sup>2</sup>, conforme resultados apresentados na Tabela 20. Dos tributários do Rio Doce as maiores gerações de sedimentos foram estimadas nas bacias dos rios Santo Antônio, Piracicaba, Suaçuí Grande, Caratinga, Piranga e Guandu. Do ponto de vista específico, por unidade de área, destacam-se as bacias dos rios Guandu, Piracicaba e Caratinga como as que apresentaram as maiores gerações (t/mês.km<sup>2</sup>). As menores contribuições foram estimadas nas bacias dos rios Suaçuí Pequeno, Santa Joana e Pancas. Entre os anos do PMBA/Fest, as maiores gerações de sedimentos da bacia do Rio Doce no período seco foram estimadas para o Ano 2 (abril a setembro de 2020) com  $2,46 \times 10^5$  t/mês, seguido pela estimativa para o Ano 5 (abril a setembro de 2023) com  $1,51 \times 10^5$  t/mês, que correspondem aos períodos que apresentaram as maiores médias pluviométricas para o período seco conforme Tabela 17. Para o Ano 1 (abril a setembro de 2019) a geração de sedimentos foi estimada em  $1,02 \times 10^5$  t/mês, no Ano 3 (abril a setembro de 2021) foi estimada em  $5,69 \times 10^4$  t/mês e para o ano 4 (abril a setembro de 2022) foi estimada em  $6,77 \times 10^4$  t/mês. Consequentemente, a geração média entre os períodos secos na bacia do Rio Doce foi estimada em  $1,25 \times 10^5$  t/mês de sedimentos (1,51 t/mês.km<sup>2</sup>).

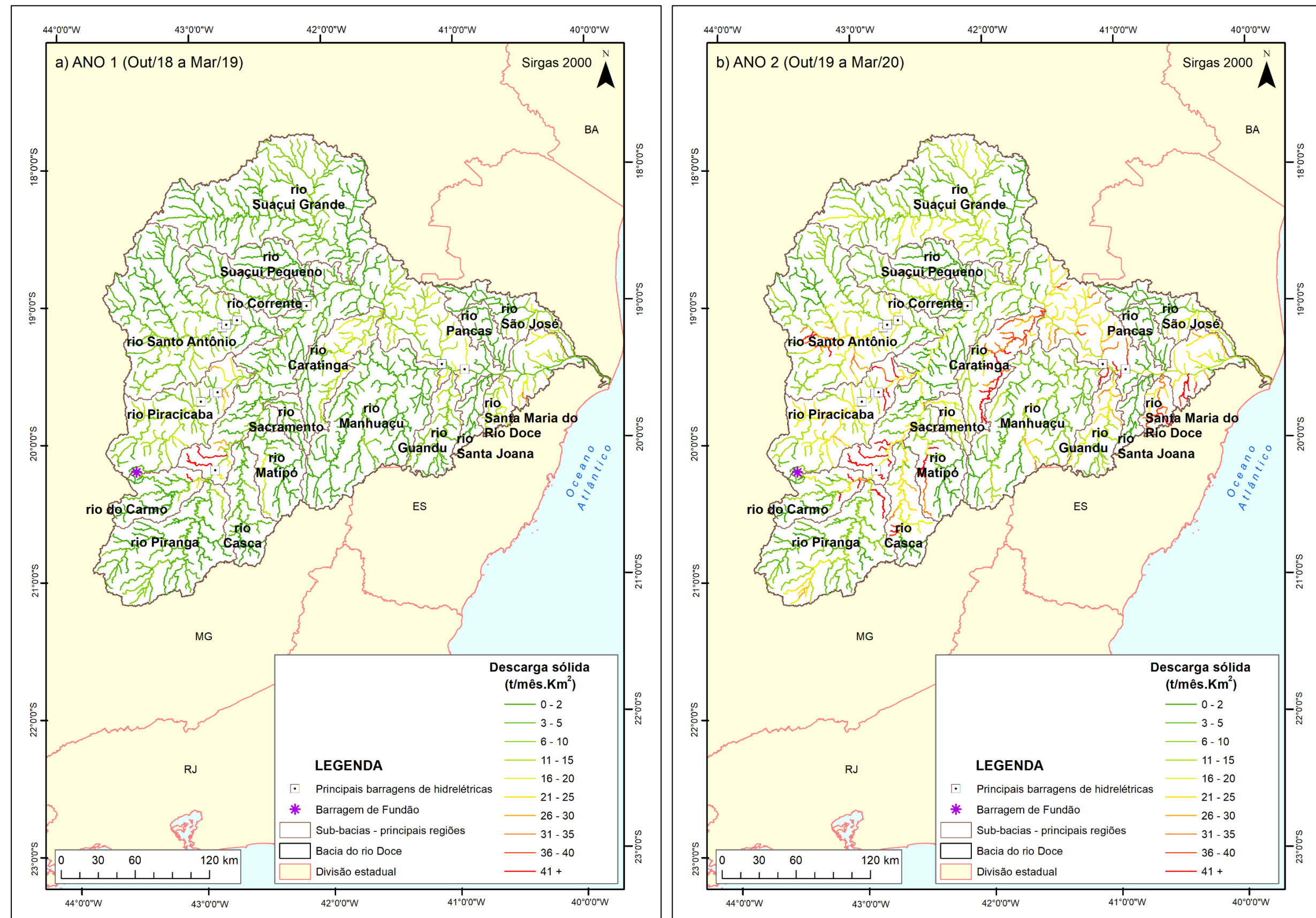
Tabela 20: Síntese da geração de sedimentos específica por sub-bacia e bacia do Rio Doce para cada período do PMBA/Fest.

Região	Área de drenagem (km <sup>2</sup> )	GERAÇÃO DE SEDIMENTOS ESPECÍFICA (t/mês.km <sup>2</sup> )										
		Ano 1		Ano 2		Ano 3		Ano 4		Ano 5		Ano 6*
		(Out/18 a Set/19)		(Out/19 a Set/20)		(Out/20 a Set/21)		(Out/21 a Set/22)		(Out/22 a Set/23)		(Out/23 a Jan/24)
		Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso
Área Rio Doce	15418,79	15,66	1,87	36,60	4,11	22,36	0,74	61,17	1,09	33,77	2,84	16,57
Caratinga	3246,66	25,98	2,04	68,80	8,42	33,02	1,45	96,97	1,86	54,66	3,47	30,33
Casca	2526,24	7,47	1,69	39,78	1,78	23,25	0,60	43,79	0,39	26,00	0,78	8,64
Corrente	2494,72	5,52	0,31	16,73	1,64	4,46	0,37	19,16	0,24	26,35	0,60	15,31
Carmo	2296,17	24,30	3,17	59,89	1,04	24,59	0,28	147,01	0,48	53,56	1,46	35,14
Guandu	2156,44	19,20	3,10	51,83	5,99	30,09	2,48	53,41	1,93	39,62	4,31	20,34
Manhuaçu	8888,12	3,26	0,31	11,98	1,26	7,43	0,23	15,86	0,36	9,61	0,41	4,09
Matipó	2567,04	6,93	1,00	28,36	4,16	16,90	0,53	24,01	0,66	23,67	1,09	7,13
Pancas	1186,25	0,54	0,04	1,53	0,21	0,92	0,02	2,70	0,02	1,55	0,19	0,67
Piracicaba	5486,71	25,84	2,83	52,47	4,08	25,87	0,98	69,66	1,17	59,63	1,80	28,66
Piranga	6644,82	7,40	0,79	23,51	1,05	11,81	0,34	38,57	0,90	20,36	3,76	6,28
Sacramento	841,83	6,74	0,45	37,21	3,36	16,64	0,22	28,82	0,51	27,51	0,80	9,97
Santa Joana	894,49	0,50	0,10	2,48	0,24	1,47	0,08	2,65	0,04	1,29	0,11	0,19
Santa Maria do Rio Doce	942,67	23,04	3,53	55,55	8,86	46,15	5,95	64,00	3,43	54,91	10,48	24,04
Santo Antônio	10490,82	12,80	0,94	36,98	3,07	14,20	0,67	41,05	1,09	33,73	0,93	21,58
São Jose	2435,30	13,31	1,23	19,00	1,34	12,75	0,96	24,46	0,52	34,32	3,02	1,92
Suaçuí Grande	12479,86	7,04	0,39	20,92	2,62	8,38	0,48	32,02	0,35	29,55	0,86	9,50
Suaçuí Pequeno	1732,38	0,03	0,00	0,25	0,01	0,04	0,00	0,20	0,00	1,07	0,00	0,32
<b>Bacia do Rio Doce</b>	<b>82729,31</b>	<b>11,80</b>	<b>1,23</b>	<b>31,26</b>	<b>2,97</b>	<b>15,92</b>	<b>0,69</b>	<b>44,61</b>	<b>0,82</b>	<b>30,61</b>	<b>1,83</b>	<b>14,19</b>

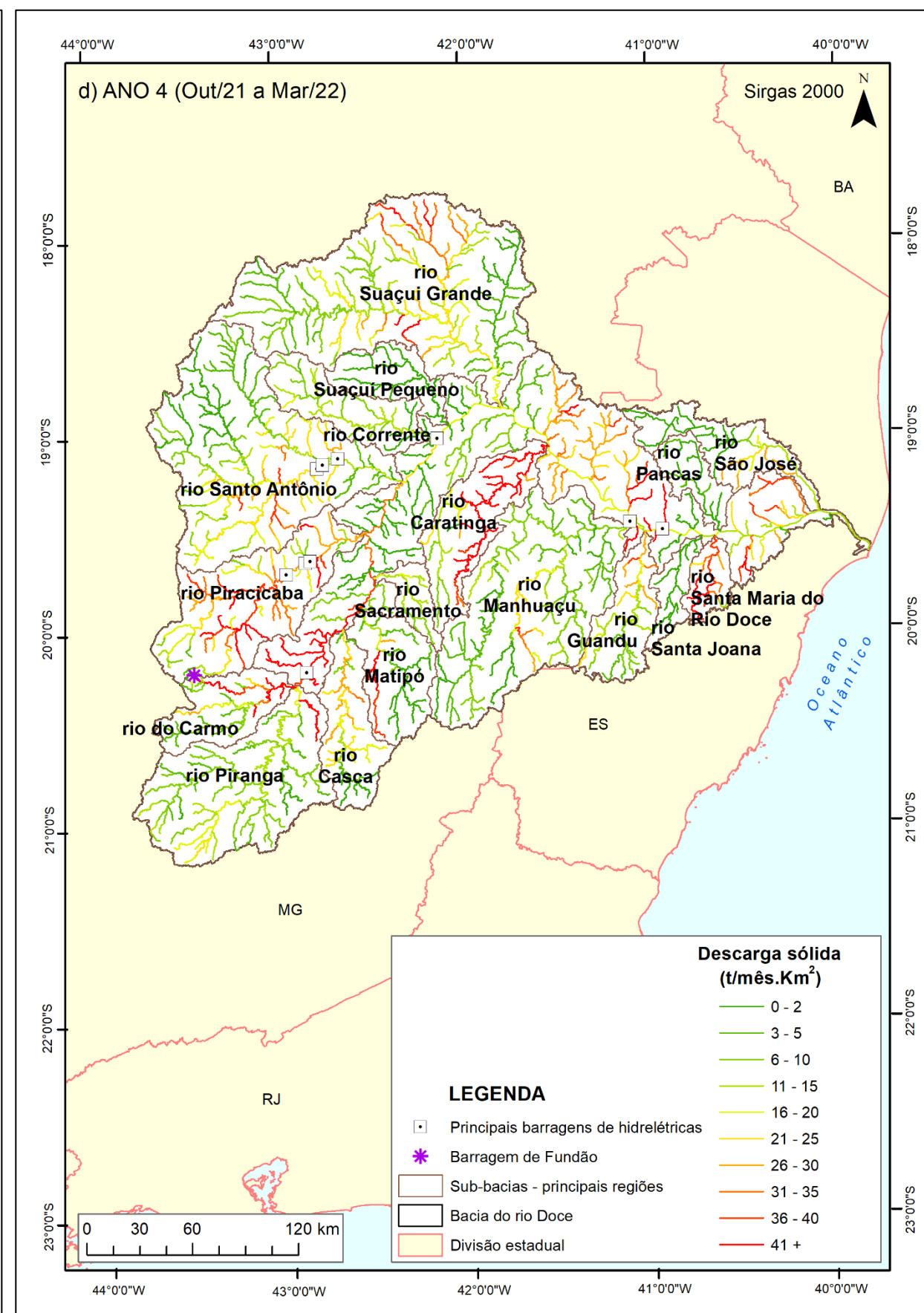
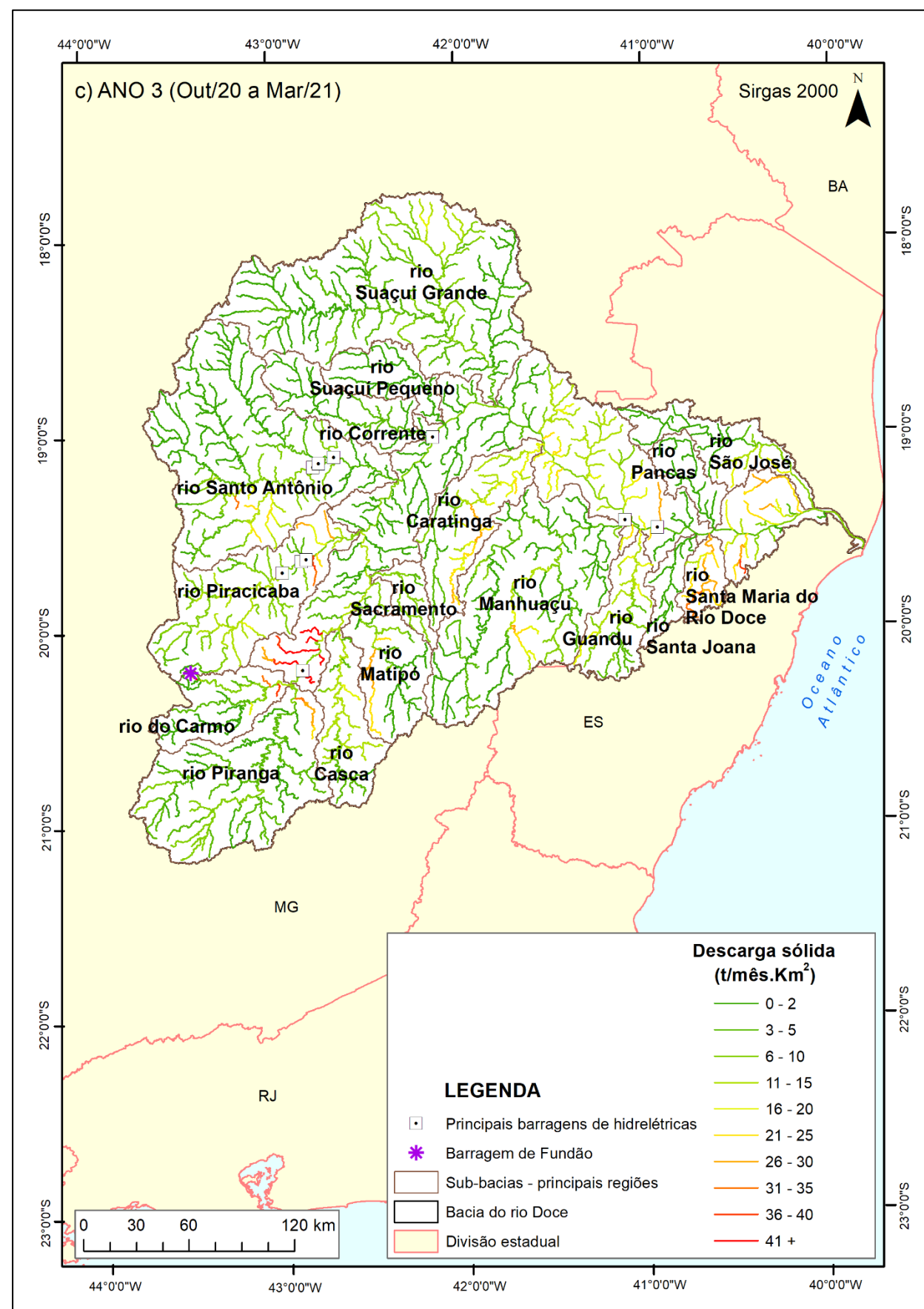
Notas: \* Período chuvoso incompleto para o Ano 6 (outubro de 2023 a janeiro de 2024).

A Tabela 20, apresenta as estimativas de geração de sedimentos específica para a bacia do Rio Doce e suas principais sub-bacias, para cada período do PMBA/Fest. A geração de sedimentos específica apresentada na Tabela 20 possibilita uma análise comparativa entre as sub-bacias, pois anula o efeito da área de drenagem sobre a geração de sedimentos. Nesse sentido, se destaca as sub-bacias dos rios Caratinga, Piracicaba, Carmo e Guandu com as que apresentam as maiores gerações de sedimentos específica da bacia do Rio Doce. Outro destaque se refere as bacias dos rios Guandu e Manhuaçu, que são bastante distintas em relação as suas respectivas áreas de drenagem (2156,4 e 8888,12 km<sup>2</sup>, respectivamente) mas apresentam proximidade na geração de sedimentos, com valor médio mensal entre os períodos chuvosos (Ano 1 ao 5) de  $8,37 \times 10^4$  t/mês e  $8,56 \times 10^4$  t/mês, respectivamente. Nesse contexto, a substituição do ponto controle da sub-bacia do rio Guandu para a sub-bacia do rio Manhuaçu pode ser justificada pelo alto nível proporcional de geração de sedimentos da sub-bacia do rio Guandu, alcançando média de 38,8 t/mês.km<sup>2</sup> no período chuvoso (Ano 1 ao 5), contra 9,6 t/mês.km<sup>2</sup> na sub-bacia do rio Manhuaçu. Embora ambas as bacias apresentem semelhanças em relação a aspectos pedológicos, uso e ocupação do solo e declividade, os dados históricos de vazão e de concentração de sedimentos em suspensão das estações São Sebastião da Encruzilhada (56990000) e Baixo Guandu (56992000), que se encontram próximos aos exutórios das bacias dos rios Manhuaçu e Guandu, respectivamente, indicam que a média da descarga sólida diária específica observada na estação Baixo Guandu é 173% superior a estimada para a estação São Sebastião da Encruzilhada (os dados registrados no dia 19/11/2004 na estação Baixo Guandu, não foram utilizados devido ao alto e duvidoso valor da vazão). Observa-se ainda que ao longo dos anos do PMBA/Fest, a tendência da geração de sedimentos na bacia do Rio Doce inclinou-se para mais ou para menos a depender do índice pluviométrico.

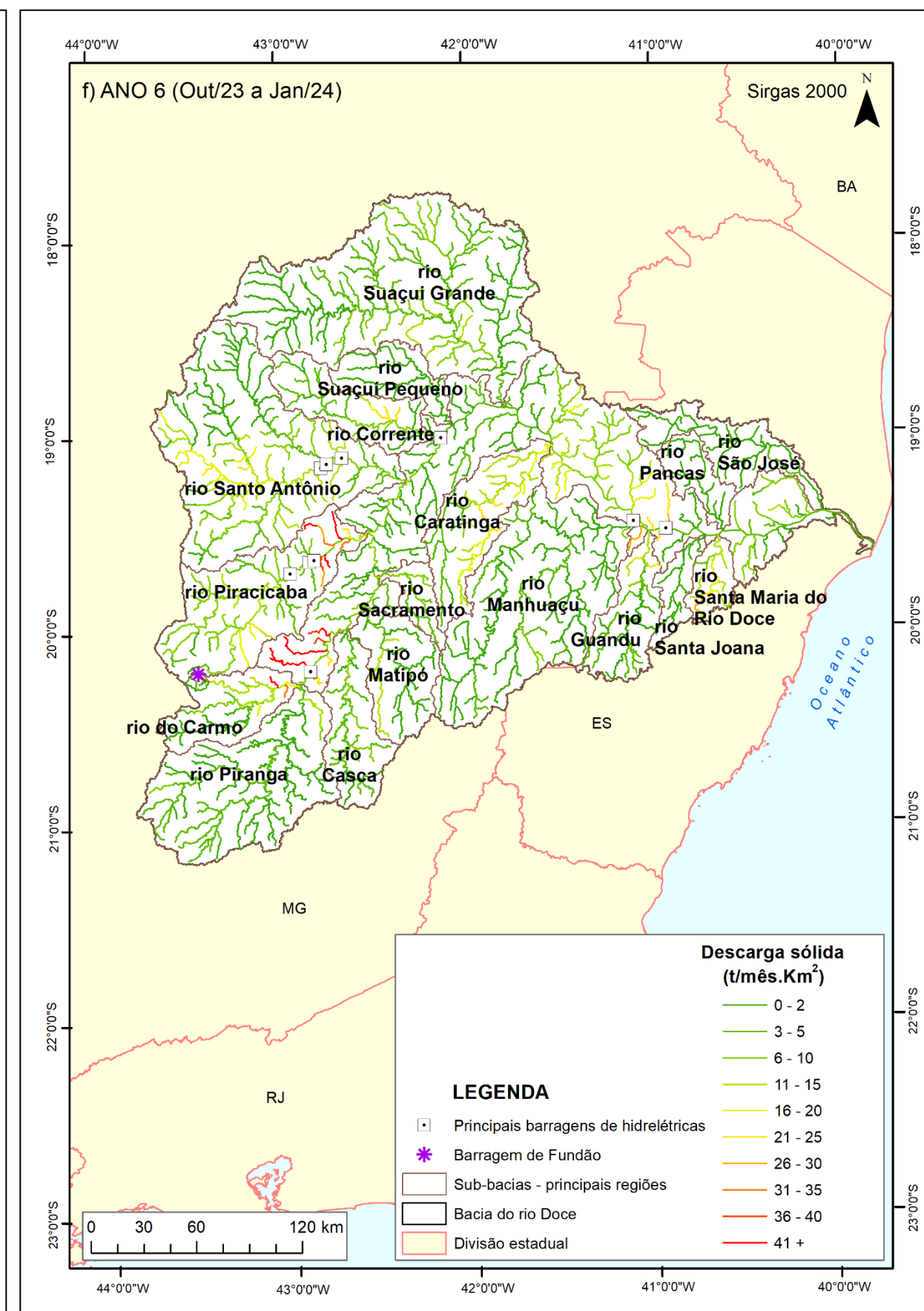
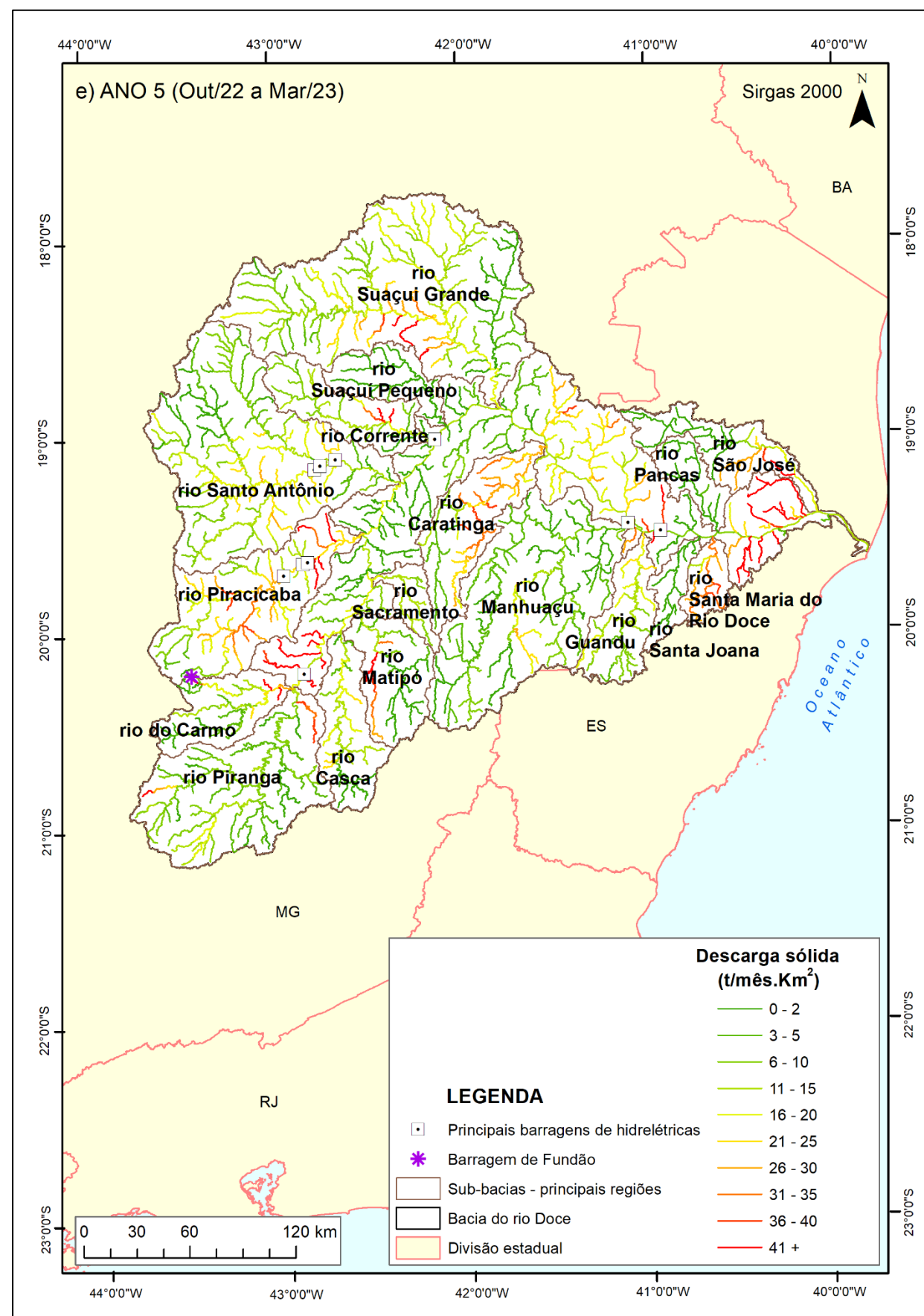
Figura 35. Descarga sólida em suspensão específica nos rios simulados na bacia do Rio Doce no período chuvoso de cada ano do PMBA/Fest e da série histórica pré-rompimento (1998-2014): a) Ano 1 (outubro de 2018 a março de 2019); b) Ano 2 (outubro de 2019 a março de 2020); c) Ano 3 (outubro de 2020 a março de 2021); d) Ano 4 (outubro de 2021 a março de 2022); e) Ano 5 (outubro de 2022 a março de 2023); f) Ano 6 (outubro de 2023 a janeiro de 2024); e g) Período chuvoso da série histórica entre 1998 a 2014.

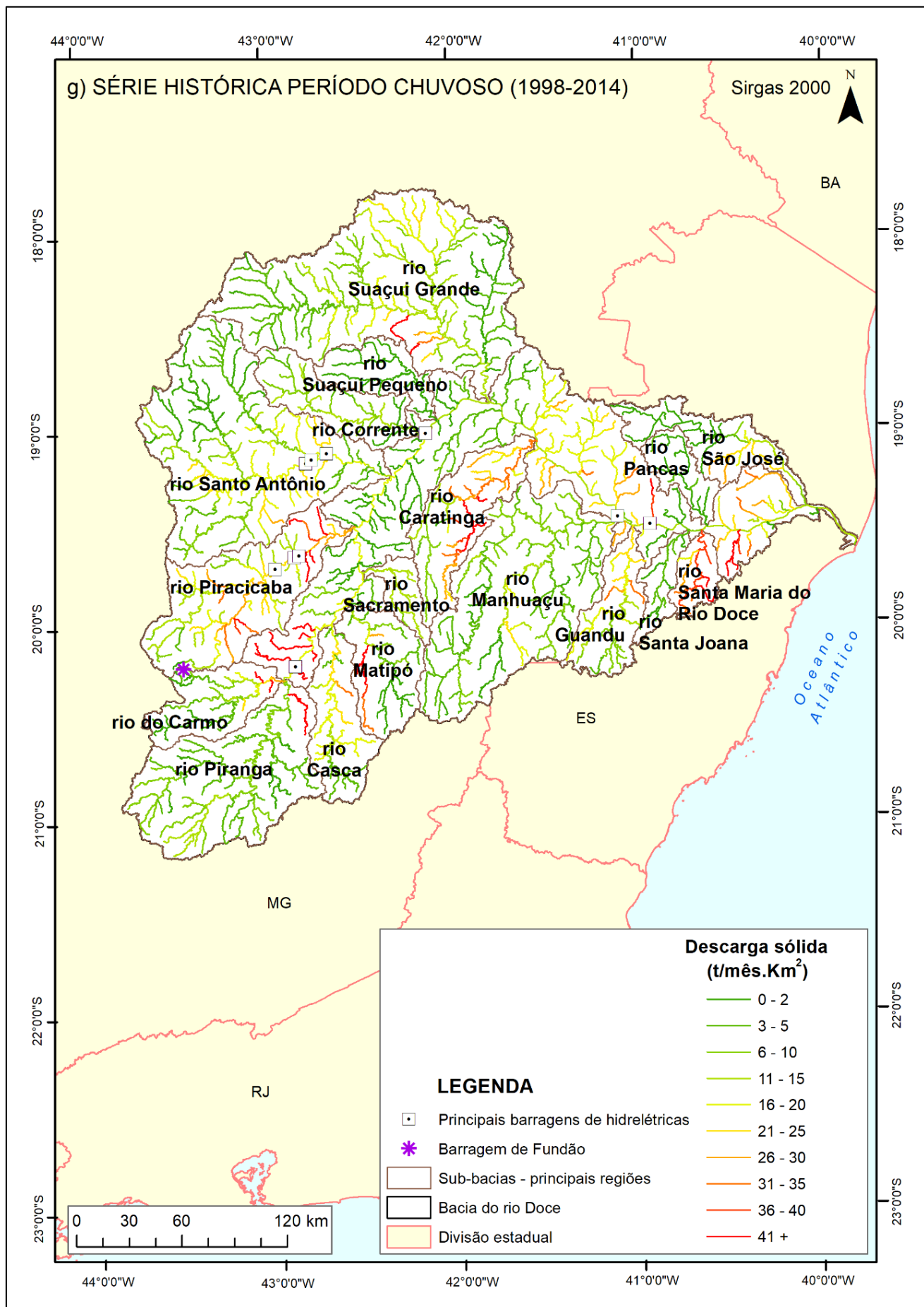








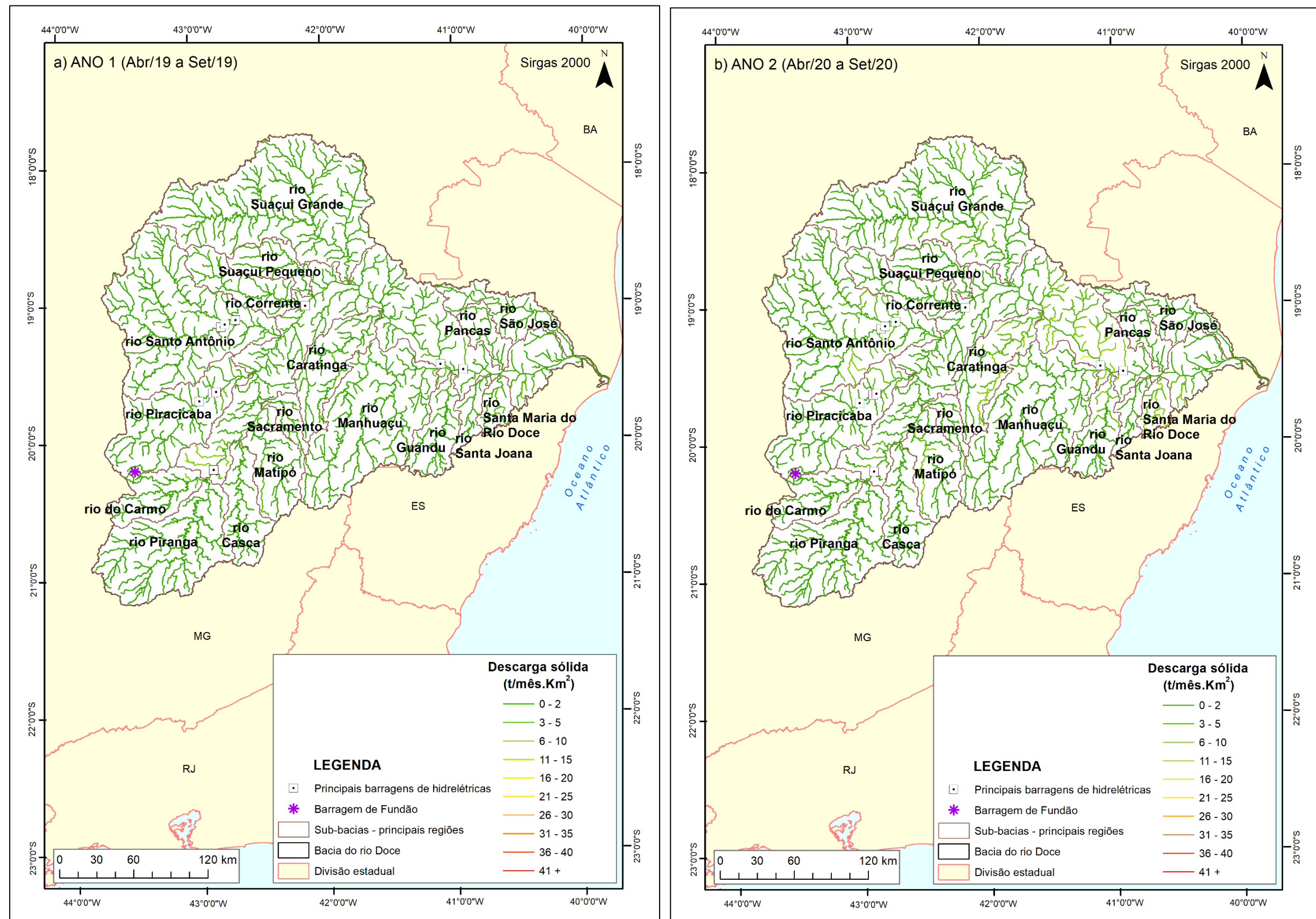


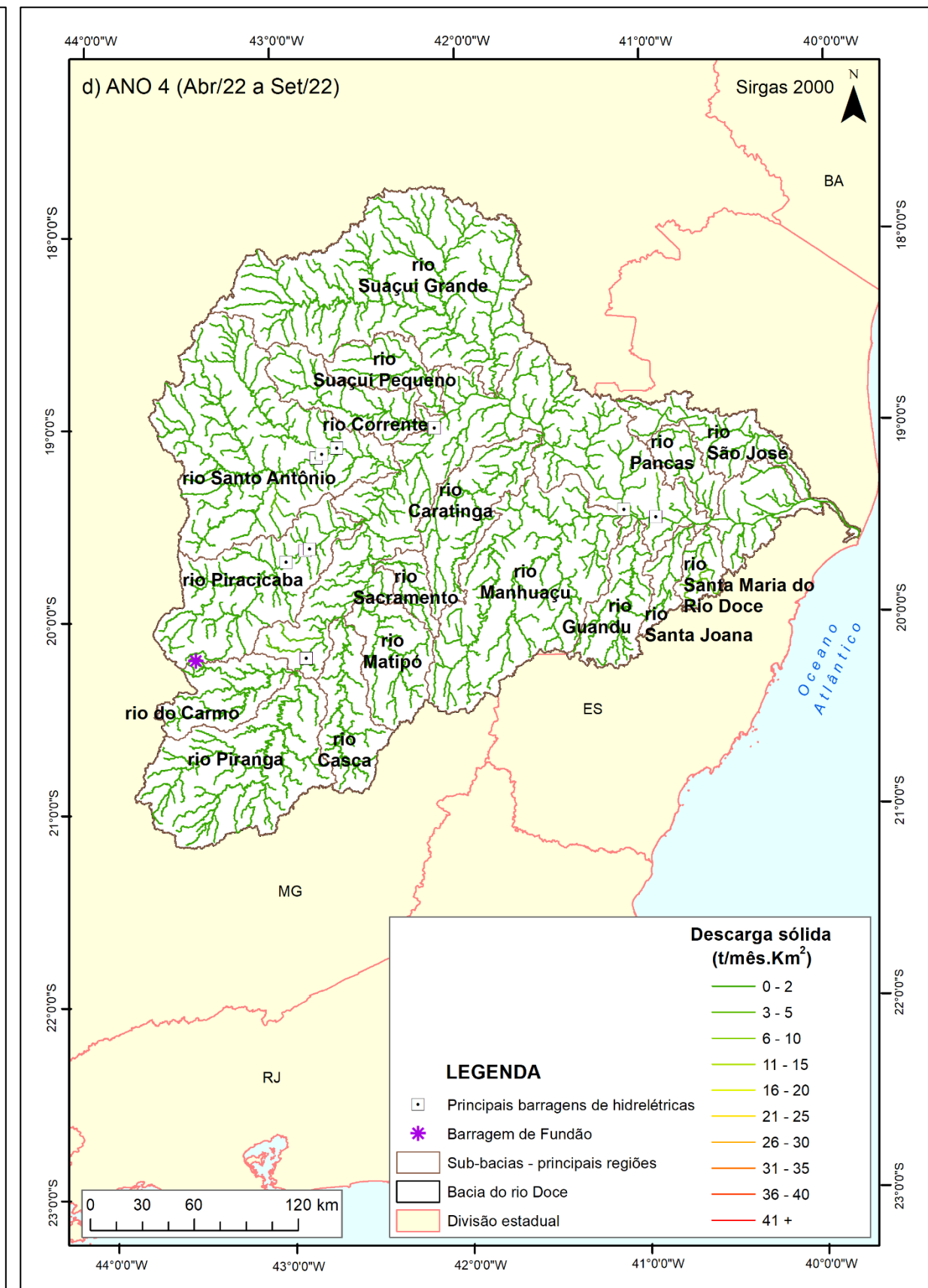
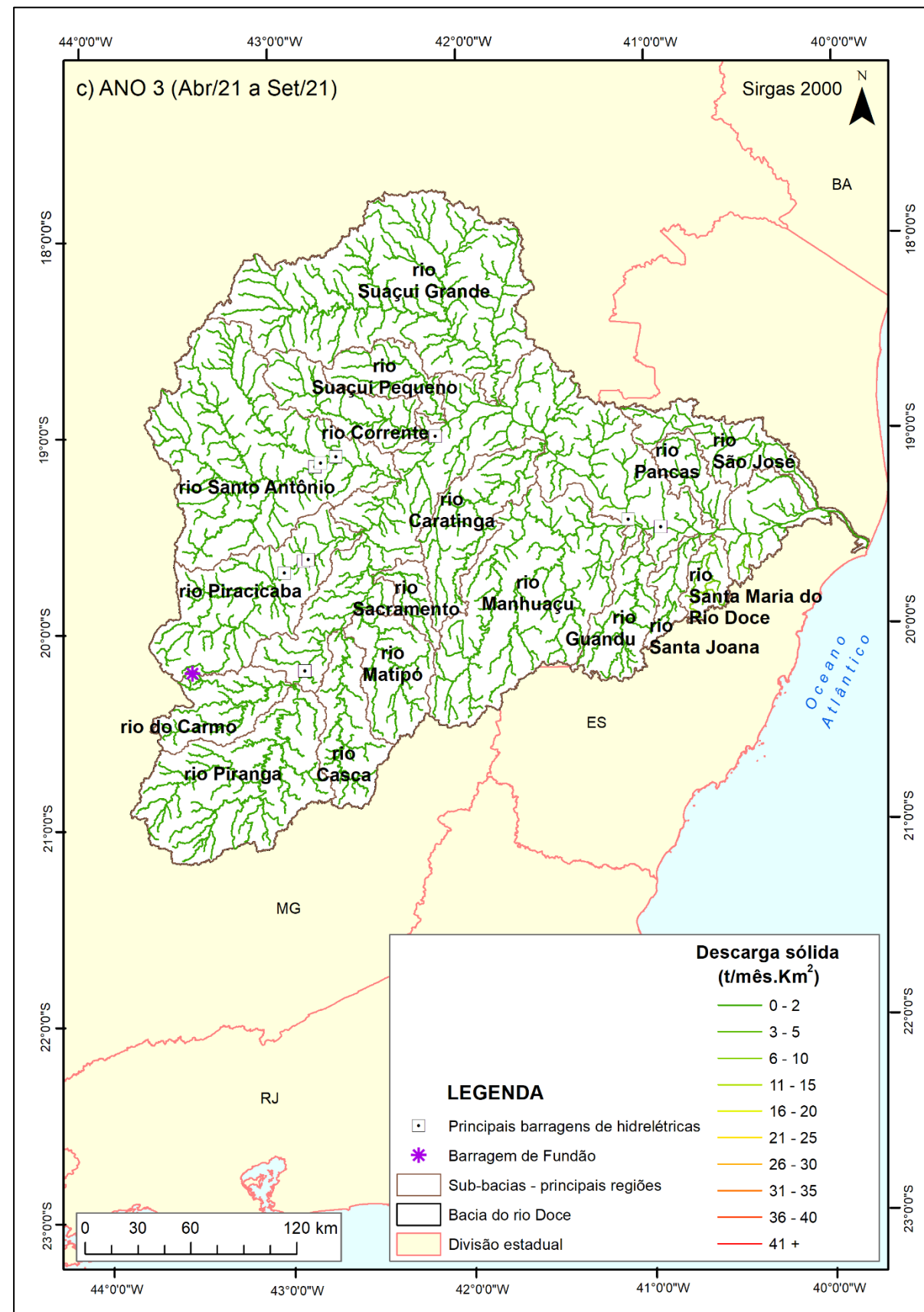


A Figura 35 representa a distribuição espaço-temporal do transporte de sedimentos na forma de descarga sólida em suspensão específica nos períodos chuvosos do PMBA/Fest e do período chuvoso da série histórica pré-rompimento, nos trechos de rios simulados. A partir das imagens é possível inferir que os maiores valores de descarga sólida específica foram registrados nas regiões que apresentaram as maiores cargas de geração de sedimentos. Ademais, os resultados da descarga sólida em suspensão indicaram que os rios transportam alta carga de sedimentos no período chuvoso, sendo consequência das altas precipitações e do uso e ocupação do solo. Entre os tributários do Rio Doce que mais transportam sedimentos de acordo com as imagens apresentadas na Figura 32, encontram-se trechos dos rios Piracicaba, Caratinga e Suaçuí Grande e Guandu. É importante destacar que apesar dos resultados referentes a sub-bacia do rio Santa Maria do Rio Doce apontarem elevada descarga sólida, não houve calibração do modelo de sedimentos nessa região por não haver registros históricos de concentração de sedimentos em suspensão. Especialmente, os trechos que transportam alta carga de sedimentos se mantiveram os mesmos ao longo dos anos do PMBA/Fest, seguindo o padrão histórico. Todavia, os trechos imediatamente a jusante da Barragem de Fundão, que fazem parte da bacia do rio do Carmo, apresentaram alto transporte de sedimentos principalmente no Ano 4 (outubro de 2021 a março de 2022), como consequência da ressuspensão de rejeito, pois tal comportamento não foi observado quando desconsiderado o rompimento ou quando comparados a dados históricos (1998-2014). Assim, ressalta-se que especificamente para a bacia do rio do Carmo, sua elevada descarga sólida em suspensão está associada à ressuspensão de rejeito e à sua alta geração de sedimentos, que foram responsáveis pela descarga de aproximadamente  $80 \text{ t/mês.km}^2$  no período chuvoso do Ano 4 (outubro de 2021 a março de 2022), sendo a maior descarga específica registrada entre os tributários do Rio Doce entre todos os períodos analisados, conforme dados apresentados na Tabela 21. Ao longo do período chuvoso do Ano 1 (outubro de 2018 a março de 2019) a bacia do Rio Doce transportou até a sua foz,  $2,88 \times 10^5 \text{ t/mês}$  de sedimentos em suspensão, no Ano 2 (outubro de 2019 a março de 2020) o transporte aumentou 181% em relação ao Ano 1, alcançando  $8,10 \times 10^5 \text{ t/mês}$ , no Ano 3 (outubro de 2020 a março de 2021) foram transportados  $4,15 \times 10^5 \text{ t/mês}$ . O maior transporte de sedimentos em suspensão na bacia do Rio Doce foi estimado no período chuvoso do Ano 4 (outubro de 2021 a março de 2022) com  $1,17 \times 10^6 \text{ t/mês}$ , valor que representa 33% do total de sedimentos em suspensão transportados nos meses chuvosos dos anos 1 ao 5 do PMBA/Fest. Por sua vez, o segundo maior transporte de sedimentos em suspensão no período chuvoso na bacia do Rio Doce foi registrado no Ano 5 (outubro de 2022 a março de 2023) com total aproximado de  $8,42 \times 10^5 \text{ t/mês}$  valor 4% superior ao estimado no Ano 2 e 28% inferior ao estimado no Ano 4. No período chuvoso incompleto do Ano 6 (outubro de 2023 a janeiro de 2024) o transporte de sedimentos em suspensão foi estimado em  $2,42 \times 10^5 \text{ t/mês}$ , valor 14% inferior ao estimado para o Ano 1.

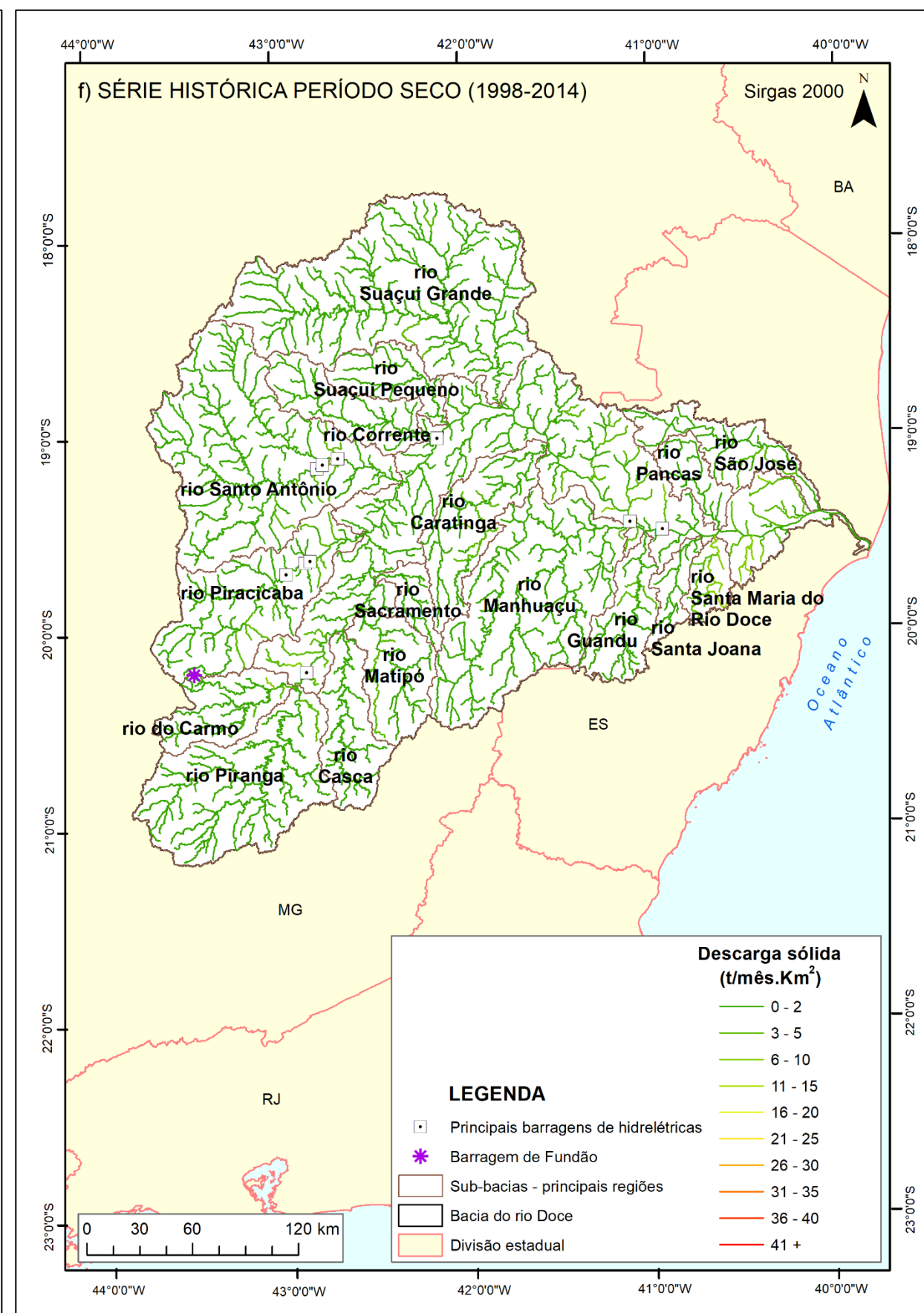
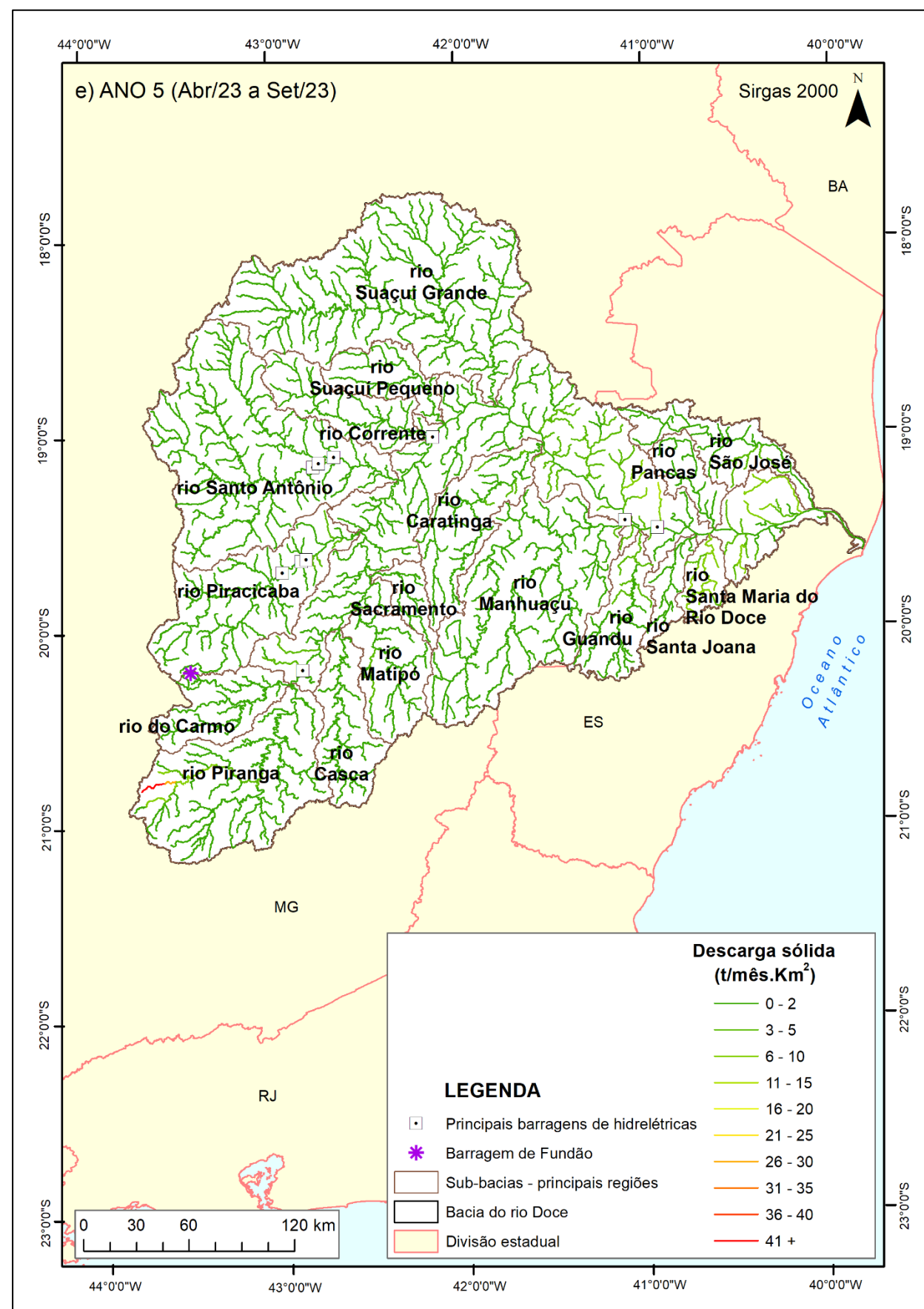


Figura 36. Descarga sólida em suspensão específica nos rios simulados na bacia do Rio Doce no período seco de cada ano do PMBA/Fest e da série histórica pré-rompimento (1998-2014): a) Ano 1 (abril a setembro de 2019); b) Ano 2 (abril a setembro de 2020); c) Ano 3 (abril a setembro de 2021); d) Ano 4 (abril a setembro de 2022); e) Ano 5 (abril a setembro de 2023); e f) Período seco da série histórica entre 1998 e 2014.









A Figura 36 representa a distribuição espaço-temporal do transporte de sedimentos na forma de descarga sólida em suspensão específica nos períodos secos do PMBA/Fest e no período seco da série histórica pré-rompimento, nos trechos de rios simulados. Com base nas figuras apresentadas, no período seco, independentemente dos anos do PMBA/Fest e da série histórica, os rios transportam baixa carga de sedimentos em suspensão. Pequenas variações podem ser justificadas por eventos pluviométricos isolados. A tendência de transportar baixas cargas de sedimentos em suspensão nos períodos secos ao longo dos anos do PMBA/Fest, também é observada no período histórico (1998 a 2014). Nesse contexto, ao longo do período seco do Ano 1 (abril a setembro de 2019) a bacia do Rio Doce transportou até a foz,  $4,14 \times 10^4$  t/mês de sedimentos em suspensão, no Ano 2 (abril a setembro de 2020) o transporte aumentou 59% em relação ao mesmo período no Ano 1, alcançando  $1,02 \times 10^5$  t/mês, no Ano 3 (abril a setembro de 2021) e 4 (abril a setembro de 2022) foram transportados  $2,51 \times 10^4$  t/mês e  $2,12 \times 10^4$  t/mês, respectivamente. Por fim, o segundo maior transporte de sedimentos em suspensão no período seco na bacia do Rio Doce foi registrado no Ano 5 (abril a setembro de 2023) com total aproximado de  $4,72 \times 10^4$  t/mês. Ainda que não visualizados na escala de apresentação dos dados na Figura 36, a presença de rejeitos na calha do rio entre Fundão e a foz do Rio Doce, também impactaram na elevação da descarga sólida em suspensão, ainda que em menor amplitude por conta do período seco, que normalmente está associado a baixos índices pluviométricos e menores vazões.



Tabela 21: Comparação da descarga sólida em suspensão específica (t/mês.km<sup>2</sup>) para a bacia do Rio Doce, principais tributários e para todos os períodos chuvosos e secos ao longo do PMBA/Fest Especificamente para as bacias dos rios Doce e Carmo também consta o percentual de elevação da descarga sólida devido a ressuspensão do rejeito.

Bacia	Area de drenagem (km <sup>2</sup> )	DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO ESPECÍFICA (t/mês.km <sup>2</sup> )										
		Ano 1 (Out/18 a Set/19)		Ano 2 (Out/19 a Set/20)		Ano 3 (Out/20 a Set/21)		Ano 4 (Out/21 a Set/22)		Ano 5 (Out/22 a Set/23)		Ano 6 (Out/23 a Jan/24)*
		Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso
<b>Rio Doce</b>	<b>82729,31</b>	<b>3,48</b> (1,1%)	<b>0,50</b> (0,3%)	<b>9,79</b> (2,1%)	<b>1,23</b> (0,7%)	<b>5,02</b> (0,5%)	<b>0,30</b> (0,1%)	<b>14,20</b> (1,8%)	<b>0,26</b> (0,6%)	<b>10,18</b> (1,2%)	<b>0,57</b> (0,2%)	<b>3,01</b> (0,5%)
Caratinga	3246,66	13,68	1,05	36,31	4,56	17,38	0,79	50,80	0,97	28,71	1,86	15,41
Casca	2526,24	4,13	0,92	21,51	0,98	12,79	0,34	23,88	0,20	14,29	0,43	4,69
Corrente	2494,72	2,85	0,16	8,40	0,87	2,42	0,21	9,29	0,13	13,41	0,33	7,80
<b>Carmo</b>	<b>2296,17</b>	<b>13,12</b> (2,4 %)	<b>1,71</b> (1,0%)	<b>32,24</b> (4,0%)	<b>0,61</b> (4,9%)	<b>13,37</b> (3,8%)	<b>0,15</b> (3,7%)	<b>79,97</b> (5,8%)	<b>0,30</b> (14,6%)	<b>29,25</b> (5,5%)	<b>0,81</b> (3,7%)	<b>18,72</b> (5,1%)
Guandu	2156,44	10,06	1,58	27,20	3,19	15,62	1,42	28,40	1,00	20,86	2,30	10,91
Manhuaçu	8888,12	1,65	0,16	5,83	0,66	3,74	0,13	7,66	0,18	4,77	0,21	1,93
Matipó	2567,04	3,81	0,55	14,95	2,26	9,25	0,29	13,10	0,35	12,77	0,60	3,86
Pancas	1186,25	0,26	0,02	0,74	0,11	0,43	0,01	1,34	0,01	0,79	0,09	0,28
Piracicaba	5486,71	9,14	1,01	19,11	1,54	9,31	0,43	25,53	0,39	21,97	0,66	10,14
Piranga	6644,82	3,85	0,39	12,40	0,60	6,17	0,20	20,22	0,49	10,36	1,43	3,17
Sacramento	841,83	3,65	0,24	20,12	1,85	9,10	0,12	15,66	0,27	15,03	0,44	5,39
Santa Joana	894,49	0,27	0,06	1,36	0,13	0,80	0,04	1,45	0,02	0,71	0,06	0,10
Santa Maria do Rio Doce	942,67	12,70	1,91	30,57	4,88	25,24	3,45	35,29	1,86	30,29	5,78	13,02
Santo Antônio	10490,82	3,32	0,31	11,33	0,95	3,71	0,20	12,17	0,25	10,79	0,15	5,78
São José	2435,30	6,90	0,67	9,74	0,74	6,61	0,55	11,74	0,29	15,22	1,67	1,03
Suaçuí Grande	12479,86	3,61	0,17	10,80	1,41	4,29	0,29	16,95	0,18	15,73	0,43	4,43
Suaçuí Pequeno	1732,38	0,02	0,00	0,14	0,01	0,02	0,00	0,11	0,00	0,58	0,00	0,17

Notas: \*Período chuvoso incompleto para o Ano 6 (outubro de 2023 a janeiro de 2024).

A Tabela 21 apresenta a descarga sólida em suspensão específica ( $t/mês.km^2$ ) para a bacia do Rio Doce, principais tributários e períodos do PMBA/Fest e, especificamente para os rios Doce e do Carmo, consta o percentual de elevação da descarga sólida em função da ressuspensão do rejeito, estimado em comparação com os resultados quando desconsiderado o rompimento (descarga sólida em suspensão sem o rompimento). A partir dos dados da Tabela 21, é possível observar que a presença de rejeito no Rio Doce e em cursos d'água da sub-bacia do rio do Carmo, afetados pelo rompimento da Barragem de Fundão, contribuiu com um maior aumento do transporte de sedimentos em suspensão no período de cheias, quando comparados aos resultados no cenário em que o rompimento é desconsiderado. Conforme dados da Tabela 21 as maiores variações no transporte de sedimentos em suspensão da bacia do Rio Doce em função dos rejeitos foram estimadas nos períodos chuvosos dos anos 4 e 2 com variação próxima a 2,0% e nos Anos 1 e 5 com variação inferior ou igual a 1,2% em comparação a desconsideração do rompimento. Nos demais períodos chuvosos e em todos os secos as variações foram inferiores a 1%. No entanto, é importante destacar que naturalmente a bacia do Rio Doce apresenta uma alta geração e transporte de sedimentos, o que corrobora com a percepção de baixa variação nas descargas sólidas em suspensão (transporte de sedimentos) em função da ressuspensão do rejeito a nível de bacia pois, os trechos que não apresentam rejeito tendem a reduzir a percepção do impacto. Assim, quando avaliados exclusivamente os segmentos de drenagem em que houve depósito de rejeito, os percentuais médios de elevação da descarga sólida em suspensão alcançam 8,6% nos meses chuvosos (maior percentual foi estimado para o período chuvoso do Ano 4 com 10,3%) e 6,0 % no período seco (maior percentual foi estimado no período seco do Ano 4 com 8,6%), quando comparados a resultados em que o rompimento é desconsiderado.

Tabela 22: Percentual médio de elevação da descarga sólida em suspensão por trecho do PMR devido a ressuspensão do rejeito.

PERCENTUAL MÉDIO DE ELEVAÇÃO DA DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO (%)												
Trecho PMR	Comprimento (km)	Ano 1 (Out/18 a Set/19)		Ano 2 (Out/19 a Set/20)		Ano 3 (Out/20 a Set/21)		Ano 4 (Out/21 a Set/22)		Ano 5 (Out/22 a Set/23)		Ano 6 (Out/23 a Jan/24)*
		Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso
1	1,00	38,7%	27,9%	45,7%	42,5%	43,1%	9,1%	47,4%	55,6%	46,6%	30,5%	44,9%
2	3,07	97,6%	96,1%	97,8%	94,4%	97,9%	43,9%	98,1%	98,4%	98,1%	94,7%	98,1%
3	2,03	97,9%	96,5%	98,1%	96,4%	98,2%	74,5%	98,4%	98,6%	98,3%	95,9%	98,3%
4	1,04	96,2%	93,6%	97,0%	92,2%	96,7%	62,8%	97,3%	97,2%	97,0%	92,2%	96,9%
5	1,59	93,1%	87,2%	95,3%	83,7%	94,2%	49,4%	96,0%	95,7%	94,8%	86,0%	94,8%
6	5,11	5,1%	2,4%	5,1%	6,7%	4,6%	3,4%	5,3%	5,0%	4,9%	4,0%	3,9%
7	4,08	77,5%	67,7%	85,0%	54,9%	79,9%	26,3%	86,2%	83,7%	82,1%	61,2%	83,1%
8	9,16	73,4%	60,0%	82,5%	55,7%	75,7%	40,2%	84,3%	80,6%	78,6%	56,4%	78,7%
9	55,94	57,9%	37,4%	70,7%	45,2%	53,5%	34,9%	71,6%	54,1%	58,0%	29,5%	48,7%
10	25,46	2,7%	0,9%	4,4%	4,3%	4,5%	3,3%	6,7%	15,6%	5,9%	3,2%	5,8%
11	6,06	1,4%	0,7%	2,2%	2,2%	1,8%	1,2%	3,6%	3,5%	3,1%	1,1%	3,5%
12	11,22	1,9%	0,9%	3,6%	5,3%	2,7%	2,2%	5,0%	6,6%	4,7%	2,8%	3,8%
13	228,74	0,4%	0,1%	1,3%	1,1%	0,6%	0,2%	2,1%	1,4%	1,8%	0,8%	0,9%
14	193,20	0,4%	0,1%	1,0%	0,6%	0,5%	0,2%	1,4%	0,9%	0,9%	0,5%	0,5%
15	101,58	1,2%	0,3%	2,3%	0,7%	0,6%	0,1%	1,9%	0,6%	1,4%	0,2%	0,6%
16	44,67	1,1%	0,3%	2,1%	0,7%	0,5%	0,1%	1,8%	0,6%	1,2%	0,2%	0,6%
Média Geral		40,4%	35,8%	43,4%	36,7%	40,9%	22,0%	44,2%	43,6%	42,3%	34,9%	41,4%
Média Trecho 1 ao 12		53,6%	47,6%	57,3%	48,6%	54,4%	29,3%	58,3%	57,9%	56,0%	46,5%	55,0%
Média Trecho 13 ao 16		0,8%	0,2%	1,7%	0,8%	0,6%	0,2%	1,8%	0,9%	1,3%	0,4%	0,6%

Notas:\*Período chuvoso incompleto para o Ano 6 (outubro de 2023 a janeiro de 2024).

A Tabela 22 apresenta o percentual de elevação da descarga sólida em suspensão devido a ressuspensão do rejeito por trecho do PMR e para cada período do PMBA/Fest. Os percentuais foram obtidos comparando os resultados da simulação que considera a ressuspensão do rejeito proveniente do rompimento da Barragem de Fundão, com os resultados da simulação que desconsidera o rompimento. Com base nos resultados segmentados pelos trechos do PMR, as alterações são superiores a 40% no período chuvoso e superiores a 22% nos meses secos, com destaque para o ANO 4 (outubro de 2021 a setembro 2022) que apresentou o maior acumulado pluviométrico e como consequência, maiores percentuais de elevação da descarga sólida em suspensão entre os anos analisados. Adicionalmente, nos trechos a montante da barragem da UHE de Risoleta Neves (trecho 1 ao 12) que receberam rejeitos, as alterações foram mais expressivas, apresentando percentual de elevação da descarga sólida em suspensão superiores a 50% no período chuvoso e próxima ou superior a 30% no período seco. Nos trechos a jusante do reservatório de Risoleta Neves até a foz do Rio Doce (trecho 13 a 16) as maiores alterações foram de 1,8% e 0,9% no período chuvoso e seco ambos do Ano 4 do PMBA/Fest, respectivamente. Cabe destacar que os maiores volumes de depósito de rejeito no fundo da intracalha foram identificados nos trechos a montante da barragem da UHE Risoleta Neves, além de ser uma região com altos índices pluviométricos o que ajuda explicar a elevação da descarga sólida. Todavia, no extenso segmento de drenagem entre a UHE Risoleta Neves e a foz do Rio Doce, foram identificados os menores volumes de depósito de rejeito no fundo da intracalha, além de estar sobre a influência dos 4 reservatórios de UHE (Risoleta Neves, Baguari, Aimorés e Mascarenhas) que retêm sedimentos e, portanto, reduzem as alterações na descarga sólida em suspensão. Cabe destacar que, a partir dos resultados, é possível afirmar que a ressuspensão de rejeito produziu alterações significativas nos sedimentogramas, principalmente na porção superior da bacia (trecho a montante de Risoleta Neves), porém ainda que em menor amplitude, produziu elevação na descarga sólida em suspensão nos demais segmentos do Rio Doce. Observa-se também uma influência da sazonalidade da precipitação nos resultados, indicando que a depender do aporte pluviométrico na bacia, predomina a tendência a transportar mais sedimentos em comparação ao período seco e anos com baixo acumulado de chuva.

Importante destacar que o maior transporte de sedimentos em suspensão, exerce influência crítica nos ecossistemas aquáticos, afetando a qualidade da água e a vida aquática e, portanto, afeta diretamente temas do Ambiente Dulcícola e Marinho (SILVA; PASSOS, 2022). Elevadas descargas sólidas em suspensão podem dificultar a fotossíntese das plantas aquáticas, reduzindo a produtividade primária e prejudicando a respiração dos organismos aquáticos (BRODERSEN et al. 2017). Além disso, os sedimentos transportados podem carregar poluentes (metais e produtos químicos) e nutrientes (fósforo e nitrogênio) impactando a saúde dos ecossistemas (GONÇALVES; FERNANDES, 2017; CZUBA et al., 2015; FROEHNER; MARTINS, 2008). A modelagem de sedimentos também permite estimar a quantidade total de sedimentos que é exportada para a zona estuarina do Rio Doce, estabelecendo assim um elo com o Ambiente Marinho, fornecendo subsídios que podem ser utilizados para avaliar os impactos das descargas de sedimentos na zona estuarina do Rio Doce.

Tabela 23: Volume de depósito de rejeito por trecho do PMR e estimativa de percentual médio de redução do depósito de rejeito inicial por período do PMBA/Fest.

Trecho PMR	Volume inicial intracalha (m³/km)	VOLUME DE DEPÓSITO DE REJEITO (m³/km)										
		Ano 1 (Out/18 a Set/19)		Ano 2 (Out/19 a Set/20)		Ano 3 (Out/20 a Set/21)		Ano 4 (Out/21 a Set/22)		Ano 5 (Out/22 a Set/23)		Ano 6 (Out/23 a Jan/24)***
		Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Chuvoso	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso
1	10.900	10.864	10.864	10.804	10.804	10.786	10.550	10.619	10.618	10.572	10.571	10.550
2	1.746.971	1.744.747	1.744.722	1.741.635	1.741.618	1.740.493	1.725.177	1.729.895	1.729.830	1.726.659	1.726.636	1.725.177
3	17.537	17.485	17.484	17.422	17.421	17.396	17.087	17.187	17.185	17.118	17.117	17.087
4	1.676.731	1.676.459	1.676.458	1.675.731	1.675.730	1.675.604	1.670.957	1.671.973	1.671.966	1.671.177	1.671.175	1.670.957
5	281.267	281.265	281.265	281.255	281.255	281.253	281.181	281.196	281.196	281.185	281.185	281.181
6	17.142	17.119	17.119	17.091	17.090	17.078	16.937	16.980	16.980	16.947	16.946	16.937
7	13.989	13.981	13.981	13.965	13.965	13.961	13.861	13.884	13.884	13.865	13.865	13.861
8	16.698	16.649	16.648	16.598	16.595	16.571	16.305	16.394	16.392	16.327	16.325	16.305
9	14.856	14.839	14.839	14.827	14.827	14.821	14.727	14.760	14.759	14.736	14.735	14.727
10	48.318	48.242	48.243	48.167	48.163	48.136	47.682	47.831	47.827	47.715	47.711	47.682
11	106.959	106.735	106.728	106.196	106.140	105.968	104.064	104.780	104.738	104.181	104.124	104.064
13**	141	140	140	138	138	138	133	134	134	133	133	133
14**	3.327	3.255	3.255	3.139	3.135	3.118	2.913	2.995	2.994	2.921	2.921	2.913
15	222	221	221	221	221	221	219	220	220	219	219	219
16		0,07	0,11	0,19	0,19	0,21	0,32	0,24	0,24	0,26	0,28	0,32
Percentual médio de redução do volume inicial de depósito*		0,3%	0,3%	0,8%	0,9%	1,0%	1,0%	2,6%	2,0%	2,5%	2,5%	2,6%

Notas: \*O trecho 16 não foi considerado na estimativa do percentual médio de redução do volume inicial de depósito, por não possuir volume de depósito inicial. \*\*Não inclui os volumes de rejeito depositados nos reservatórios das UHEs Baguari, Aimorés e Mascarenhas, da mesma forma não são apresentados os dados para o trecho 12 do PMR por representar o reservatório da UHE Risoleta Neves. \*\*\*Período chuvoso incompleto para o Ano 6 (outubro de 2023 a janeiro de 2024).



A Tabela 23 apresenta o volume de depósito de rejeito estimado por trecho do PMR e período do PMBA/Fest. Em relação ao comportamento dos volumes de depósitos de rejeitos adotados na modelagem e fornecidos pela Fundação Renova, todos os trechos do PMR apresentaram diminuição gradual no montante inicial de depósito de rejeito ao longo dos anos, conforme dados apresentados na Tabela 23. Todavia, para os segmentos do Rio Doce que compreendem os reservatórios das UHEs e para o trecho 16 foi estimado aumento gradual. Em relação aos reservatórios ao longo do Rio Doce, entre outubro de 2018 a janeiro de 2024, o percentual de retenção de sedimentos em suspensão pelo reservatório de Risoleta Neves foi de 26% ( $21,52 \times 10^3$  t/mês), Baguari 16% ( $38,67 \times 10^3$  t/mês), Aimorés 22% ( $85,48 \times 10^3$  t/mês) e Mascarenhas 2% ( $7,22 \times 10^3$  t/mês). Nesse sentido, os reservatórios desempenham um importante papel na retenção de sedimentos produzidos nos tributários a montante de sua localização. Por outro lado, os segmentos de drenagem compreendidos ao longo do trecho 16 do PMR, compreendido entre a sede do município de Linhares e a foz do Rio Doce como observado na Figura 22, não houve volumes de depósito de rejeito segundo as informações fornecidas pela Fundação Renova conforme dados da Tabela 15, todavia a modelagem da ressuspensão indicou a presença e, aumento gradual ao longo dos anos de material proveniente da Barragem de Fundão. Os resultados do modelo demonstraram que as maiores reduções no volume inicial de depósito de rejeitos foram estimadas para o trecho 14 com percentual de 12,4% no período chuvoso parcial do Ano 6 (outubro de 2023 a janeiro de 2024), seguido pelo trecho 13 com 5,4% no mesmo período. É possível destacar ainda que o período chuvoso do Ano 4 (outubro de 2021 a março de 2022) por sua elevada média pluviométrica, ocasionou as maiores reduções nos volumes de depósito entre os períodos analisados, indicando que a precipitação é um forte indutor da ressuspensão do rejeito.

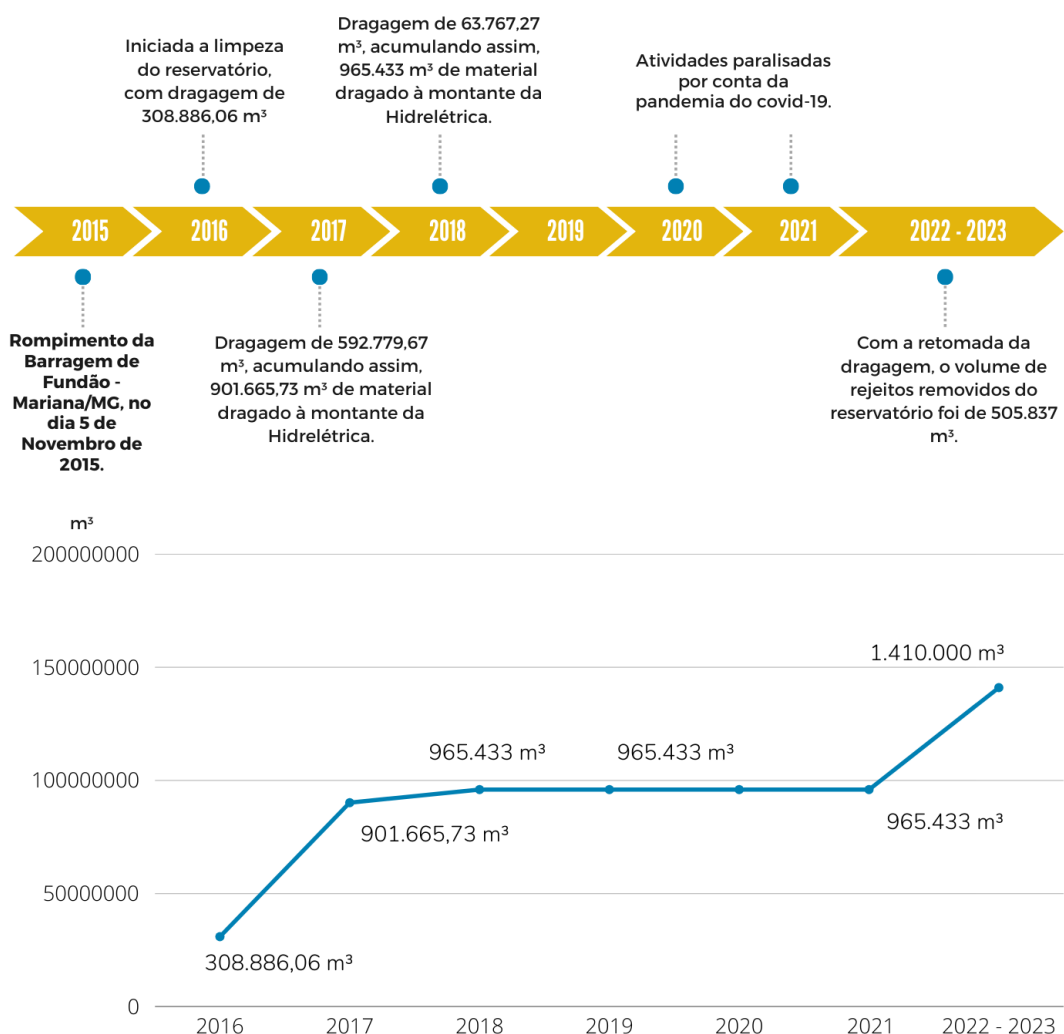
## 3.2 CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DE INTERRELAÇÕES ENVOLVENDO AÇÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA E ASPECTOS DE QUANTIDADE/QUALIDADE DA ÁGUA E BIODIVERSIDADE AQUÁTICA

### 3.2.1 Quantidade De Material Dragado Na UHE Risoleta Neves

Figura 37: Quantidade de material dragado na UHE Risoleta Neves.

#### LINHA DO TEMPO DOS PRINCIPAIS NÚMEROS DE RECUPERAÇÃO DO RESERVATÓRIO DA UHE RISOLETA NEVES, POR PARTE DA FUNDAÇÃO RENOVA

Baseado nos dados do Programa 09- Recuperação do Reservatório da UHE Risoleta Neves



#### META

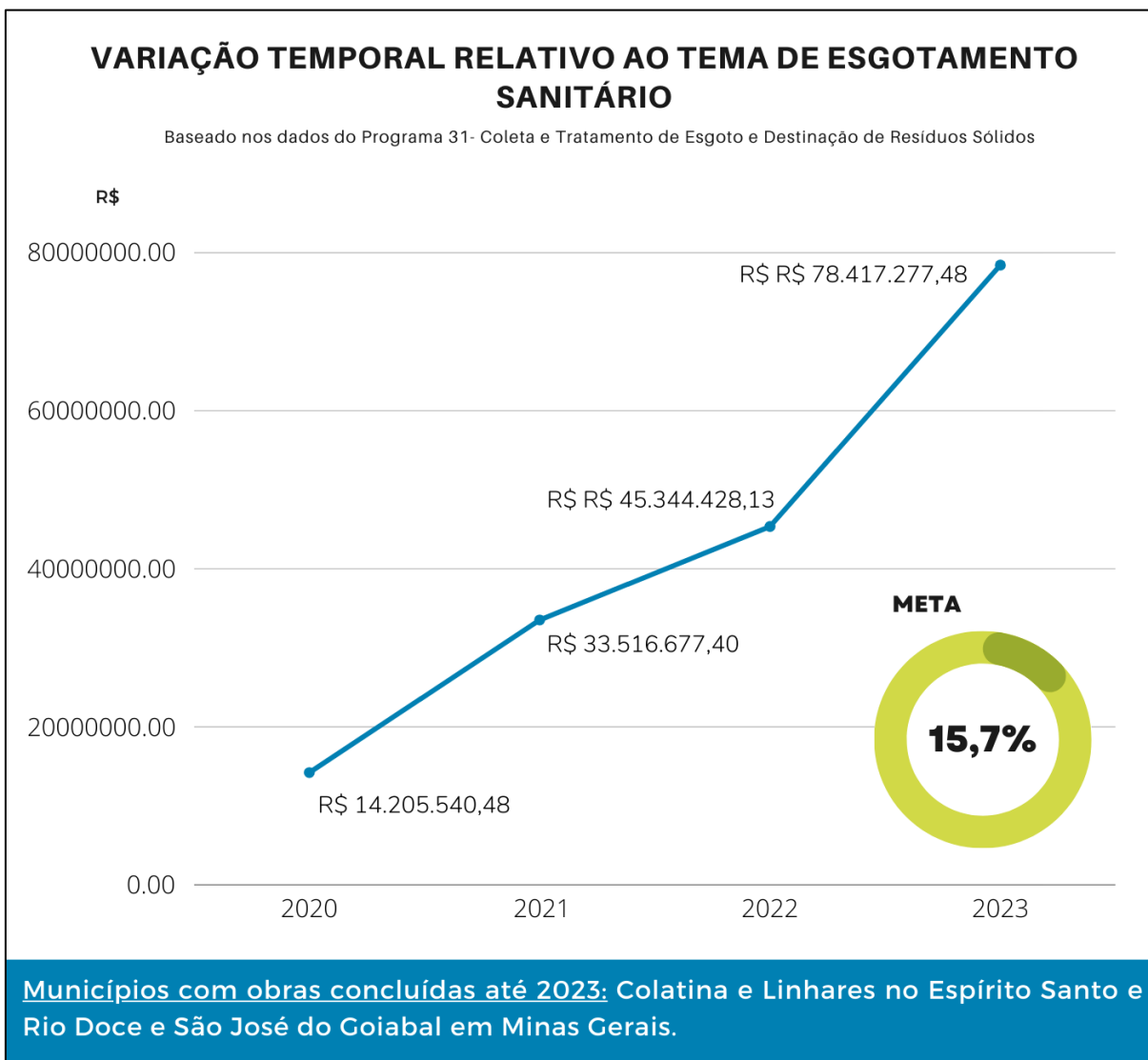
Restabelecimento das condições de operação da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves por meio da implantação de ações de desassoreamento na área de alagamento da hidrelétrica e de reparo de infraestrutura. Remoção de 450.000 m³ na retomada da dragagem após a paralização das obras por conta da pandemia do COVID-19.



Para o índice de quantidade de material dragado, foi identificada ação, no âmbito do programa 09 da Fundação Renova, que objetiva: “Restabelecimento das condições de operação da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves por meio da implantação de ações de desassoreamento na área de alagamento da hidrelétrica e de reparo de infraestrutura.” A Figura 37 representa o painel de acompanhamento dessa ação. As atividades foram iniciadas em 2016, com o objetivo de remoção emergencial do rejeito, sendo definida a área prioritária para as obras de dragagem como “400 m a montante do barramento”. Nessa região foram identificados, logo após o rompimento, 550.000 m<sup>3</sup> de material. Porém, após o período chuvoso de 2015/2016, a quantidade de material subiu para 1.600.000 m<sup>3</sup> por conta do aporte de sedimentos. Nesse contexto, a primeira etapa das obras de dragagem consistiu na remoção de 960.000 m<sup>3</sup>, até 2019. Nos anos de 2020 e 2021 as obras foram paralisadas devido à pandemia da COVID-19, sendo retomadas, então, em maio de 2022. Desde seu retorno, as obras de dragagem atingiram a meta de remoção de 450.000 m<sup>3</sup>, acumulando atualmente 1.410.000 m<sup>3</sup> de material dragado. Vale ressaltar que o cumprimento da meta não significa que todo o material depositado no reservatório usina foi removido. Portanto, está prevista continuidade da remoção. Todo o material dragado é acomodado na Fazenda Floresta, localizada a 3 km da usina. A Fazenda Floresta foi proposta em 2016 como uma área definitiva para disposição dos rejeitos dragados do reservatório da UHE Risoleta Neves. No local, o rejeito é disposto em pilhas de rejeito/estéril após o desaguamento do material, ocupando uma área estimada de 39,52 ha. Ressalta-se que os dados não foram atualizados para janeiro de 2024 uma vez que o presente relatório foi desenvolvido anteriormente à data da disponibilidade de dados referentes a esse período.

### 3.2.2 Repasse Para Ações De Esgotamento Sanitário

Figura 38: Variação Temporal do Repasse Financeiro (R\$) do Programa 31 da Fundação Renova.



As ações de esgotamento sanitário compõem o Programa 31 (PG 31) da Fundação Renova. Para estas ações foram avaliados os repasses financeiros e suas distribuições entre os municípios, a situação dos repasses e os quantitativos de municípios em cada situação (referente aos repasses). A Figura 38 apresenta a evolução temporal dos repasses financeiros. Estima-se que foi repassado até dezembro de 2023 um valor total R\$78.417.277,48, que corresponde a 15,7% do total acordado no TTAC. Vale ressaltar que parcela da meta engloba repasses referentes a ações de tratamento e destinação final de resíduos sólidos, que não foi computado nesse indicador. Ressalta-se que os dados não foram atualizados para janeiro de 2024 uma vez que o presente relatório foi desenvolvido anteriormente à data da disponibilidade de dados referentes a esse período.

Figura 39: Distribuição dos repasses financeiros aos municípios do Programa 31 - Situação identificada até dezembro de 2023.

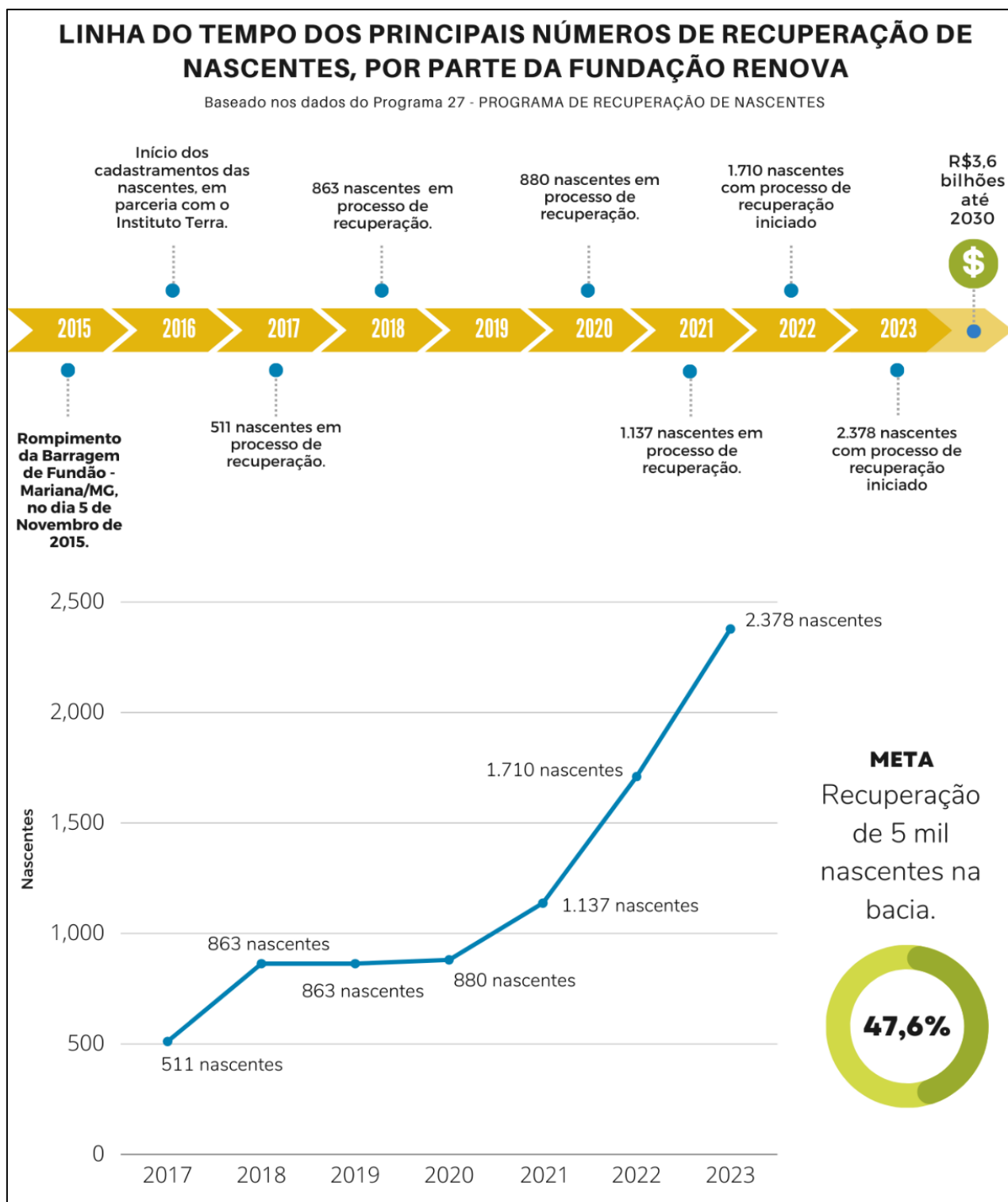




A Figura 39 apresenta a distribuição dos repasses financeiros aos municípios dentro do Programa 31. É apresentada também a situação do desenvolvimento das obras correlatas. Dos municípios contemplados pelas ações do PG31 verificou-se que quatro se encontram com repasse ainda não iniciado, 18 estão em fase inicial do repasse da verba, 13 se encontram com obras em andamento e quatro com obras concluídas. Ressalta-se que os dados não foram atualizados para janeiro de 2024 uma vez que o presente relatório foi desenvolvido anteriormente à data da disponibilidade de dados referentes a esse período

### 3.2.3 Nascentes Recuperadas

Figura 40: Nascentes recuperadas.

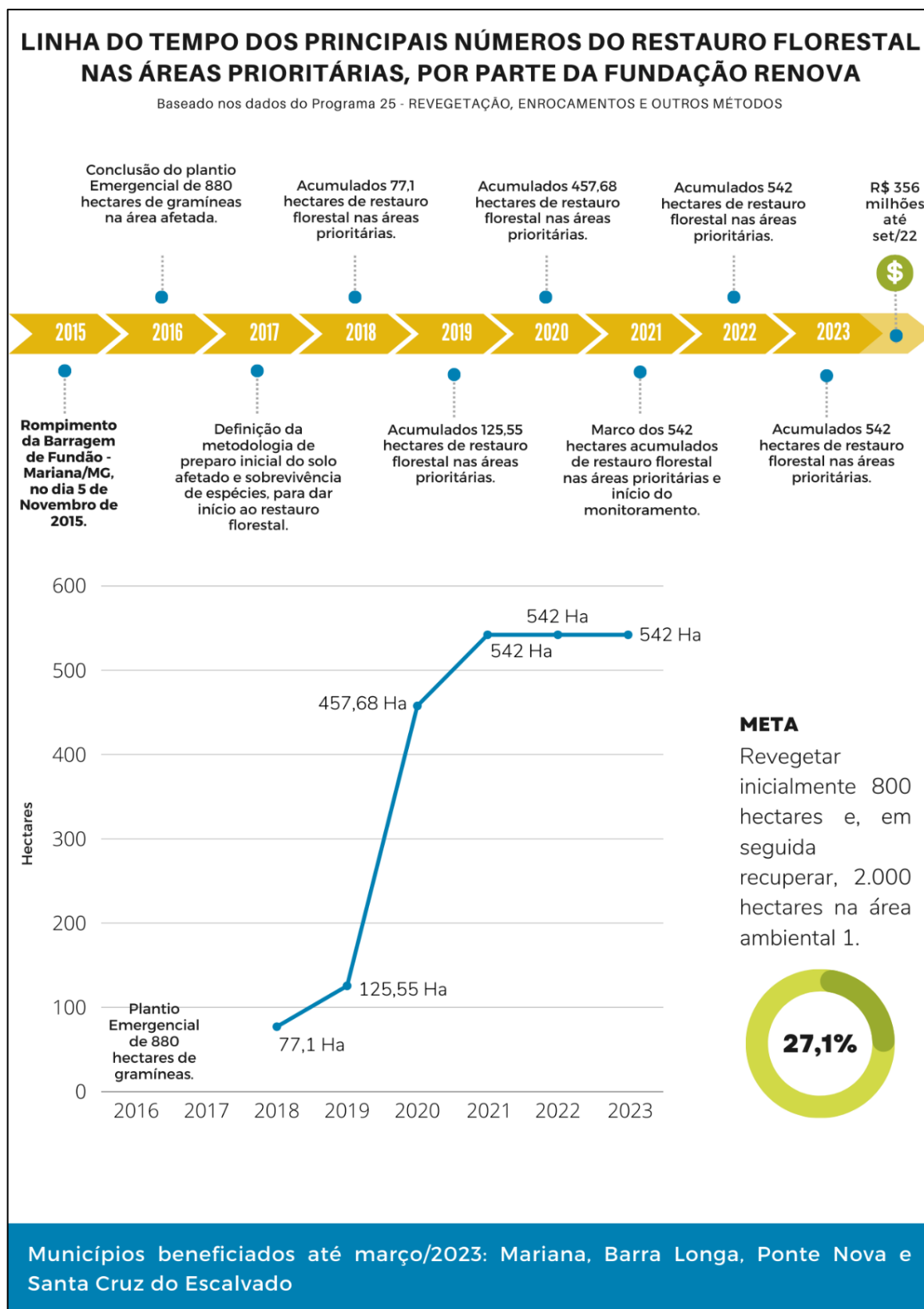


Para o índice de nascentes recuperadas, representado na Figura 40 foram identificadas ações, no âmbito do programa 27 da Fundação Renova, que visam a recuperação de nascentes na bacia do rio

Doce até 2030, demandando investimento previsto de R\$ 3,6 bilhões. Até dezembro de 2023, 47,6% da meta foi executada. O programa visa abranger nascentes localizadas nos municípios de Mariana, Barra Longa, Santa Cruz do Escalvado, Alpercata, Governador Valadares, Tumiritinga, Galiléia, Resplendor, Itueta, Ponte Nova, Santana do Paraíso, Belo Oriente, Periquito, Fernandes Tourinho e Aimorés, em Minas Gerais, bem como em Baixo Guandu, Colatina, Marilândia e Linhares, no Espírito Santo. Em 2017, o total de 511 nascentes protegidas foi alcançado, em regiões das bacias dos rios Suaçuí Grande, em Minas Gerais, e Santa Maria do Rio Doce e Pancas, no Espírito Santo. Em 2018, 352 foram protegidas e recuperadas, totalizando 863 nascentes com processos de recuperação iniciados. Em 2019, ocorreu plantio de 355 mil mudas para recuperação dessas 863 nascentes protegidas. Em 2020, 880 nascentes, no total, entraram em processo de recuperação e 239 mil mudas foram plantadas. Em 2021, este número cresceu para 1.137 nascentes e o total acumulado para 2022 foi de 1.710 nascentes em processo de recuperação. Em 2023, foi acumulado um montante de 2.378 nascentes em processo de recuperação. Ressalta-se que os dados não foram atualizados para janeiro de 2024 uma vez que o presente relatório foi desenvolvido anteriormente à data da disponibilidade de dados referentes a esse período.

### 3.2.4 Áreas reflorestadas

Figura 41: Restauro Florestal.

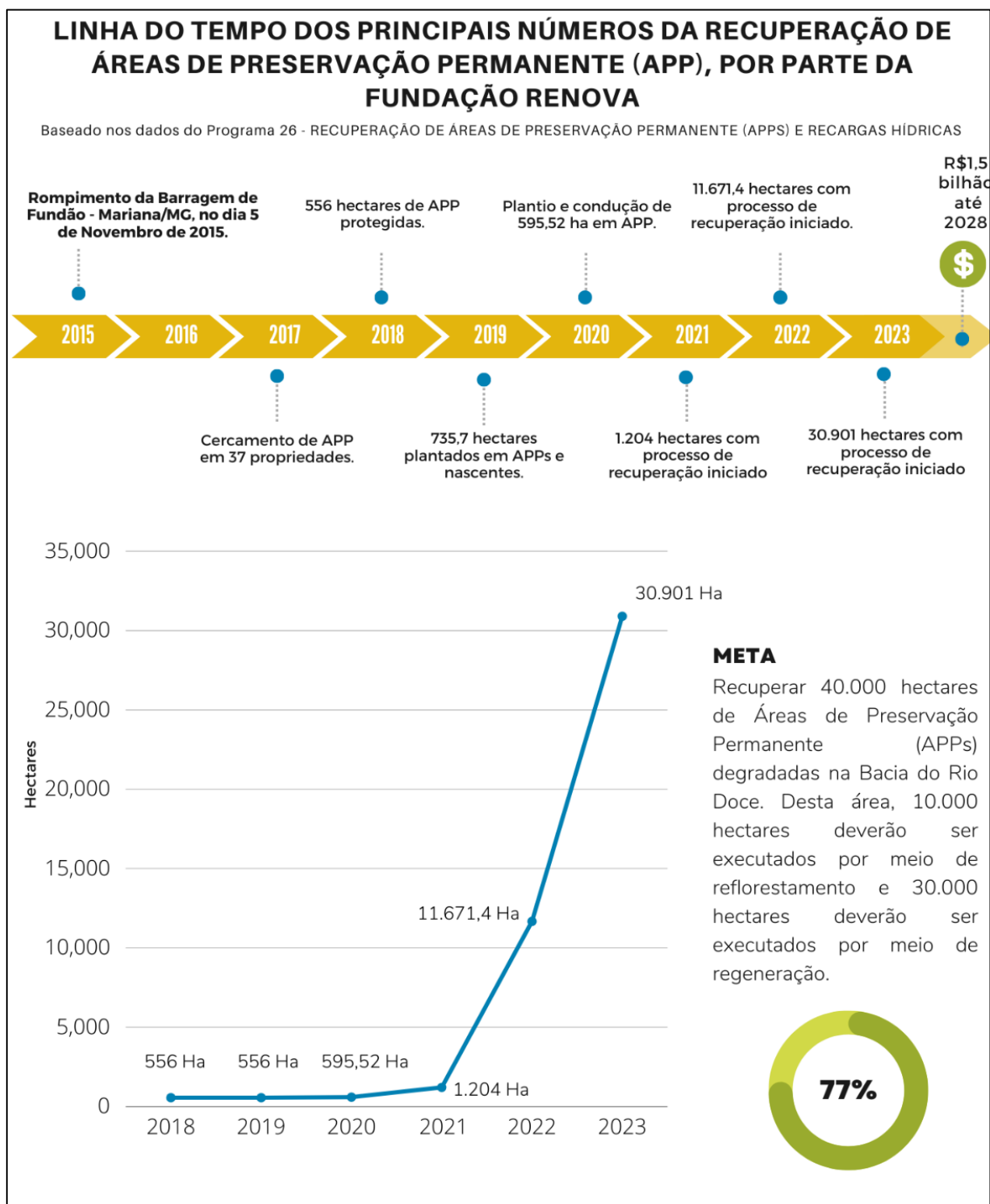


Para o índice de áreas reflorestadas, representado na Figura 41, foram identificadas ações, no âmbito do programa 25 da Fundação Renova, que visam a recuperação das áreas diretamente atingidas pelo rompimento da barragem. Estas áreas englobam os municípios de Mariana, Barra Longa, Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado. As ações foram iniciadas em 2016, ano seguinte ao rompimento da Barragem de Fundão, com o plantio emergencial de 800 ha de gramíneas na área diretamente afetada, que tem porções nos municípios listados. Em 2017, foi elaborada a metodologia de restauro florestal para a área afetada, visando preparação do solo e sobrevivência das espécies. Desde então, foram restaurados nessa área 542 hectares, com investimento de R\$ 356 milhões. Considerando que 1.026,65 hectares foram devastados e tiveram coberturas vegetais removidas pela lama na área diretamente afetada (FREITAS; SILVA; MENEZES, 2016), de acordo com os dados levantados, 56,6% foram recuperados. A meta da Fundação Renova consiste em recuperar 2.000 hectares dessa área. É observado na Figura 41 que, até dezembro de 2023, 27,1% da meta proposta foi alcançada. Ressalta-se ainda que a partir de 2021 foi iniciado monitoramento das áreas restauradas, previsto para ser realizado até 2026, com investimento de R\$ 81 milhões. A Fundação Renova é responsável pela manutenção das ações, incluindo roçadas, adubações, combates a formigas e replantios. Ressalta-se que os dados não foram atualizados para janeiro de 2024 uma vez que o presente relatório foi desenvolvido anteriormente à data da disponibilidade de dados referentes a esse período.



### 3.2.5 Áreas De Preservação Permanente Recuperadas

Figura 42: Recuperação de APPs.



Para o índice de áreas de APPs em recuperação, representado na Figura 42, foram identificadas ações, no âmbito do Programa 26 da Fundação Renova, que visam recuperar áreas de preservação

permanente da bacia do rio Doce. As principais ações relacionadas com este tema foram iniciadas em 2017, com o cercamento de APPs em 37 propriedades, no município de Mariana. Em 2018, houve expansão das ações de proteção de APPs, com 556 hectares em processos de recuperação e contemplando áreas nos municípios de Galiléia, São Vitor (Governador Valadares), Periquito e Coimbra, no estado de Minas Gerais, bem como em Pancas, Marilândia e Colatina, no estado do Espírito Santo. Dos municípios listados, Pancas e Coimbra não fazem parte do grupo de municípios diretamente afetados pelo rompimento da Barragem de Fundão. A área se manteve em 556 hectares em 2019 e aumentou para 595,52 hectares em 2020. No ano de 2021, a área aumentou para 1.204 hectares. Em 2022 houve aumento para 11.671 hectares. Em 2023 a área acumulada equivaliu a 30.901 hectares. Estima-se até 2028 investimento de 1,5 bilhão, contemplando áreas nos municípios de Mariana, Barra Longa, Santa Cruz do Escalvado, Alpercata, Governador Valadares, Tumiritinga, Galiléia, Resplendor, Itueta, Ponte Nova, Santana do Paraíso, Belo Oriente, Periquito, Fernandes Tourinho, em Minas Gerais, e Marilândia, Pancas, Baixo Guandu, Colatina e Linhares, no Espírito Santo. No total, a Fundação Renova pretende recuperar 40.000 hectares de APPs degradadas na Bacia do Rio Doce, sendo 10.000 hectares por meio de reflorestamento e 30.000 hectares por meio de regeneração. Até dezembro de 2023, 77% da meta proposta foi alcançada. Ressalta-se que os dados não foram atualizados para Janeiro de 2024 uma vez que o presente relatório foi desenvolvido anteriormente à data da disponibilidade de dados referentes a esse período.

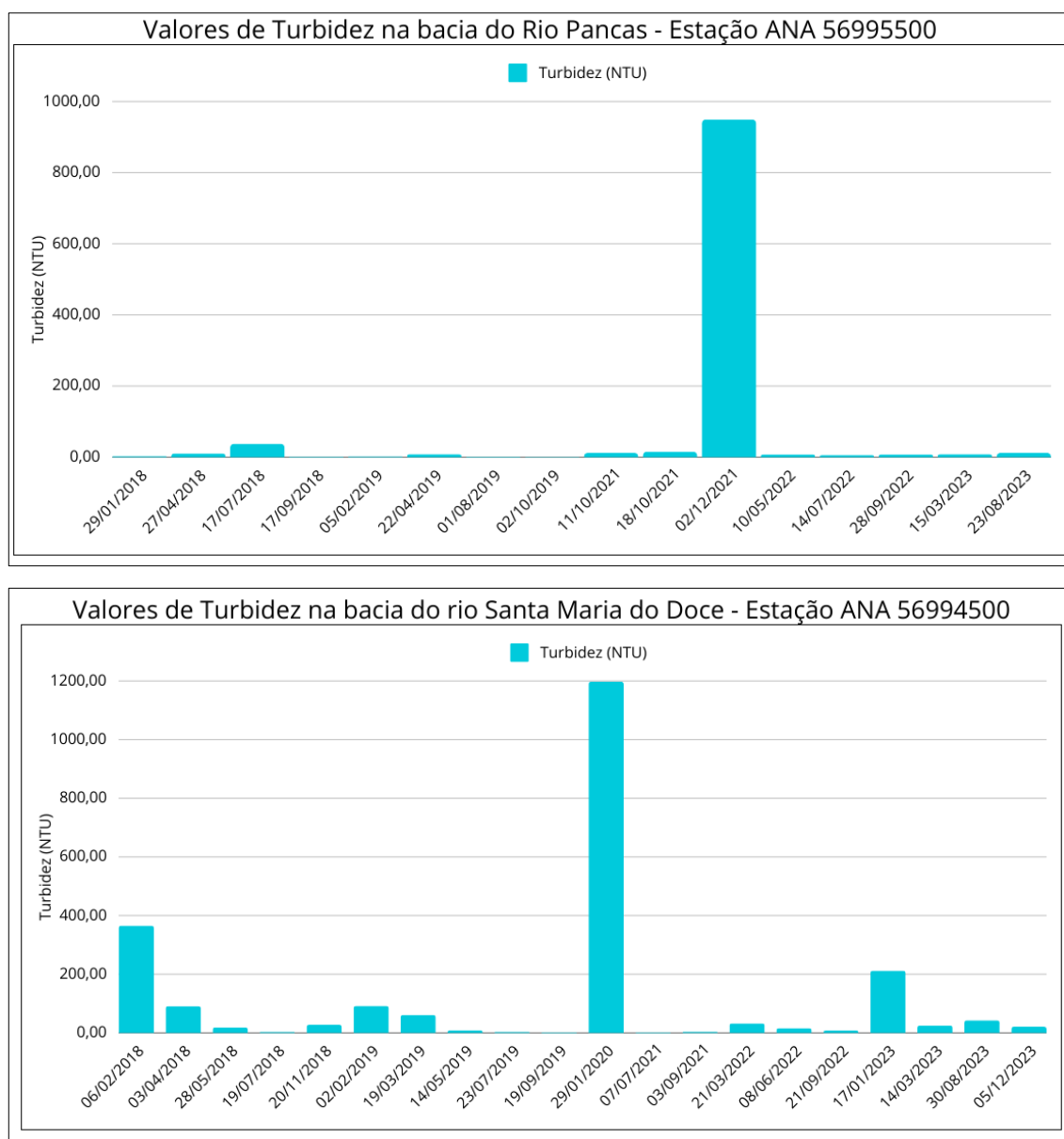
Tabela 24: Caracterização das áreas de intervenções relativas as ações dos Programas 26 - Recuperação Da Áreas De Preservação Permanente e De Recarga Hídrica Degradadas Da Bacia Do Rio Doce e Programa 27 - Recuperação De Nascentes. da Fundação Renova.

Estação	Responsável	Bacia	Área de Drenagem (km <sup>2</sup> )	Área de intervenção das ações dos Programas 26 e 27 (km <sup>2</sup> )	Percentual das áreas de intervenção dos Programas 26 e 27 em relação à área total de cada sub-bacia (%)
56846000	ANA	Rio Corrente Grande	2458,02	79,95	3,25
56995500	ANA	Rio Pancas	1052,72	20,61	1,96
56994500	ANA	Rio Santa Maria do Doce	961,31	17,44	1,81
56989400	ANA	Rio Manhuaçu	8891,82	151,59	1,70
56978000					
56992000	ANA	Rio Guandu	2162,25	59,32	2,74

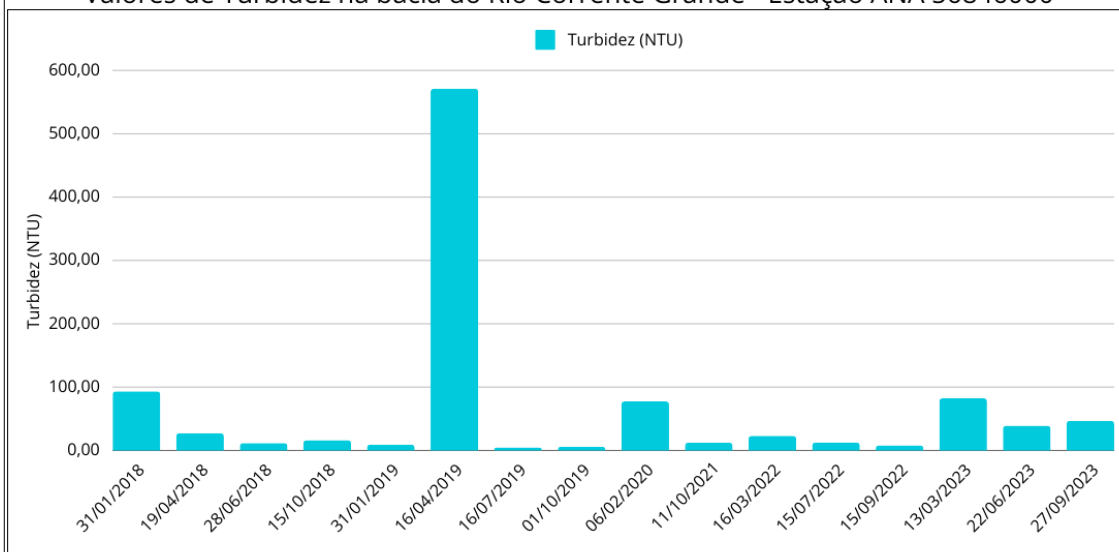
A Tabela 24 indica as áreas de drenagem das bacias estudadas, as áreas de intervenção das ações dos Programas 26 - Recuperação Da Áreas De Preservação Permanente e De Recarga Hídrica Degradadas Da Bacia Do Rio Doce e Programa 27 - Recuperação De Nascentes, bem como o

percentual das áreas de intervenção em relação à área total de cada sub-bacia. As somas das áreas de intervenção são em geral muito menores do que as áreas das bacias avaliadas. Desta forma, a tendência é que os efeitos positivos das intervenções sobre o parâmetro Turbidez e registrados nos postos de monitoramento sejam relativamente muito pequenos. Contudo, os efeitos poderão ser muito significativos sobre a quantidade e a qualidade da água em cursos d'água das microbacias onde forem efetuadas as ações.

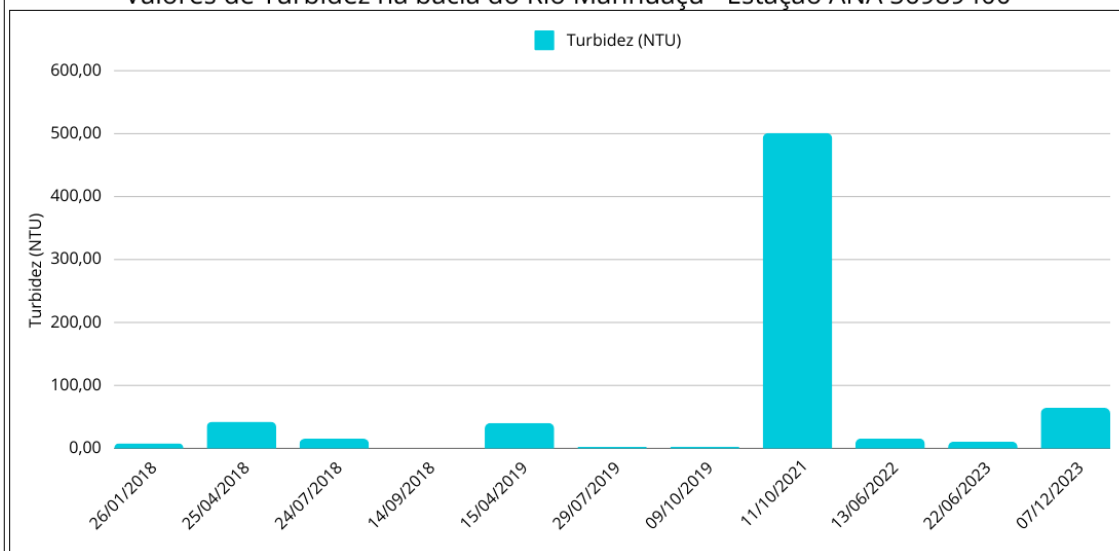
Figura 43: Valores de Turbidez para as bacias com maiores densidades de ações de preservação de APPs e Nascentes no período entre 2018 e 2023.

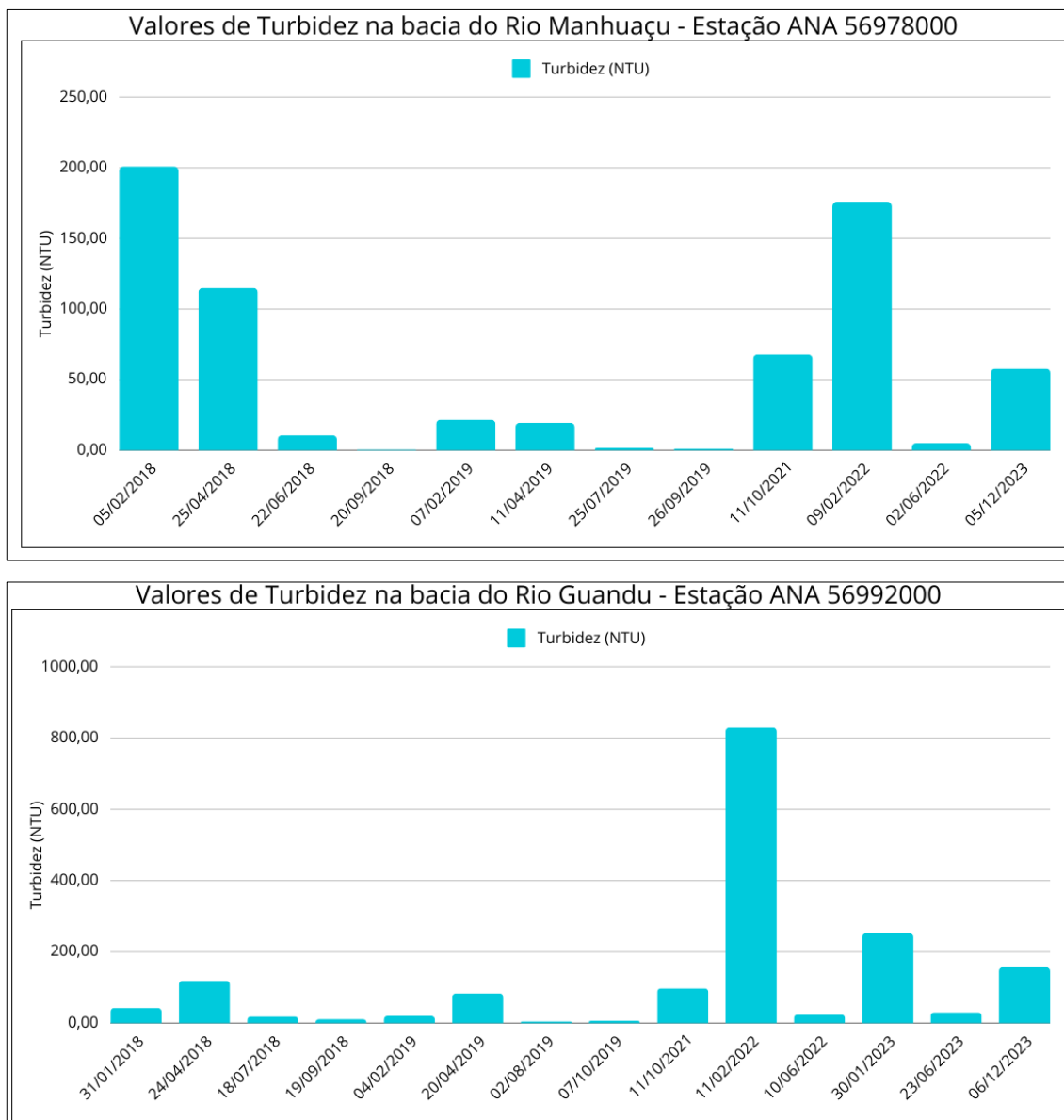


Valores de Turbidez na bacia do Rio Corrente Grande - Estação ANA 56846000



Valores de Turbidez na bacia do Rio Manhuaçu - Estação ANA 56989400





Com a finalidade de complementar a análise da qualidade de água relacionada a presença das ações de proteção de APP e nascentes, foram avaliados os valores de turbidez medidos nas bacias de interesse nos anos de 2018 a 2023. Observa-se que os maiores valores de Turbidez foram registrados, nas medições realizadas entre 2018 e 2023, nas proximidades da foz da bacia do rio Santa Maria do Doce, 1.198 NTU, nas proximidades da foz da bacia do rio Pancas, 945 NTU (Figura 43).

Tabela 25: Uso e Ocupação do Solo, referente ao ano de 2016, para a sub-bacia do Rio Corrente Grande e para o conjunto de ações dos Programas 26 - Recuperação Da Áreas De Preservação Permanente e De Recarga Hídrica Degradadas Da Bacia Do Rio Doce e Programa 27 -

Usos e Ocupação do Solo		Estimativas de área de diferentes Uso e Ocupação do Solo de 2016		
Classes	Áreas de cada uso na bacia (km <sup>2</sup> )	Área Programas 26 e 27 (km <sup>2</sup> )	PERCENTUAL DOS USOS NA SUB-BACIA (%)	PERCENTUAL DOS USOS NOS Programas 26 e 27 (%)
Formação Florestal	1.003,50	69,39	41	86,62
Formação Savânica	50,74	0,4	2,07	0,50
Silvicultura	144,24	0,89	5,9	1,11
Formação Campestre	0,03	0	0,001	0,00
Pastagem	924,71	3,91	37,8	4,80
Mosaico de Usos (Agropecuária)	312,97	5,51	12,8	6,88
Área Urbanizada	9,08	0	0,37	0,00
Outras Áreas não vegetadas	0,6	0,01	0,025	0,01
Total	2445,87	80,11	100,000	100,00

Na bacia do Rio Corrente Grande foram identificadas oito diferentes classes de usos e ocupação do solo (Tabela 25) sendo a classe Formação Florestal a que apresentou maior valor de área, ocupando aproximadamente 41% da área total desta sub-bacia, seguida do uso Pastagem com cerca de 37,8%. A última coluna apresenta os percentuais relativos às áreas de intervenção dos PG26 e 27 correspondentes às diferentes classes de uso e ocupação. Verifica-se a presença de oito classes de usos e ocupações nesta sub-bacia, mas apenas 7 classes nas localidades onde se encontra o conjunto de ações dos Programa 26 e Programa 27, sendo o uso Área Urbanizada o único não identificado nas regiões de atuação dos Programas. A classe Formação Florestal apresenta o maior percentual de área, sendo este de aproximadamente de 86,62% seguido do uso Mosaico de Usos com 6,88%.

Tabela 26: Uso e Ocupação do Solo, referente ao ano de 2016, para a sub-bacia do Rio Guandu e para o conjunto de ações dos PG 26 e PG27.

Usos e Ocupação do Solo		Estimativas de área de diferentes Uso e Ocupação do Solo de 2016		
Classes	Áreas de cada uso na bacia (km <sup>2</sup> )	Área Programas 26 e 27 (km <sup>2</sup> )	PERCENTUAL DOS USOS NA SUB-BACIA (%)	PERCENTUAL DOS USOS NOS Programas 26 e 27 (%)
Formação Florestal	441,24	30,43	20,90	51,46
Formação Savânica	1,25	0,06	0,06	0,11
Silvicultura	90,13	0,66	4,27	1,11
Outras Formações não Florestais	0,10	0,00	0,00	0,00
Pastagem	1109,57	9,72	52,56	16,43
Mosaico de Usos	459,15	18,26	21,75	30,87
Área Urbanizada	6,22	0,00	0,29	0,00
Outras Áreas não vegetadas	3,45	0,01	0,16	0,03



Na bacia do Rio Guandu foram identificadas oito diferentes classes de usos e ocupação do solo (Tabela 26), sendo a classe Pastagem a que apresentou maior valor de área, ocupando aproximadamente 52,5% da área total desta sub-bacia, seguida das classes Mosaico de Usos (Agropecuária), com cerca de 21,75%, e Formação Florestal com aproximadamente 20,90%. Verifica-se a presença de oito classes de usos e ocupações nesta sub-bacia, mas apenas 7 classes nas localidades onde se encontra o conjunto de ações dos PG26 e PG27. Nas áreas de atuação dos Programas 26 e 27 a classe mais expressiva quanto ao total de área ocupada foi Formação Florestal, apresentando o maior percentual de área, sendo este de aproximadamente 51,46 %, seguido da classe Pastagem, com 30,87%. A última coluna apresenta o quanto da área da sub-bacia os PG 26 e 27 ocupam, para cada classe de uso e ocupação.

Tabela 27: Uso e Ocupação do Solo, referente ao ano de 2016, para a sub-bacia do Rio Manhuaçu e para o conjunto de ações dos Programas 26 e 27.

Usos e Ocupação do Solo		Estimativas de área de diferentes Uso e Ocupação do Solo de 2016		
Classes	Áreas de cada uso na bacia (km <sup>2</sup> )	Área Programas 26 e 27 (km <sup>2</sup> )	PERCENTUAL DOS USOS NA SUB-BACIA (%)	PERCENTUAL DOS USOS NOS Programas 26 e 27 (%)
Formação Florestal	1773,56	78,82	20,58	52,05
Formação Savânica	54,17	0,81	0,63	0,53
Silvicultura	102,33	0,69	1,19	0,46
Outras Formações não Florestais	0,03	0,00	0,00	0,00
Pastagem	3603,59	18,78	41,82	12,40
Mosaico de Usos	2993,52	52,31	34,74	34,54
Área Urbanizada	25,63	0,01	0,30	0,01
Outras Áreas não vegetadas	3,76	0,01	0,04	0,01
Agricultura	59,39	0,00	0,69	0,00
Total	8615,98	151,43	100,00	100,00

Na bacia do Rio Manhuaçu foram identificadas nove diferentes classes de usos e ocupação do solo (Tabela 27), sendo a classe Pastagem a que apresentou maior valor de área, ocupando aproximadamente 41,82 % da área total desta sub-bacia, seguida das classes Mosaico de Usos (Agropecuária), com cerca de 34,74 %, e Formação Florestal, com aproximadamente 20,58%. Verifica-se a presença de nove classes de usos e ocupações nesta sub-bacia, mas apenas sete classes nas localidades onde se encontra o conjunto de ações dos Programas 26 e 27. Nas áreas de atuação dos Programas 26 e 27, a classe mais expressiva quanto ao total de área ocupada foi Formação Florestal, apresentando o maior percentual de área, sendo este aproximadamente 52,05 %, seguida da classe Mosaico de Usos (Agropecuária), com 34,54 %. A última coluna apresenta o quanto da área da sub-bacia os Programas 26 e 27 ocupam, para cada classe de uso e ocupação.

Tabela 28: Uso e Ocupação do Solo, referente ao ano de 2016, para a sub-bacia do Rio Pancas e para o conjunto de ações dos Programas 26 e 27.

Usos e Ocupação do Solo		Estimativas de área de diferentes Uso e Ocupação do Solo de 2016		
Classes	Áreas de cada uso na bacia (km2)	Área Programas 26 e 27 (km2)	PERCENTUAL DOS USOS NA SUB-BACIA (%)	PERCENTUAL DOS USOS NOS PROGRAMAS 26 e 27 (%)
Formação Florestal	158,41	6,27	16,34	30,48
Formação Savânica	0,15	0,03	0,02	0,15
Silvicultura	23,9	0,51	2,47	2,48
Outras Formações não Florestais	0,52	0	0,05	0,00
Pastagem	527,43	7,26	54,41	35,29
Mosaico de Usos	255,26	6,5	26,33	31,60
Área Urbanizada	3	0	0,31	0,00
Outras Áreas não vegetadas	0,69	0	0,07	0,00
Agricultura	0,01	0	0,001	0,00
Total	969,37	20,57	100,00	100,00

Na bacia do Rio Pancas foram identificadas nove diferentes classes de usos e ocupação do solo (Tabela 29), sendo a classe Pastagem a que apresentou maior valor de área, ocupando aproximadamente 54,41% da área total desta sub-bacia, seguida das classes Mosaico de Usos (Agropecuária), com cerca de 26,33 %, e Formação Florestal, com aproximadamente 16,34 %. Verifica-se a presença de nove classes de usos e ocupações nesta sub-bacia, mas apenas sete classes nas localidades onde se encontra o conjunto de ações dos Programas 26 e 27. Nas áreas de atuação dos Programas 26 e 27, a classe mais expressiva quanto ao total de área ocupada foi Pastagem, apresentando o maior percentual de área, sendo este de aproximadamente de 35,29%, seguido do uso Mosaico de Usos (Agropecuária), com 31,60 %, e Formação Florestal, com 30,48%. A última coluna apresenta o quanto da área da sub-bacia os Programas 26 e 27 ocupam, para cada classe de uso e ocupação.

Tabela 29: Uso e Ocupação do Solo, referente ao ano de 2016, para a sub-bacia do Rio Santa Maria do Rio Doce para o conjunto de ações dos PG 26 e 27.

Usos e Ocupação do Solo		Estimativas de área de diferentes Uso e Ocupação do Solo de 2016		
Classes	Áreas de cada uso na bacia (km2)	Área Programa 26 e 27 (km2)	PERCENTUAL DOS USOS NA SUB-BACIA (%)	PERCENTUAL DOS USOS NOS PROGRAMAS 26 e 27 (%)
Formação Florestal	139,23	4,69	14,94	27,05
Silvicultura	45,06	0,17	4,84	0,98
Outras Formações não Florestais	0,14	0,01	0,02	0,06
Pastagem	521,28	6,68	55,94	38,52

Usos e Ocupação do Solo		Estimativas de área de diferentes Uso e Ocupação do Solo de 2016		
Classes	Áreas de cada uso na bacia (km <sup>2</sup> )	Área Programa 26 e 27 (km <sup>2</sup> )	PERCENTUAL DOS USOS NA SUB-BACIA (%)	PERCENTUAL DOS USOS NOS Programas 26 e 27 (%)
Mosaico de Usos	219,31	5,78	23,54	33,33
Área Urbanizada	5,96	0	0,64	0,00
Outras Áreas não vegetadas	0,82	0	0,09	0,00
Total	931,82	17,34	100,00	100,00

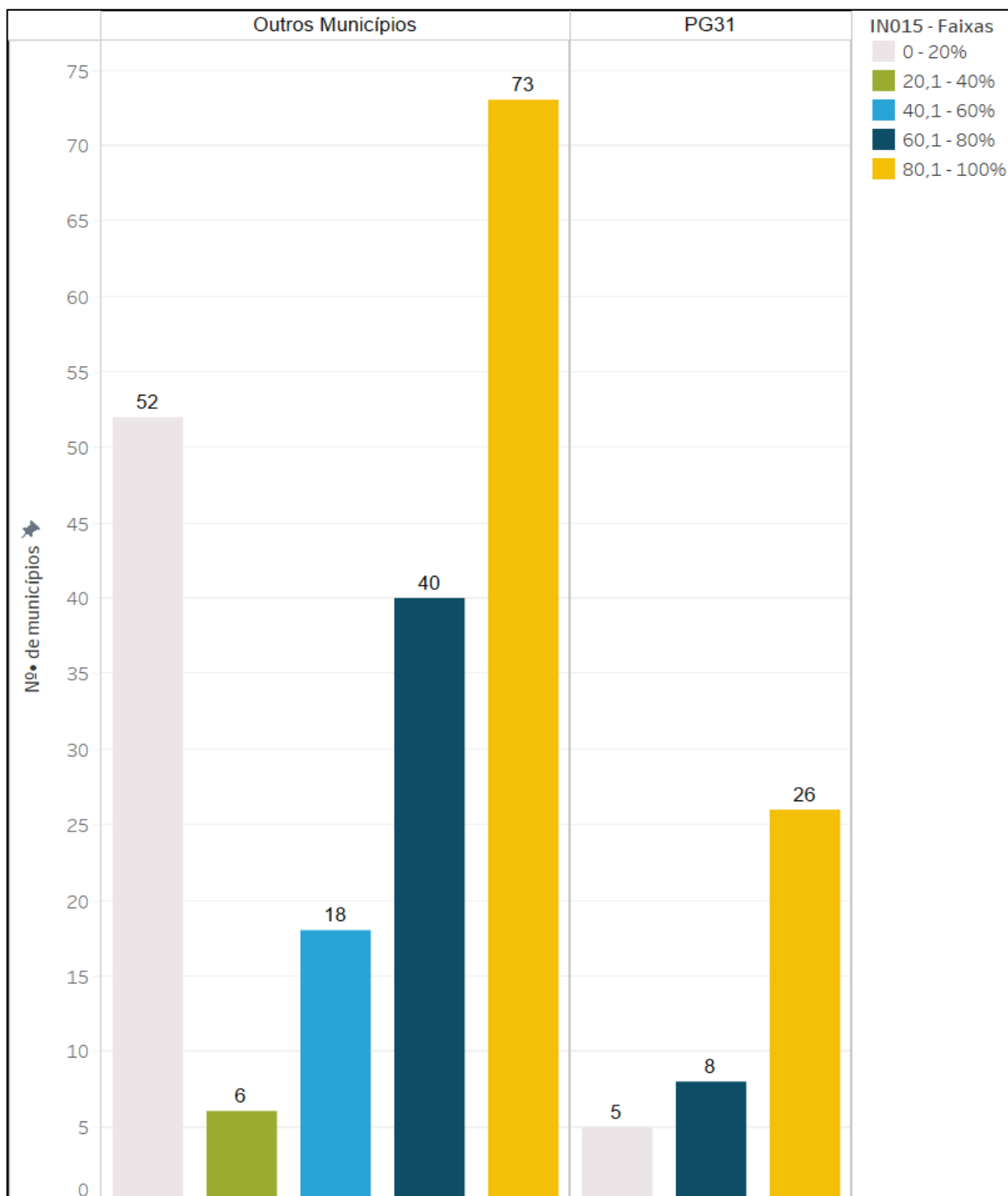
Na bacia do Rio Santa Maria do Doce foram identificadas sete diferentes classes de usos e ocupação do solo (Tabela 29), sendo a classe Pastagem a que apresentou maior valor de área, ocupando aproximadamente 55,94% da área total desta sub-bacia, seguida das classes Mosaico de Usos (Agropecuária), com cerca de 23,54%, e Formação Florestal, com aproximadamente 14,94%. Verifica-se a presença de sete classes de usos e ocupações nesta sub-bacia, mas apenas cinco classes nas localidades onde se encontram o conjunto de ações dos Programa 26 e Programa 27, o uso mais expressivo, quanto ao total de área ocupada é Pastagem, apresentando o maior percentual de área, sendo este aproximadamente 38,52%, seguido da classe Mosaico de Usos (Agropecuária), com 33,33%, e Formação Florestal, com 27,05 %. A última coluna apresenta o quanto da área da sub-bacia os PG 26 e 27 ocupam, para cada classe de uso e ocupação.

Da Tabela 27 a Tabela 31 é possível observar que as áreas nas quais estão previstas intervenções dos Programas 26 e 27 são muito inferiores às das sub-bacias correspondentes. Desta forma, e considerando que entre 2016 e 2023 as intervenções foram realizadas parcialmente, pode-se concluir que seus efeitos sobre a quantidade e a qualidade das águas lançadas pelos rios na calha do rio Doce não foram influenciados significativamente pelas ações realizadas neste período.

Mesmo após a conclusão das intervenções a quantidade e a qualidade das águas da calha do rio Doce continuarão sendo muito pouco influenciadas pelas intervenções previstas nas sub-bacias consideradas. Contudo, caso se considerem, ao invés das sub-bacias inteiras, as microbacias onde ocorrerão, os impactos positivos poderão ser muito significativos, beneficiando os recursos hídricos e a biodiversidade locais.

### 3.2.6 Índices de Estimativas de Esgotamento Sanitário

Figura 44: Distribuição dos municípios quanto ao IN015 - Taxa de cobertura do serviço de coleta de esgotos em relação à população total do município do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento.

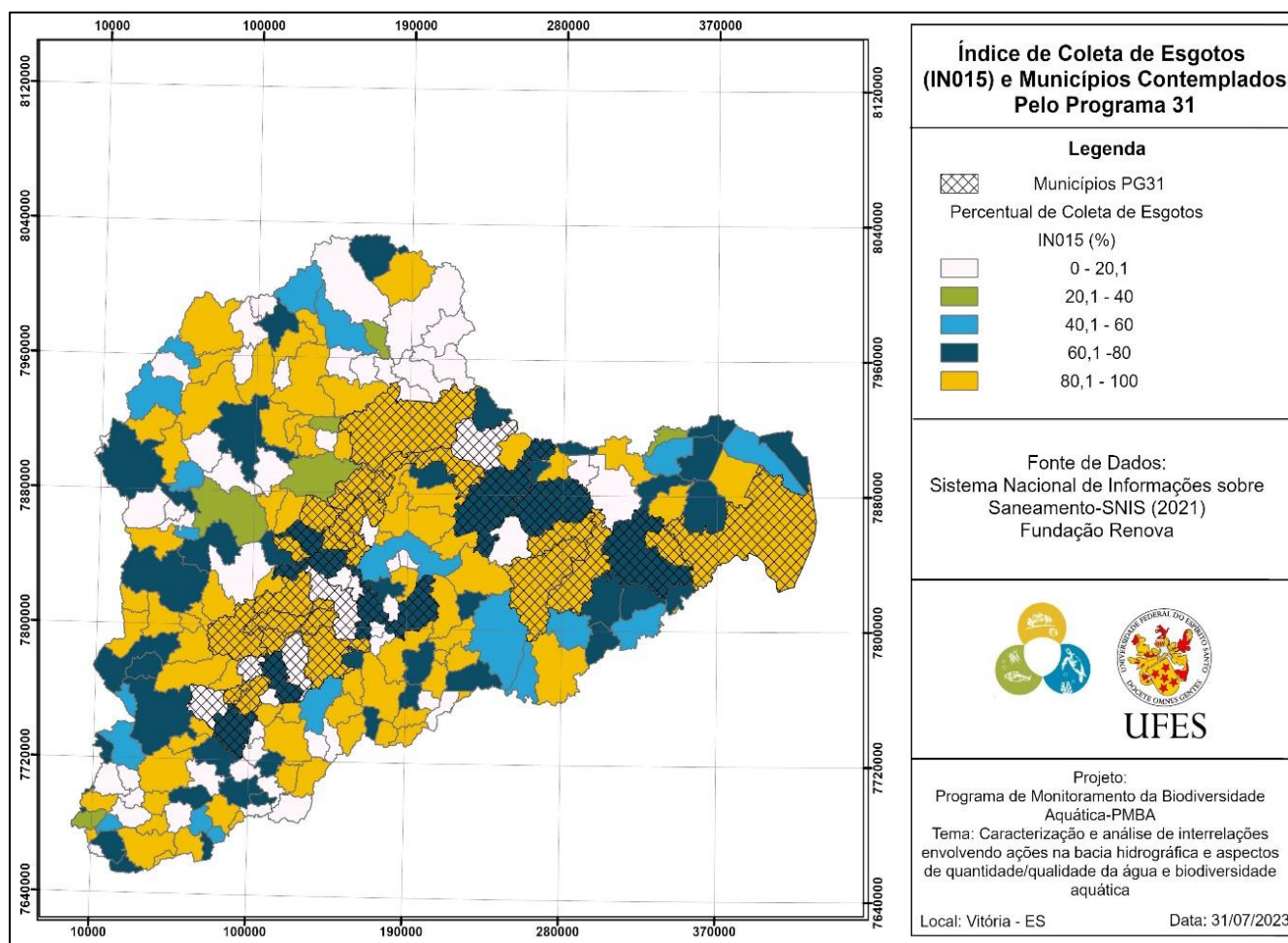


A Figura 44 agrupa os municípios em 5 diferentes faixas de atendimento ao IN015, separando estes quanto à participação ou não no Programa 31 (PG31) da Fundação Renova. Dos 39 municípios que compõem o PG031, 26 possuem de 80,1 a 100% de atendimento de coleta de esgotos, correspondendo

a um percentual de aproximadamente 66,6%. Os valores de números de municípios não participantes do PG 31 são apresentados no lado esquerdo do gráfico sob o título “Outros Municípios”, havendo 73 municípios presentes na faixa de 80,1 a 100%, o que corresponde aproximadamente a 38,62% do total de municípios pertencentes ao grupo “Outros Municípios”. O grupo “Outros Municípios” possui 27,51%, o que corresponde a 52 municípios, com valores de atendimento do IN015 dentro da faixa inferior (0-20%), enquanto o grupo do PG 31 apresenta 12,82% (5 municípios) de seu conjunto de municípios dentro dessa mesma faixa.

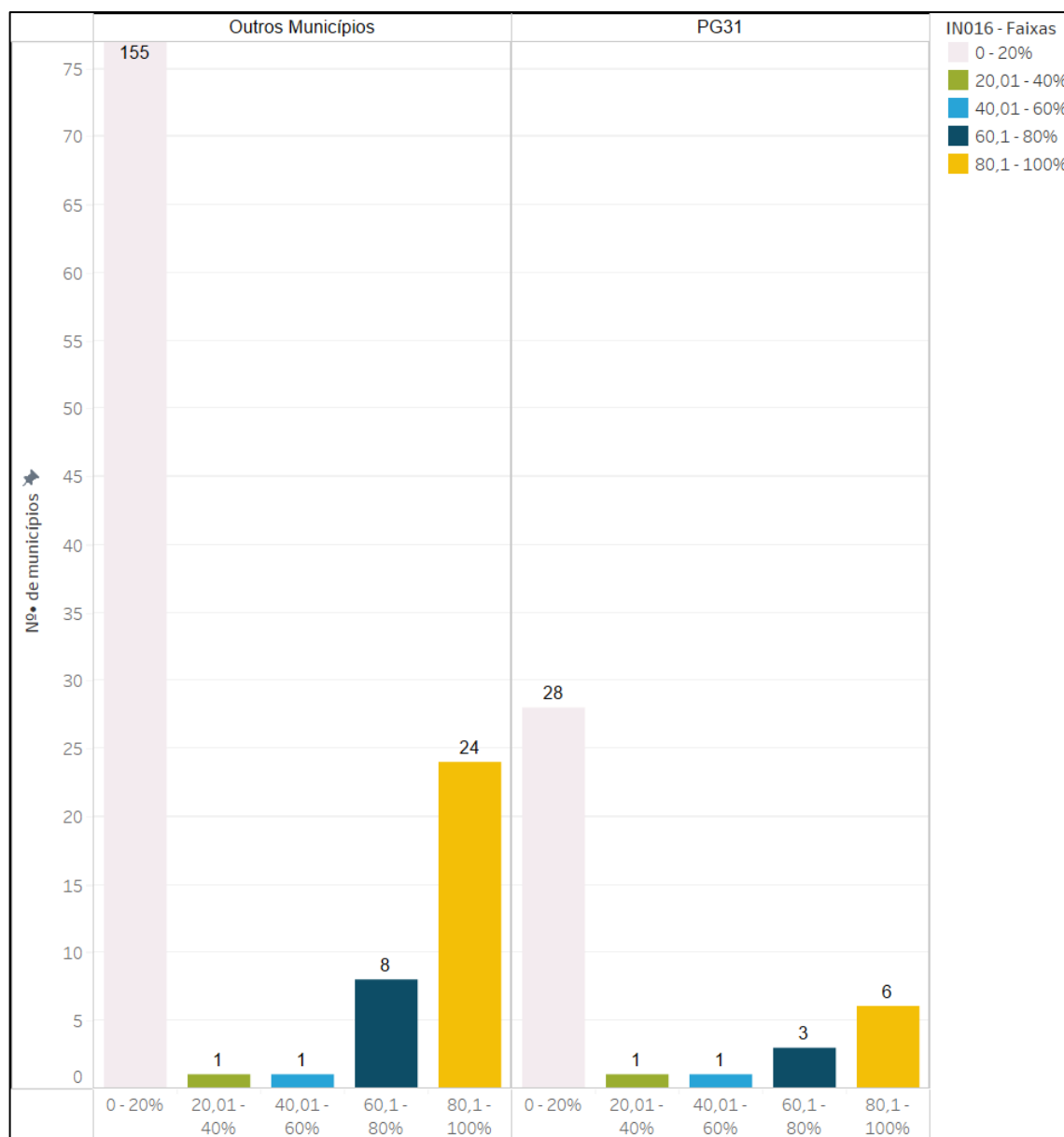
Cabe ressaltar que no período inicial de desenvolvimento dos trabalhos apresentados neste relatório, os dados presentes na plataforma do SNIS referiam-se ao ano de 2021. Portanto os percentuais de coleta e tratamento apresentados em todos produtos do presente item (3.2.6) utilizam esses valores como referências e foram cruzados com outros dados do mesmo ano. Por exemplo, para as estimativas de cargas, vazões de esgoto e concentrações de esgoto foram utilizados dados populacionais de 2021 e então aplicados valores percentuais de coleta e tratamento referentes ao ano de 2021. Estas estimativas foram consideradas nos produtos subsequentes, incluindo a simulação de qualidade de água e a otimização. Quando o SNIS apresentou dados atualizados para os anos seguintes, os produtos se encontravam em maioria parcialmente desenvolvidos e alguns finalizados, não havendo tempo hábil para refazer todo o trabalho.

Figura 45: Espacialização do IN015 e municípios integrantes do PG31.



A Figura 45 apresenta a espacialização do IN015 e destaca o conjunto de municípios participantes do PG 31.

Figura 46: Distribuição dos municípios quanto ao IN016 - Taxa de cobertura do serviço de tratamento de esgotos em relação à população total do município do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento.

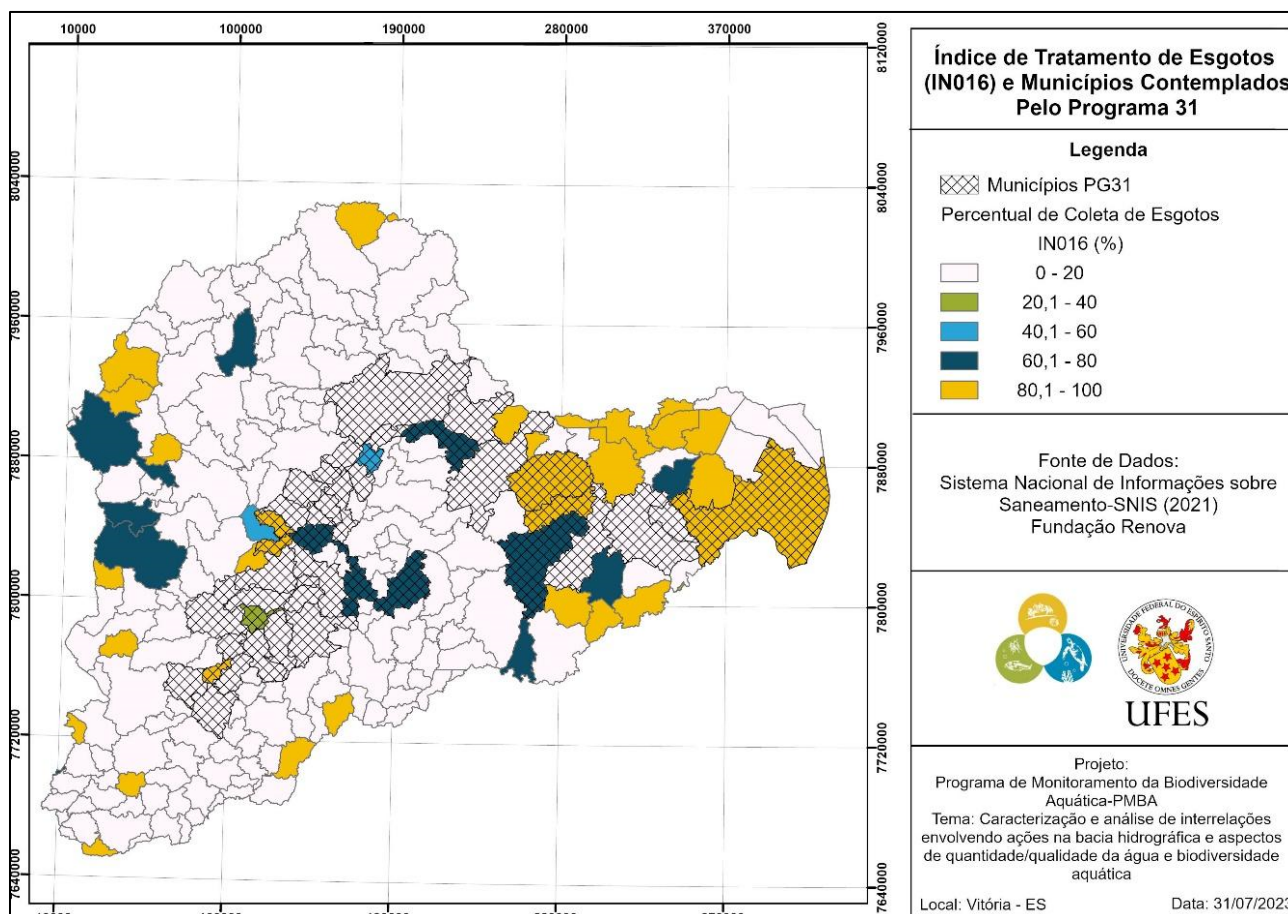


A Figura 46 agrupa os municípios em 5 diferentes faixas de atendimento ao IN016, separando estes quanto a participação ou não no Programa 31 (PG31) da Fundação Renova. Dos 39 municípios que compõem o PG031, seis apresentam atendimento de tratamento de esgotos (IN016) dentro da faixa de 80,1 a 100%, correspondendo a um percentual de aproximadamente 15,38%. Os municípios não participantes do PG 31 se encontram apresentados no lado esquerdo do gráfico sob o título “Outros Municípios”, havendo 24 municípios presentes na faixa de 80,1 a 100%, o que corresponde aproximadamente a 10,52% do total de municípios pertencentes ao grupo “Outros Municípios”. O grupo



“Outros Municípios” possui 67,98%, o que corresponde a 155 municípios com valores de atendimento do IN016 dentro da faixa inferior (0-20%), enquanto o grupo do PG 31 apresenta 71,79% (28 municípios) de seu conjunto de municípios dentro dessa mesma faixa.

Figura 47: Espacialização do IN016 e municípios integrantes do PG31.



A Figura 47 apresenta a espacialização do IN016 e destaca o grupo do PG31, que se encontra hachurado.

Tabela 30: Dados gerais dos municípios da bacia do Rio Doce.

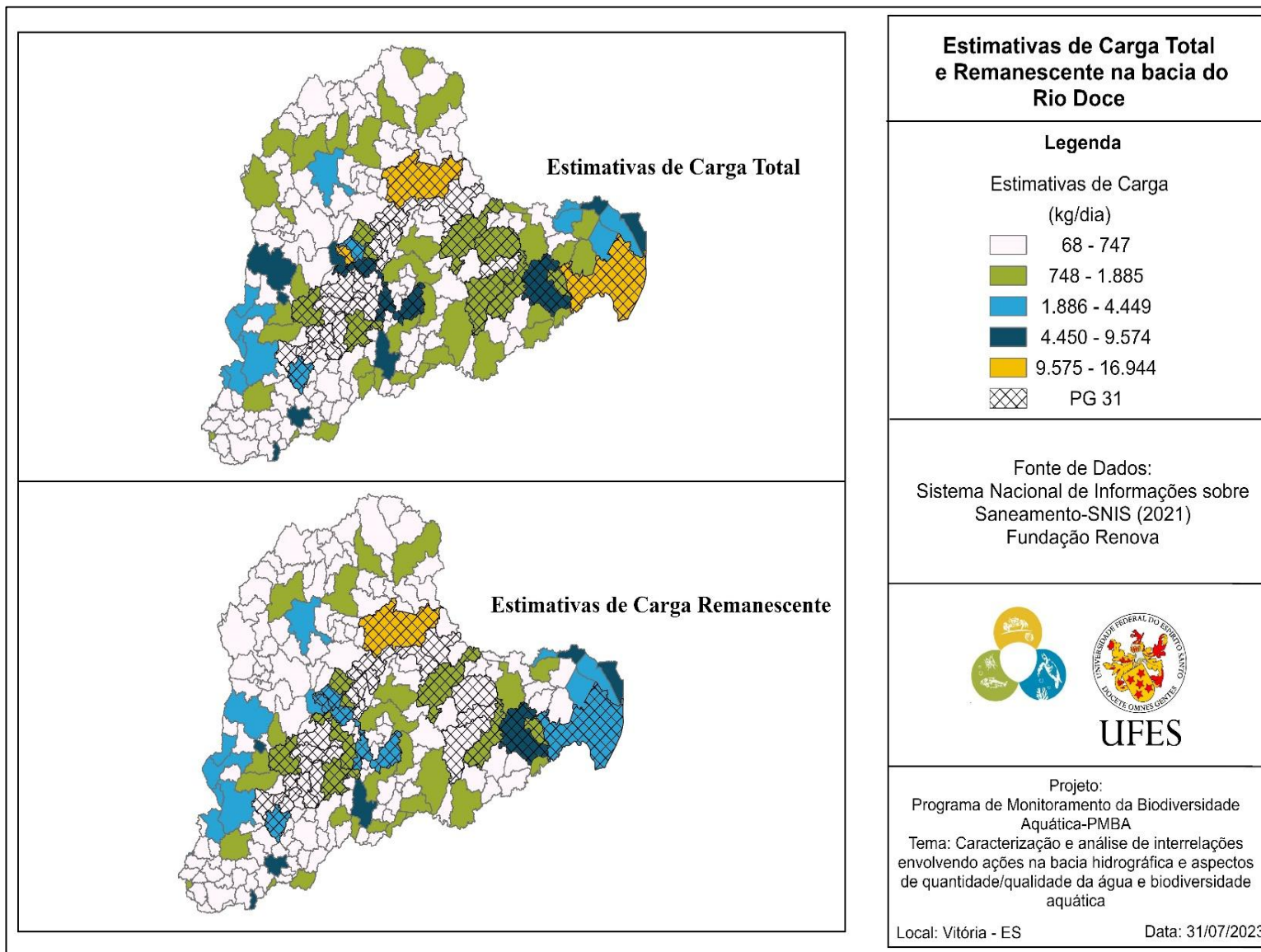
Grupo	Carga Total (Kg/dia)	Carga Remanescente (Kg/dia)	Nº Municípios	Média IN015	Média IN016
Outros Municípios	173.745	146.240	189	59	16
PG31	91.586	56.505	39	77	23

Fonte: SNIS, 2021.

A Tabela 30 apresenta as estimativas totais de carga total (Kg/dia), carga remanescente (Kg/dia), número de municípios e média dos IN015 e IN016 para o conjunto de municípios do PG31 e para o conjunto formado pelos demais municípios (Outros Municípios). O conjunto de municípios do PG31 apresenta valores médios de coleta e tratamento de esgotos ligeiramente superiores aos do grupo “Outros Municípios”, entretanto estes valores ainda são relativamente baixos, principalmente quanto à

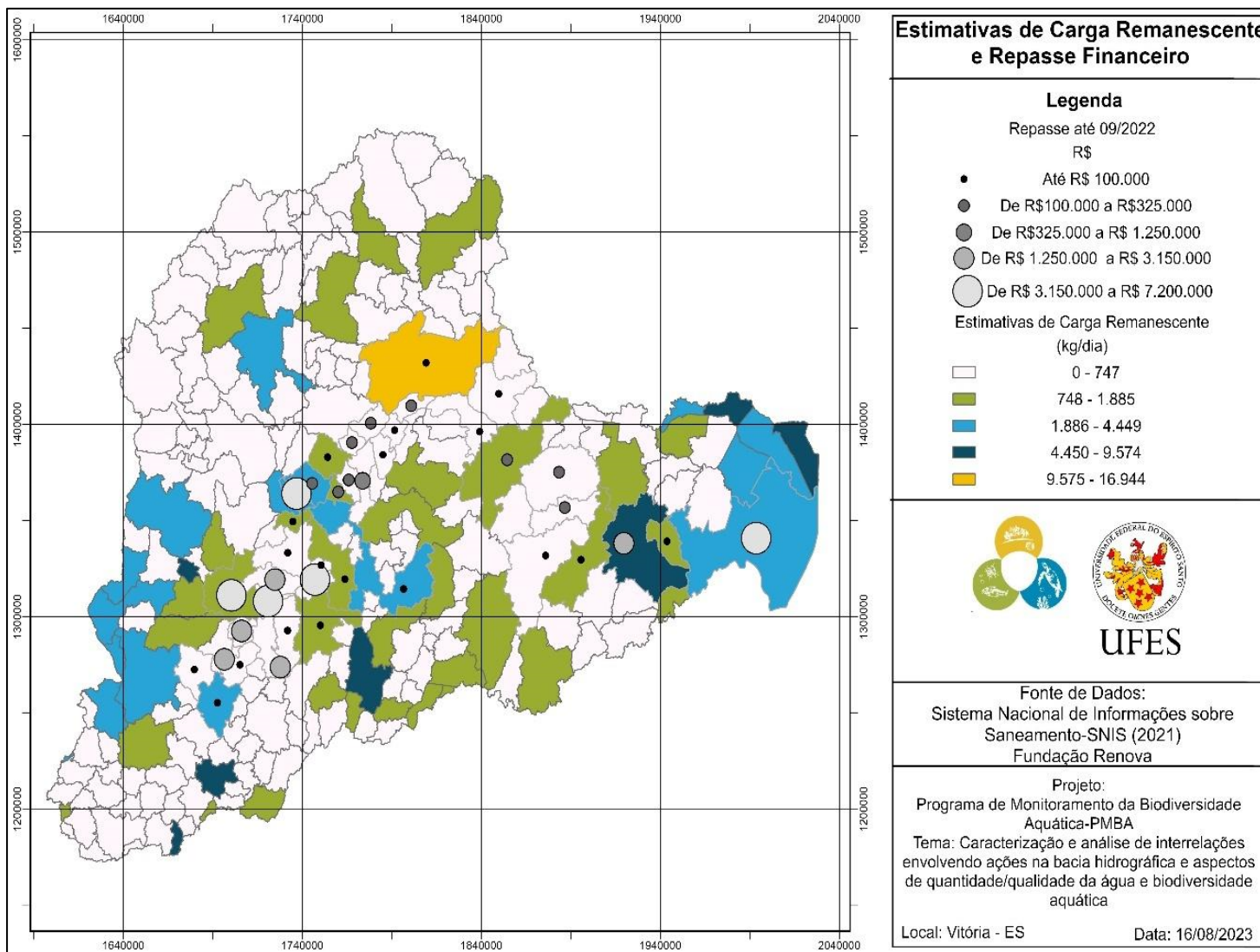
taxa de tratamento (IN016). Embora o conjunto de municípios participantes do PG31 seja consideravelmente menor, a carga gerada por esses municípios corresponde a mais da metade do montante gerado pelo outro grupo. Isso se deve, principalmente, à presença de municípios relativamente populosos com baixos percentuais de tratamento de esgotos, sendo esse o caso do município de Governador Valadares.

Figura 48: Estimativas de Carga Total e Remanescente (kg/dia) para os municípios da bacia do Rio Doce.



A partir da metodologia apresentada nos itens 2.1.2 e 2.2.2 foram estimadas as cargas de DBO geradas por cada município da bacia do Rio Doce, e em seguida aplicados os índices de coleta - IN015 e tratamento - IN016, identificando -se assim a carga removida e a partir desta e da carga total calculou-se a carga remanescente, ou seja, não tratada, que cada município potencialmente produz. Os resultados da espacialização destas cargas são apresentados na Figura 48. A partir desta figura é possível observar que alguns municípios mudam de faixa quanto à Carga Remanescente destacando, por exemplo, os municípios de Linhares (ES) e Ipatinga (MG).

Figura 49: Valores (R\$) repassados pelo PG31 e Estimativas de Carga Remanescente (kg/dia).



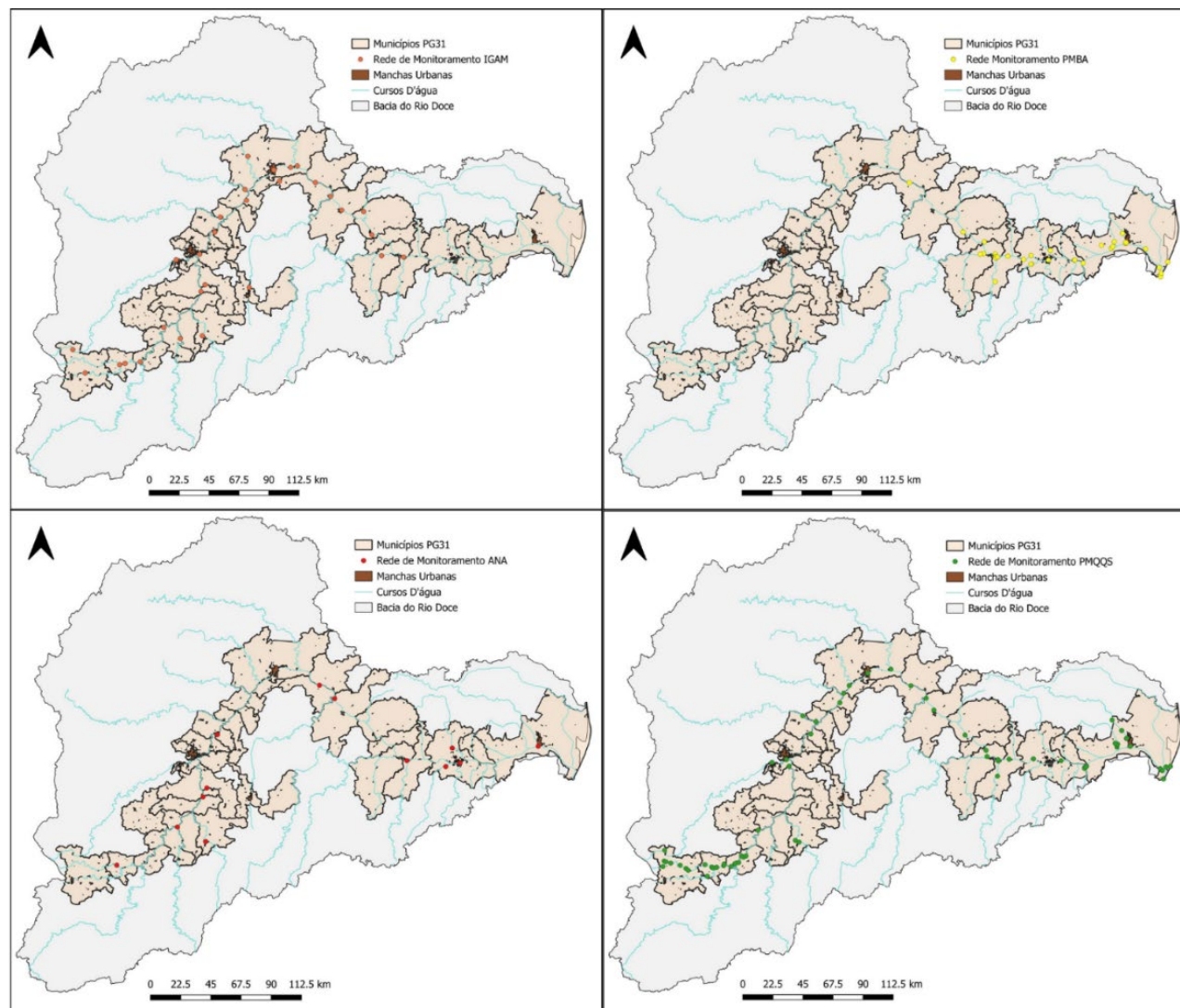


A Figura 49 mostra os valores repassados pelo PG31 aos municípios que o compõem e as faixas de cargas remanescentes estimadas para cada município da bacia do Rio Doce. Destaca-se neste cenário o município de Governador Valadares, que possui o maior valor de Carga Total 16.900 kg/dia, com IN015 de 85% e sem tratamento de esgotos, não tendo recebido repasse financeiro.



## Estações de monitoramento, qualidade de água simulada e proposição de eficiências mínimas de tratamento de esgoto doméstico

Figura 50: Redes de monitoramento distribuídas ao longo dos municípios contemplados pelo Programa 31 - Coleta e Tratamento de Esgoto e Destinação de Resíduos Sólidos.



A Figura 50 apresenta a espacialização das redes de monitoramento da ANA, IGAM, PMQQS e PMBA, distribuídas ao longo dos municípios contemplados pelo Programa 31 da Fundação Renova, além de destacar as manchas urbanas. Observa-se municípios que não possuem nenhuma estação de monitoramento em todo seu território, como é o caso de Iapu, Sobrália, Córrego Novo e Rio Casca. Além disso, destaca-se a ausência de pontos de monitoramento a montante e jusante das manchas urbanas e dos afluentes próximos a essas localidades. Tal ausência impossibilita o acompanhamento detalhado da influência das ações de esgotamento sanitário nos municípios, uma vez que o programa 31 da Fundação Renova visa o repasse financeiro para a construção de sistemas de esgotamento sanitário para os municípios atingidos. Essa análise ressalta a importância da revisão das redes de monitoramento para melhorar o acompanhamento das ações.

Tabela 31: Eficiências mínimas de tratamento de esgotos para atendimento dos padrões de qualidade referentes a classe 2 e proposições de ações.

Município	ETE	Classe 2	Proposição de Ações
Alpercata	Lançamento Alpercata	61	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Belo Oriente	Lançamento Belo Oriente	68	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Bom Jesus do Galho	Lançamento Bom Jesus do Galho	62	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Bugre	Lançamento Bugre	61	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Córrego Novo	Lançamento Córrego Novo	61	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Fernandes Tourinho	Lançamento Fernandes Tourinho	63	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Governador Valadares	ETE Santos Dumont	85	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Iapu	Lançamento Iapu	62	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Ipaba	Lançamento Ipaba	69	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Ipatinga	ETE Ipanema	76	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Mariléia	Lançamento Mariléia	61	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Naque	Lançamento Naque	61	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
	ETE São Sebastião do Baixo	61	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Periquito	ETE Serraria	61	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
	ETE Serraria 2	62	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Pingo D'água	Lançamento Pingo D'água	61	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Santana do Paraíso	ETE Sede	99	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.

Município	ETE	Classe 2	Proposição de Ações
São Domingos do Prata	Lançamento São Domingos do Prata	61	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Sobrália	Lançamento Sobrália	61	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Timóteo	ETE Timoteo	NE	Redução das cargas aportadas pelos demais municípios, além daqueles que compõem o PG 31.
Alpercata	Lançamento Alpercata	61	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Belo Oriente	Lançamento Belo Oriente	68	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Bom Jesus do Galho	Lançamento Bom Jesus do Galho	62	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Bugre	Lançamento Bugre	61	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Córrego Novo	Lançamento Córrego Novo	61	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Fernandes Tourinho	Lançamento Fernandes Tourinho	63	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Governador Valadares	ETE Santos Dumont	85	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Iapu	Lançamento Iapu	62	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Ipaba	Lançamento Ipaba	69	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Ipatinga	ETE Ipanema	76	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Mariléia	Lançamento Mariléia	61	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Naque	Lançamento Naque	61	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
	ETE São Sebastião do Baixo	61	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Periquito	ETE Serraria	61	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
	ETE Serraria 2	62	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Pingo D'água	Lançamento Pingo D'água	61	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Santana do Paraíso	ETE Sede	98,6	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
São Domingos do Prata	Lançamento São Domingos do Prata	61	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.
Sobrália	Lançamento Sobrália	61	Construção de ETE que atenda o requisito mínimo de tratamento.

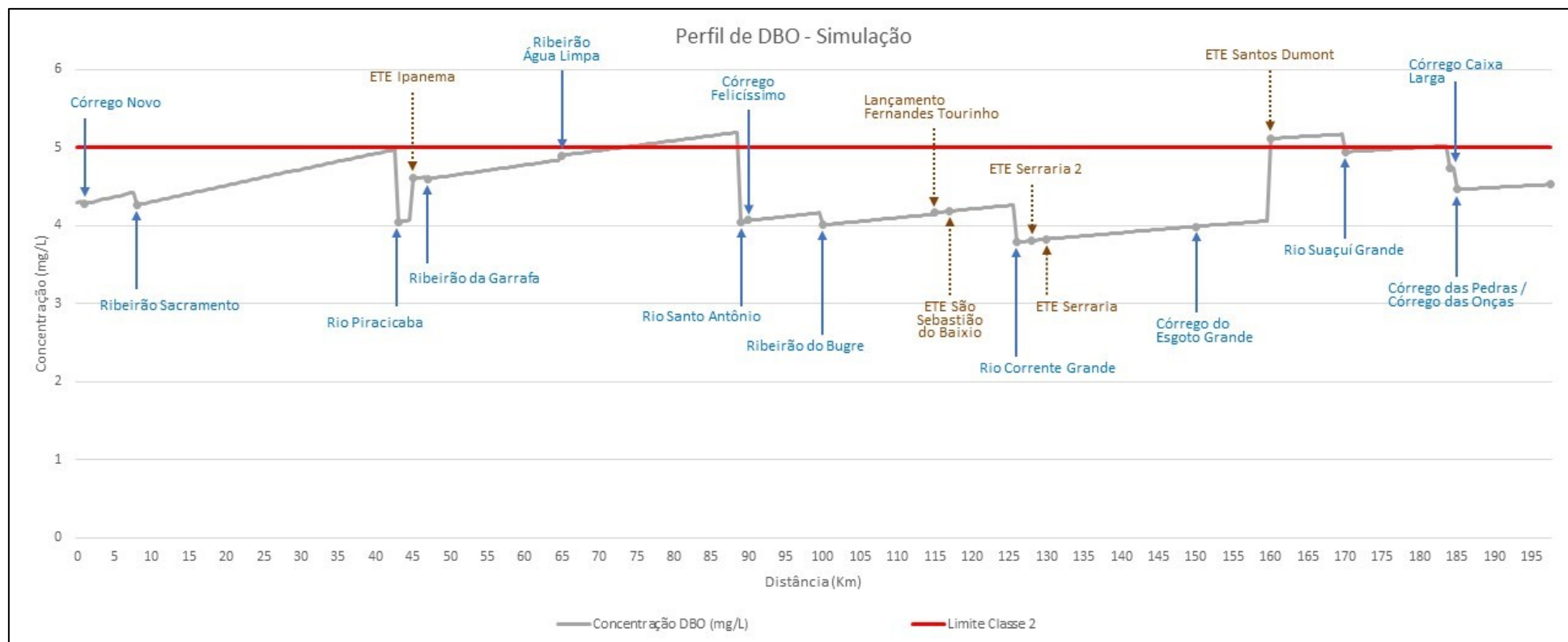
Devido à influência dos reservatórios da UHE de Aimorés e da UHE Mascarenhas nas vazões, não foram identificadas as eficiências de remoção para os seguintes municípios: Aimorés, Baixo Guandu, Colatina, Linhares e Marilândia.

A Tabela 31 sistematiza os resultados da otimização dos aportes de esgoto sanitário de municípios que compõem o PG31. Na primeira coluna, são especificados os municípios, enquanto na segunda coluna é identificada a contribuição de esgoto doméstico. Na terceira são apresentadas as eficiências mínimas de tratamento necessárias para atender às concentrações dos parâmetros DBO e OD, de acordo com o padrão estabelecido para a classe 2. A última coluna apresenta propostas de ações baseadas nos resultados da otimização.

A ETE Timóteo lança seu efluente no Rio Piracicaba. Segundo os resultados da simulação, a entrada de esgotos pontuais, de municípios não participantes do PG 31, que não possuem tratamento adequado, colaboram significativamente para o aumento da concentração da DBO neste trecho do corpo receptor, levando este trecho a apresentar condições de qualidade de água acima dos limites estabelecidos para Classe 2. Portanto, não foi possível otimizar esse lançamento, não sendo identificado valor de tratamento condizente com a classe 2 para esta localidade.

Embora o PG 31 tenha condições de colaborar significativamente para a melhoria da qualidade da água do Rio Doce, é importante ressaltar que este é composto por 39 municípios, e existem 228 municípios em toda a bacia. Em várias localidades do PG 31 observou-se a interferência de cargas não tratadas, advindas de aportes de esgotos de municípios não participantes do PG31. Portanto, deve-se levar em consideração essa informação na interpretação dos resultados. De modo geral, verifica-se a possibilidade de redução das cargas de DBO no conjunto de municípios estudados, uma vez que se construa estações de tratamento de esgoto que atendam os municípios que ainda não possuem estação de tratamento, e se otimize as atuais estações para atenderem minimamente as eficiências sugeridas.

Figura 51: Perfil simulado de concentração (mg/L) de DBO no Rio Doce.

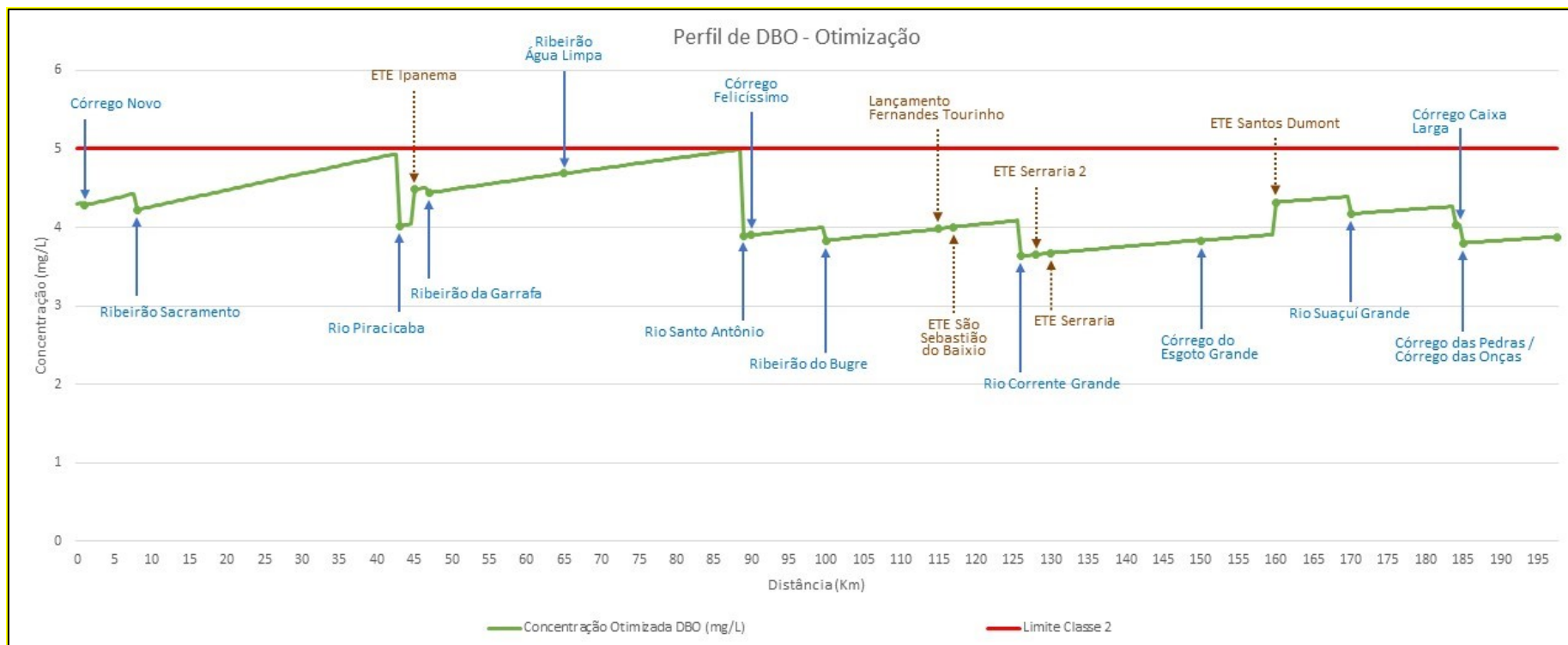


A Figura 51: Perfil simulado de concentração (mg/L) de DBO no Rio Doce. apresenta o perfil de concentração de DBO simulado para o trecho com maior número de violações. Os aportes dos tributários e dos esgotos domésticos estão identificados por setas e diferenciados por seus respectivos nomes e cores, estando em azul os tributários e em cinza as contribuições de esgotos domésticos. No eixo x tem-se as posições (em km) onde ocorrem as violações. No eixo Y aparecem as concentrações de DBO, em mg/L, e o limite da classe 2 é apresentado em vermelho.

No gráfico da Figura 51: Perfil simulado de concentração (mg/L) de DBO no Rio Doce. é possível visualizar que a entrada dos tributários no Rio Doce resulta em quedas nas concentrações de DBO, devido principalmente ao aumento de capacidade diluição pelo incremento de vazão que estes aportam. Com exceção do curso d'água Água Limpa, cujo aporte resulta em ligeiro aumento na concentração da DBO, a concentração simulada para este parâmetro no ponto anterior ao lançamento é de 4,83mg/L e após sua entrada de 4,90mg/L. Comportamento similar pode ser verificado na entrada do Córrego Felicíssimo, cuja concentração é 4,05 mg/L no ponto anterior a sua entrada no Rio Doce e 4,07mg/L após.



Figura 52: Perfil otimizado de concentração (mg/L) de DBO no Rio Doce.

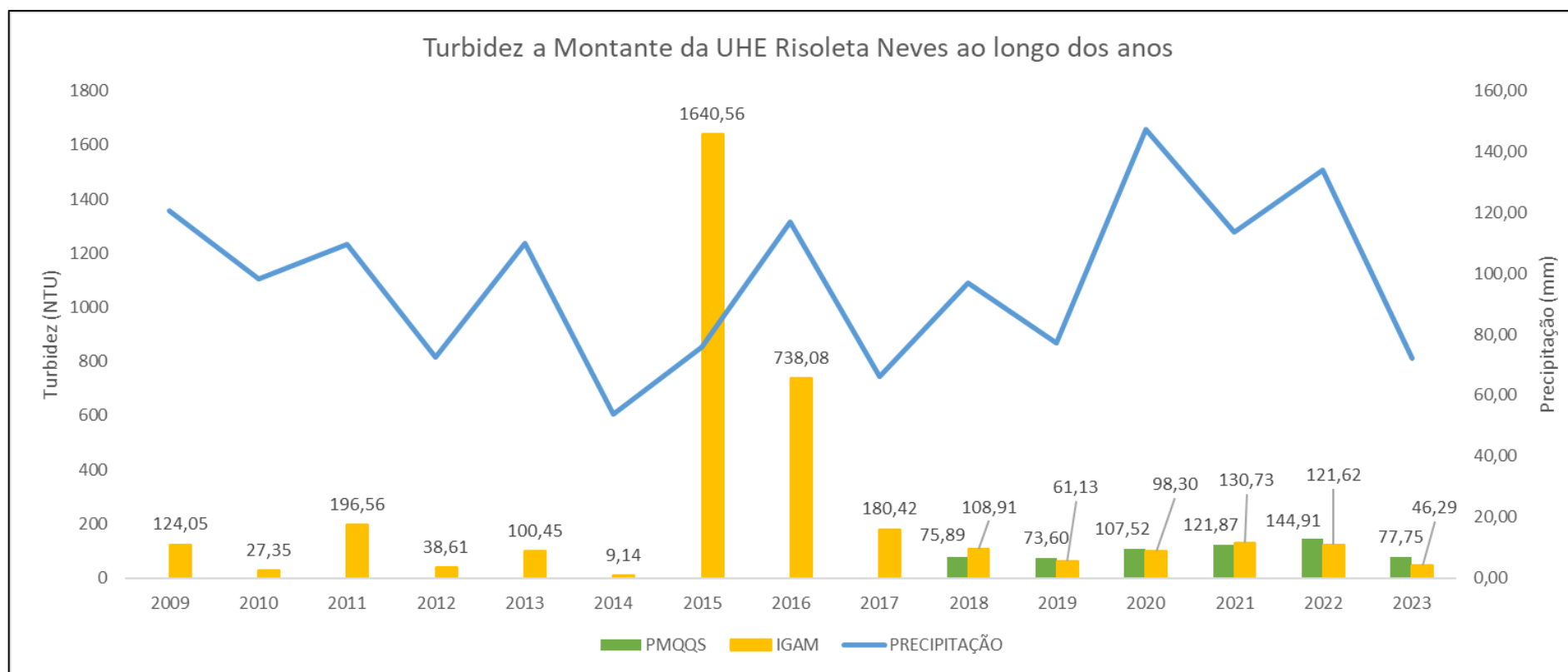


Na Figura 52 é possível visualizar o perfil de concentração de DBO otimizado para o Rio Doce para o trecho com maior número de violações referente à classe 2. A escala de cores se mantém a mesma, com exceção do perfil de concentração do parâmetro DBO que se encontra apresentado em verde, conforme especificado na legenda. O perfil apresentado é resultante da aplicação das eficiências de remoção identificadas na Tabela 31 às contribuições de esgoto doméstico.

Cabe observar que os resultados das simulações e das otimizações não são exatos. Estes resultados podem ser significativamente aperfeiçoados caso calibrações possam ser feitas a partir de resultados de monitoramento específicos.

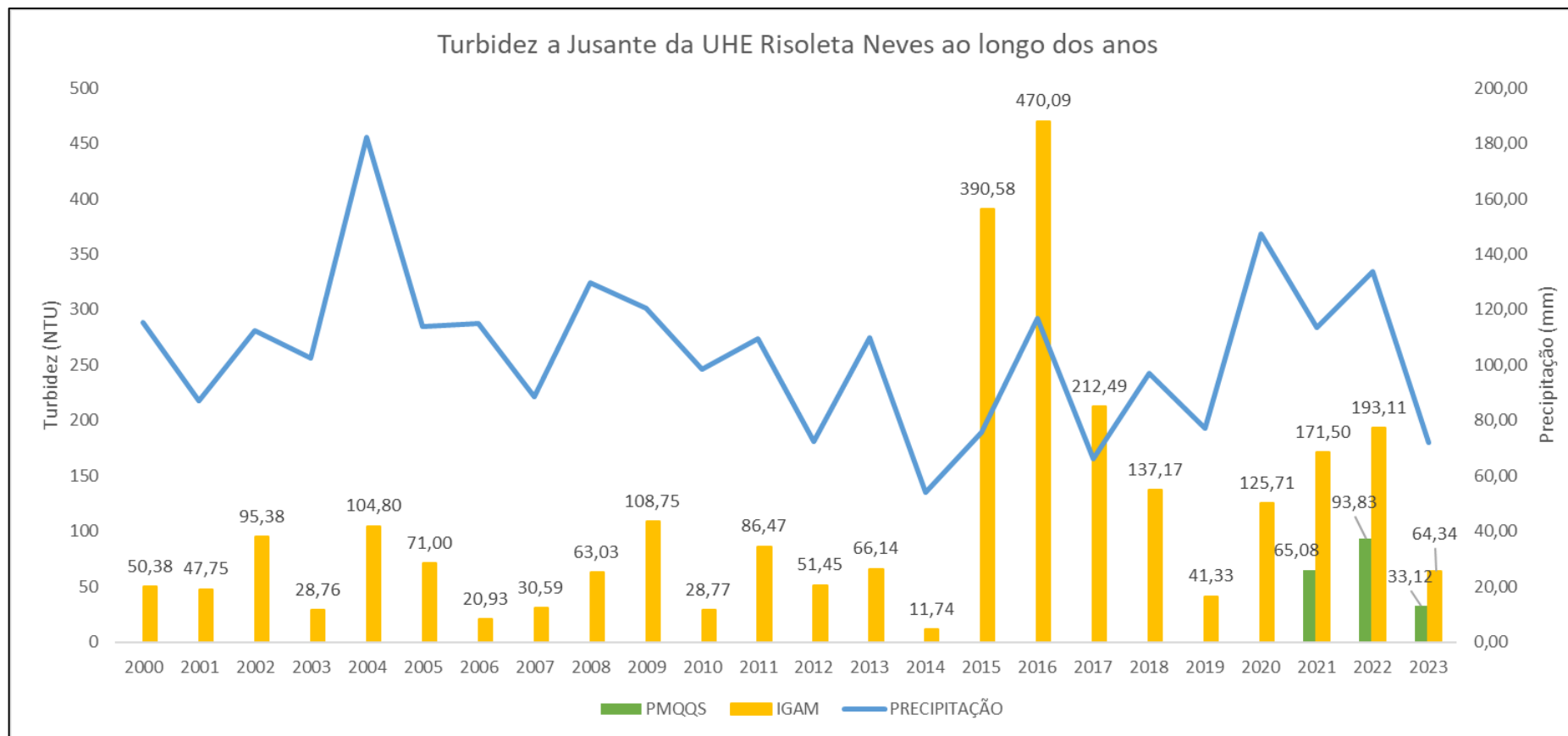
### 3.2.7 Levantamento e análise de informações relativas a monitoramentos de qualidade de água

Figura 53: Valores de Turbidez a montante do reservatório da UHE Risoleta Neves.



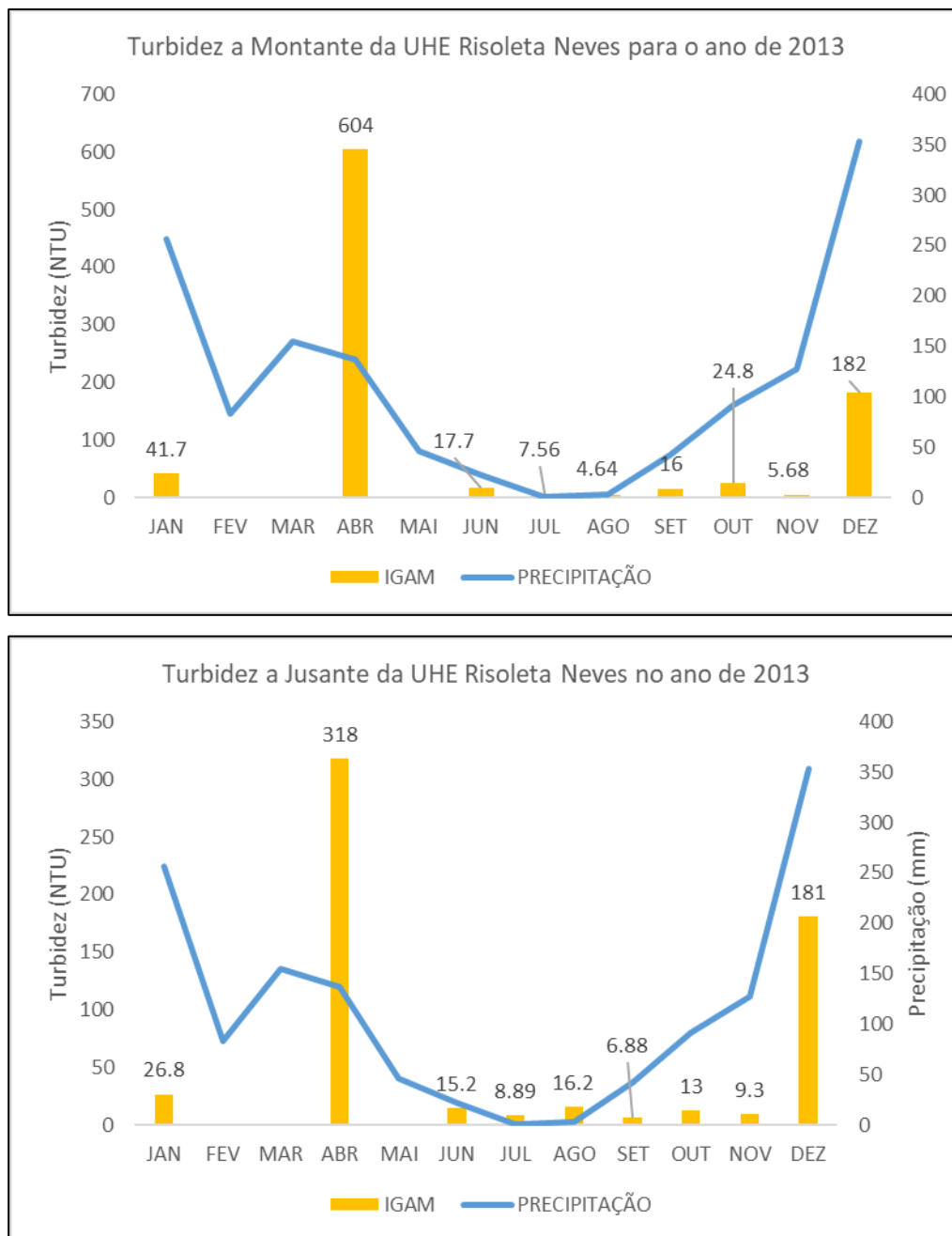
Na Figura 53 são apresentados os valores de turbidez a montante do reservatório da UHE Risoleta Neves ao longo dos anos de 2009 a 2023. Os dados contemplam estações operadas pelo IGAM e registradas no PMQQS (após o rompimento da barragem). Observa-se elevados valores médios de turbidez para os anos de 2015 e 2016 (1.640,56 NTU e 738,08 NTU, respectivamente), imediatamente após o rompimento da barragem de rejeitos de Mariana.

Figura 54: Valores de Turbidez a jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves.



Na Figura 54 são apresentados valores de turbidez a jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves ao longo dos anos de 2000 a 2023. Cabe ressaltar que para a estação de jusante só foram identificados no portal de monitoramento do PMQQS dados referentes aos anos de 2021, 2022 e 2023. Os dados contemplam estações operadas pelo IGAM e registradas no PMQQS (após o rompimento da barragem). Observa-se elevados valores de médios de turbidez para os anos de 2015 e 2016 (390,58 NTU e 470,09 NTU, respectivamente), imediatamente após o rompimento da barragem de rejeitos de Mariana. Os valores de turbidez a jusante do reservatório, quando comparados com valores a montante, para os anos de 2015 e 2016, indicam redução relativa a este parâmetro, indicando retenção de material proveniente do rompimento da barragem de rejeitos no reservatório. Observa-se ainda, diferenças significativas nos valores de turbidez registrados nas estações do IGAM e do PMQQS nos anos de 2021 e 2022. Essa discrepância pode ter ocorrido devido às diferentes localidades onde as estações estão inseridas e às diferentes datas e horários.

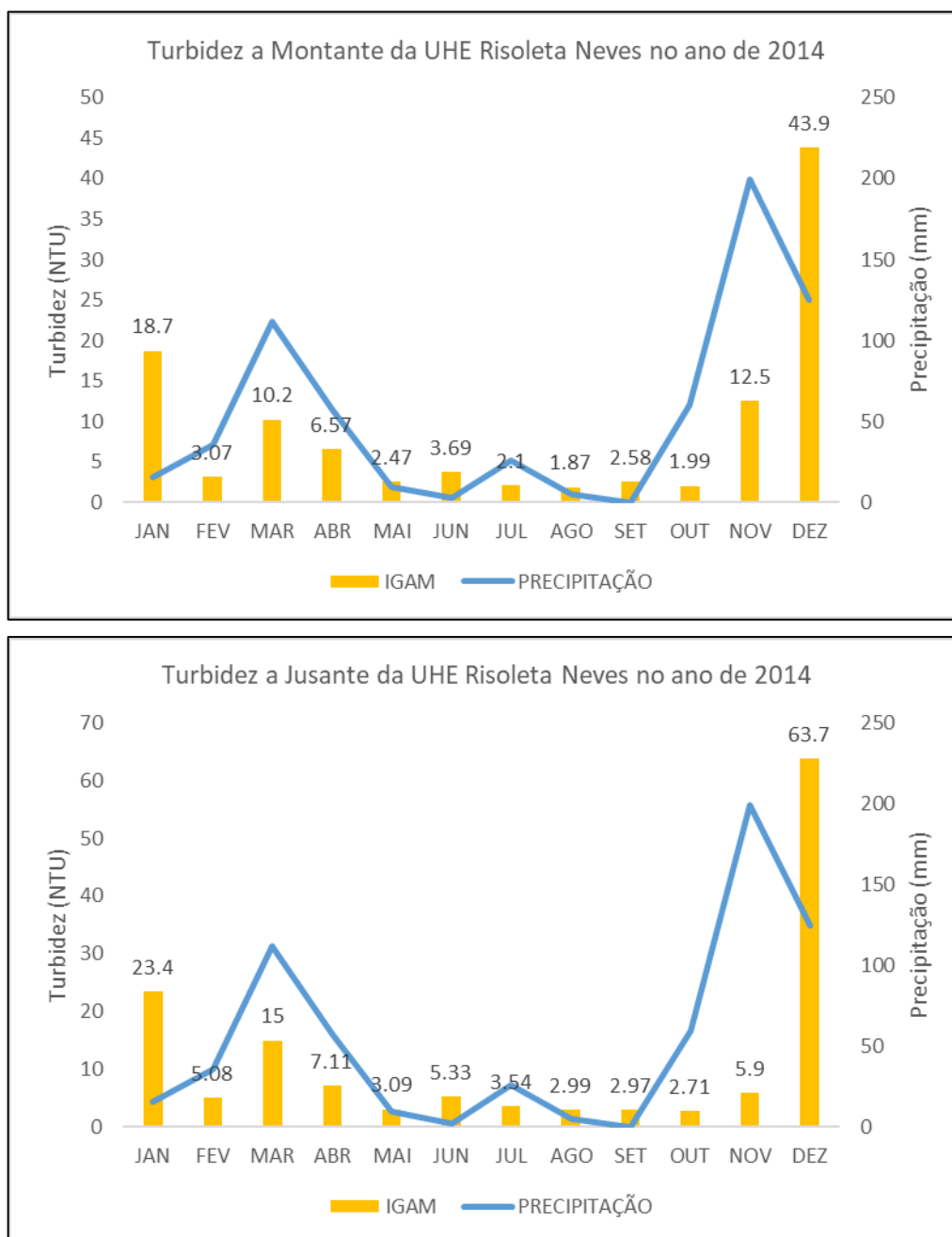
Figura 55: Valores de Turbidez a montante e jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves (2013).



Na Figura 55 são apresentados os valores médios mensais de turbidez a montante e a jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves durante o ano de 2013, período anterior ao rompimento da barragem de rejeitos. Vale ressaltar que estes dados foram registrados em estações operadas pelo IGAM. Observa-se valores mais elevados de turbidez para os meses de abril (318 NTU) e de dezembro (181 NTU) a montante e a jusante do reservatório da UHE, respectivamente.

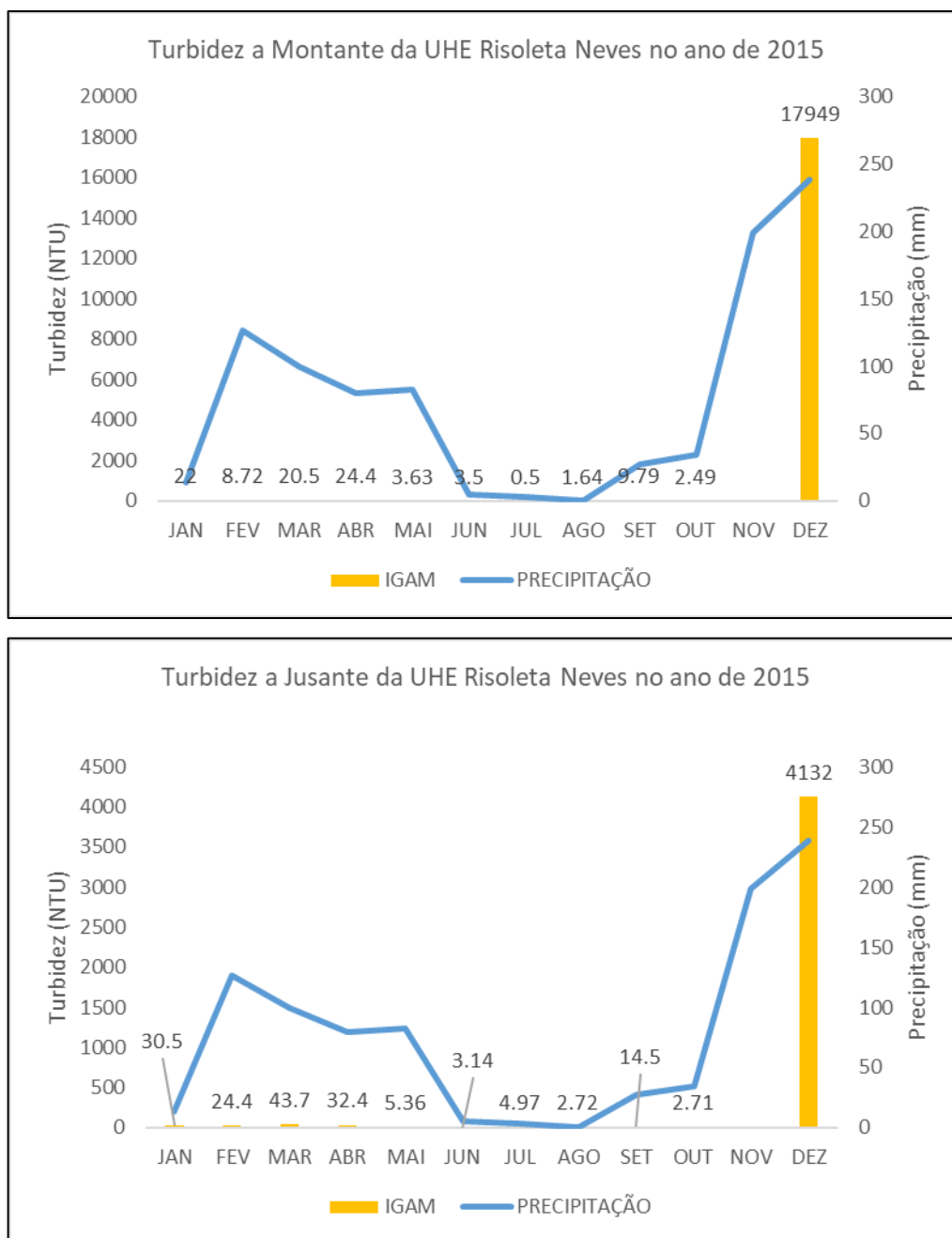


Figura 56: Valores de Turbidez a montante e jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves (2014).



Na Figura 56 são apresentados os valores médios mensais de turbidez a montante e a jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves durante o ano de 2014, período também anterior ao rompimento da barragem. Os dados apresentados foram registrados em estações do IGAM. Observa-se maiores valores de turbidez para o mês de dezembro, 43,9 NTU a montante e 63,7 NTU a jusante.

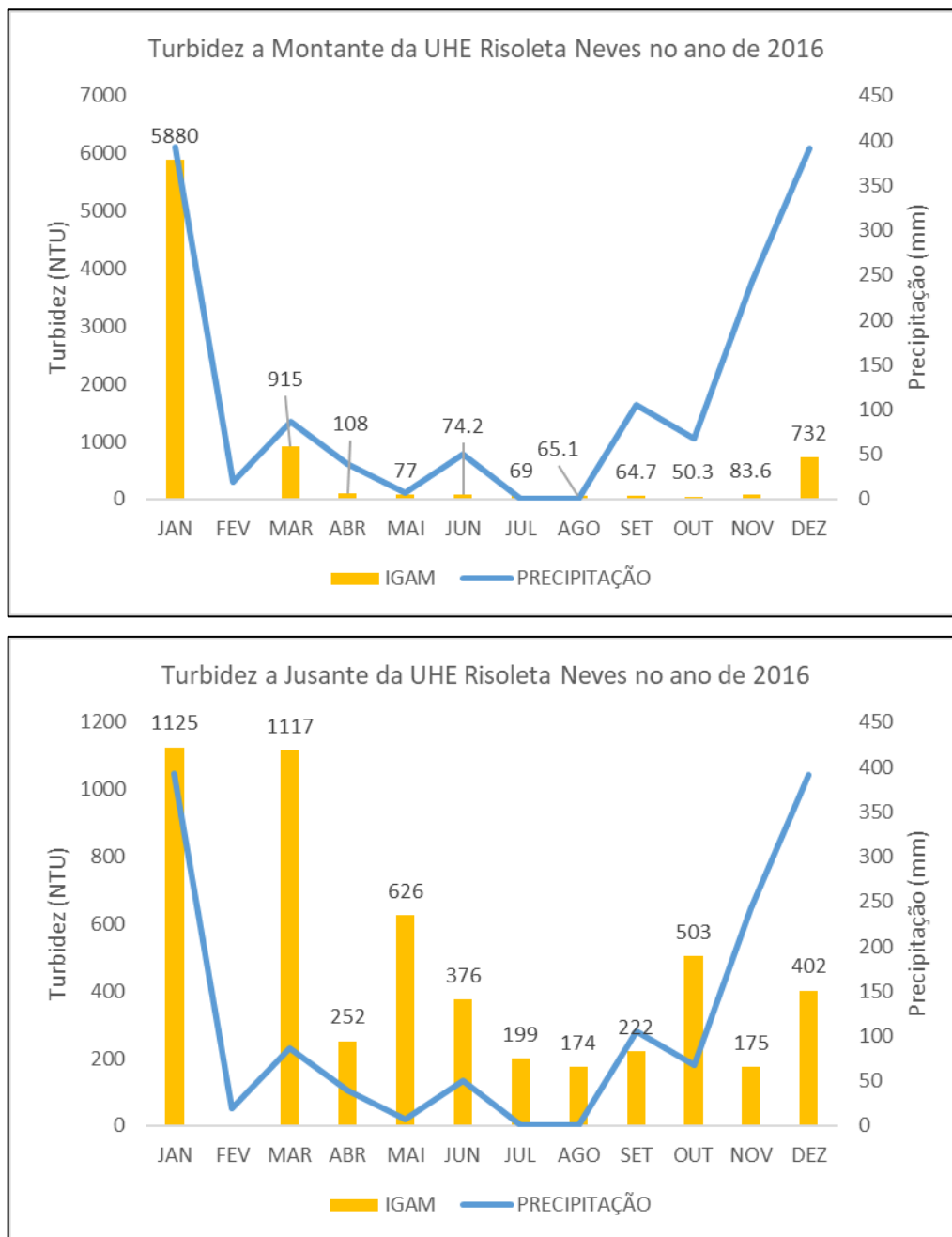
Figura 57: Valores de Turbidez a montante e jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves (2015).



Na Figura 57 são apresentados valores médios mensais de turbidez a montante e a jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves ao longo do ano de 2015. Os dados contemplam estações operadas pelo IGAM. Observa-se elevadas médias de turbidez para o mês de dezembro tanto a montante como a jusante da UHE, sendo 17.949 NTU na estação a montante do reservatório e 4.132 NTU a jusante. Em toda a série histórica avaliada, entre 2009 e 2022, estes foram os maiores valores médios de turbidez identificados. Este fato é consequência da passagem dos rejeitos provenientes do rompimento da barragem de Mariana, ocorrido em 05 de novembro de 2015, pelas estações de

monitoramento. Devido à retenção de rejeitos no reservatório da UHE os valores médios de turbidez a jusante são muito inferiores àqueles a montante.

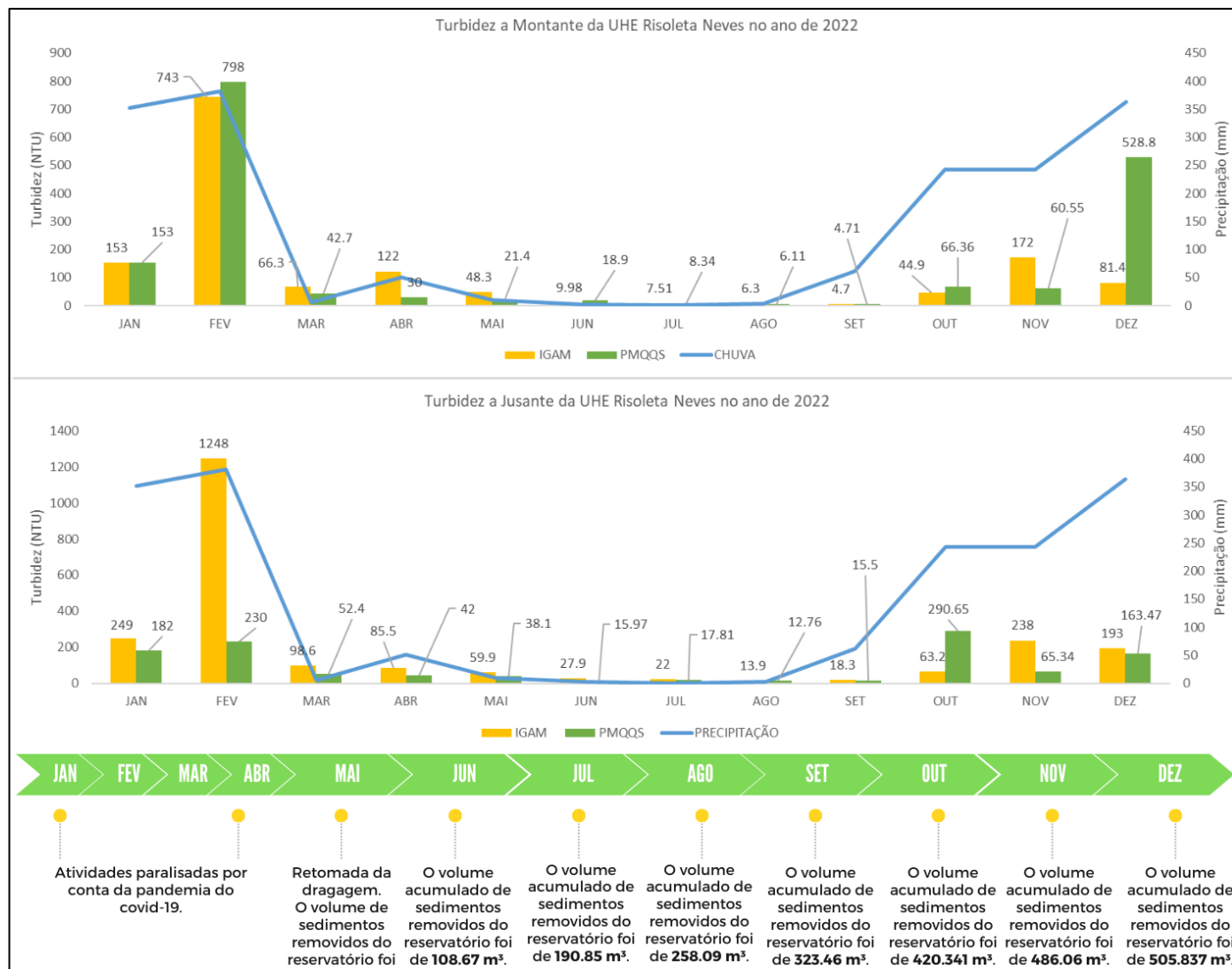
Figura 58: Valores de Turbidez a montante e a jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves (2016).



Na Figura 58 são apresentados os valores médios mensais de turbidez a montante e a jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves durante o ano de 2016, período posterior ao rompimento da barragem. Os dados foram registrados em estações operadas pelo IGAM. Podem ser observadas reduções de valores de turbidez em janeiro de 2016 em relação aos registrados em dezembro de 2015, tanto a montante como a jusante do reservatório. Destaca-se que de acordo com o banco de ações executadas na bacia, limpeza do reservatório foi iniciada em fevereiro de 2016, visando reinício da

operação da Usina Hidrelétrica. Outras ações identificadas no banco de dados também foram executadas em 2016, como a construção da barragem Nova Santarém, construção de diques e alinhamento dos tributários com reconformação de calhas e planícies dos rios principais. Tais ações podem ter contribuído para alterações relacionadas com o parâmetro Turbidez. Não foram identificados no banco de dados do IGAM dados de Turbidez referentes ao mês de fevereiro de 2016.

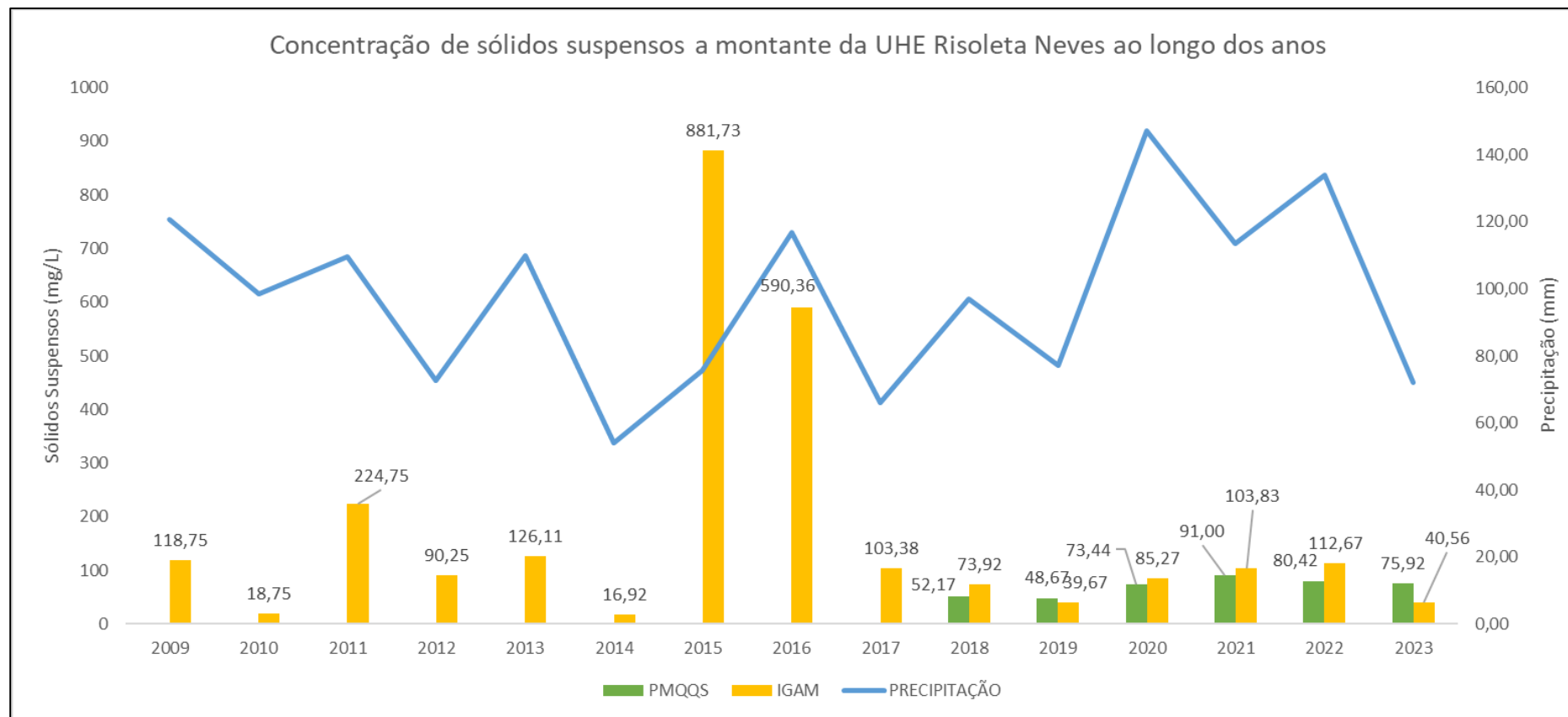
Figura 59: Valores de Turbidez a montante e jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves (2022).



Na Figura 59 são apresentados valores médios mensais de turbidez a montante e a jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves durante o ano de 2022. Os dados contemplam estações relativas ao IGAM e ao PMQQS. Os gráficos de turbidez foram combinados com o acompanhamento de ações no reservatório ao longo do ano. Essas ações são relacionadas com dragagem, para remoção de rejeitos retido no reservatório da UHE. É possível observar que as obras foram conduzidas, em sua maior parte, no período seco. Observa-se que para todo o período de obras os valores de turbidez a montante do reservatório foram inferiores aos registrados a jusante, excetuando-se os casos dos registros do PMQQS referentes ao mês de junho. Esse comportamento pode estar relacionado com a ressuspensão de material de fundo durante a dragagem. Além disso, podem ser observados maiores valores médios de turbidez no período chuvoso. As discrepâncias entre os valores medidos nas estações do IGAM e do PMQQS podem ocorrer devido às diferentes localidades das estações e aos diferentes momentos de monitoramento. Salienta-se que não foi identificado para o ano de 2023 avanço na meta de dragagem da UHE Risoleta Neves, portanto a análise mensal se limitou ao ano de 2022.

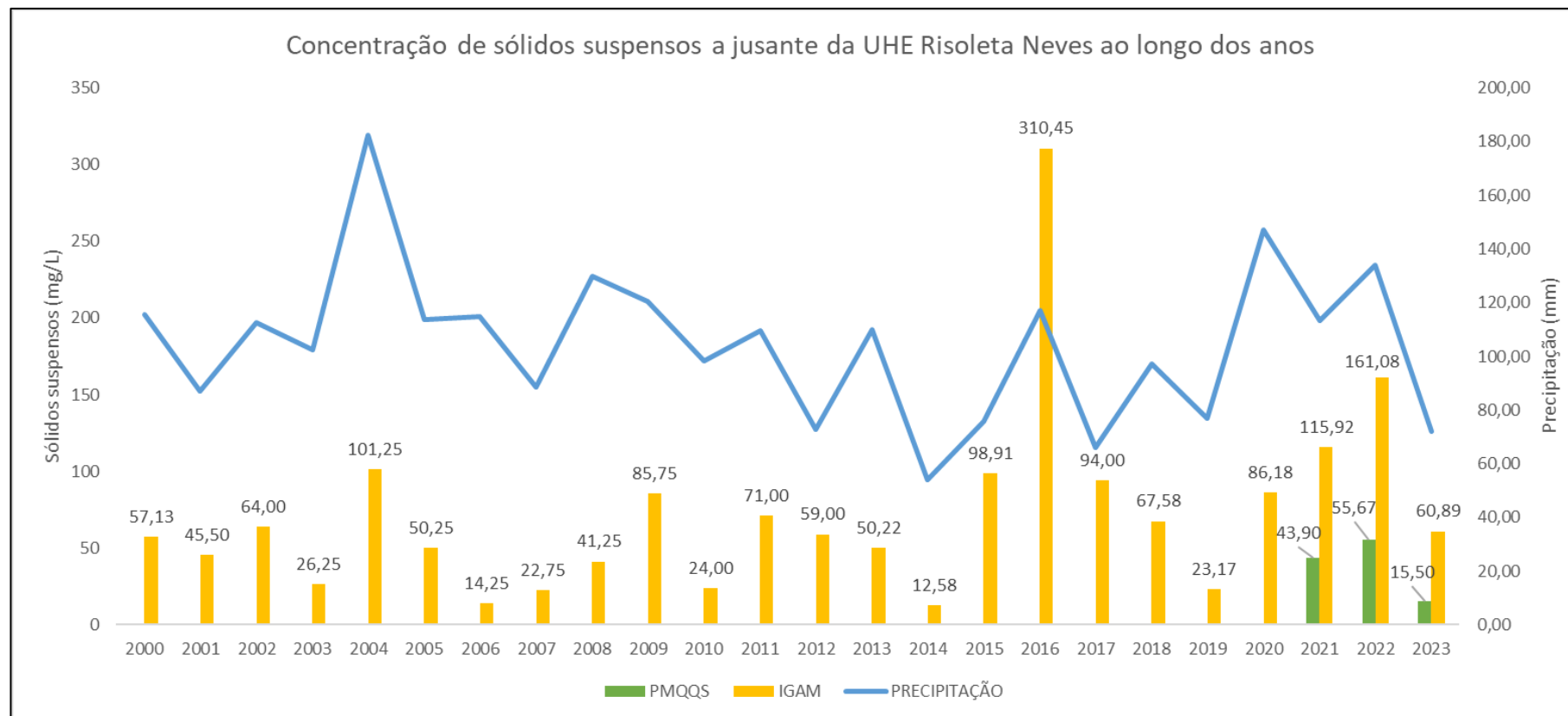


Figura 60: Concentração de sólidos suspensos a montante do reservatório da UHE Risoleta Neves.



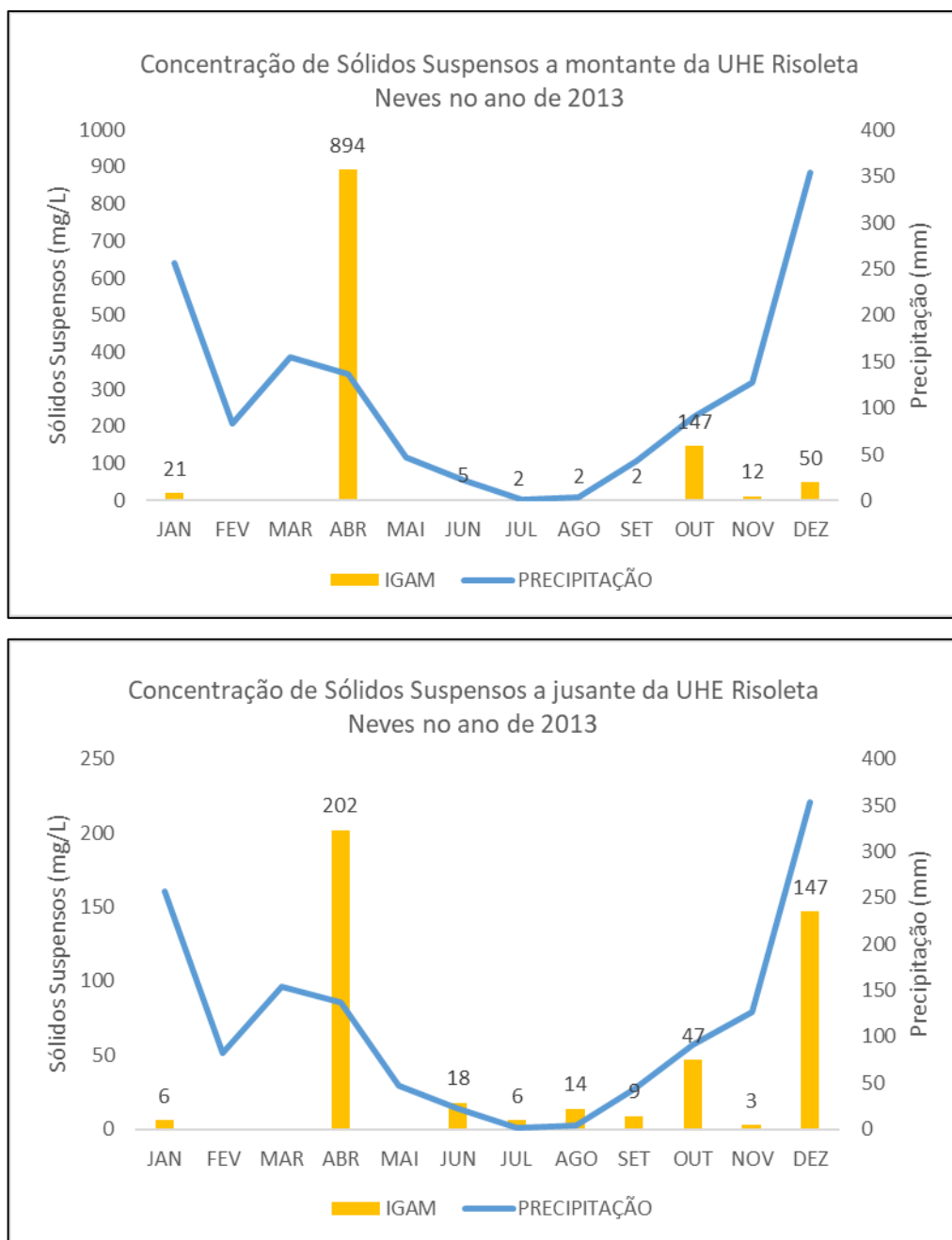
Na Figura 60 são apresentadas concentrações de sólidos suspensos a montante do reservatório da UHE Risoleta Neves ao longo dos anos de 2009 a 2023. Os dados contemplam estações operadas pelo IGAM e registradas no PMQQS (após o rompimento da barragem). Observa-se elevadas concentrações médias de sólidos suspensos para os anos de 2015 (881,73 mg/L) e 2016 (590,36 mg/L), imediatamente após o rompimento da barragem de rejeitos de Mariana.

Figura 61: Concentração de sólidos suspensos a jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves.



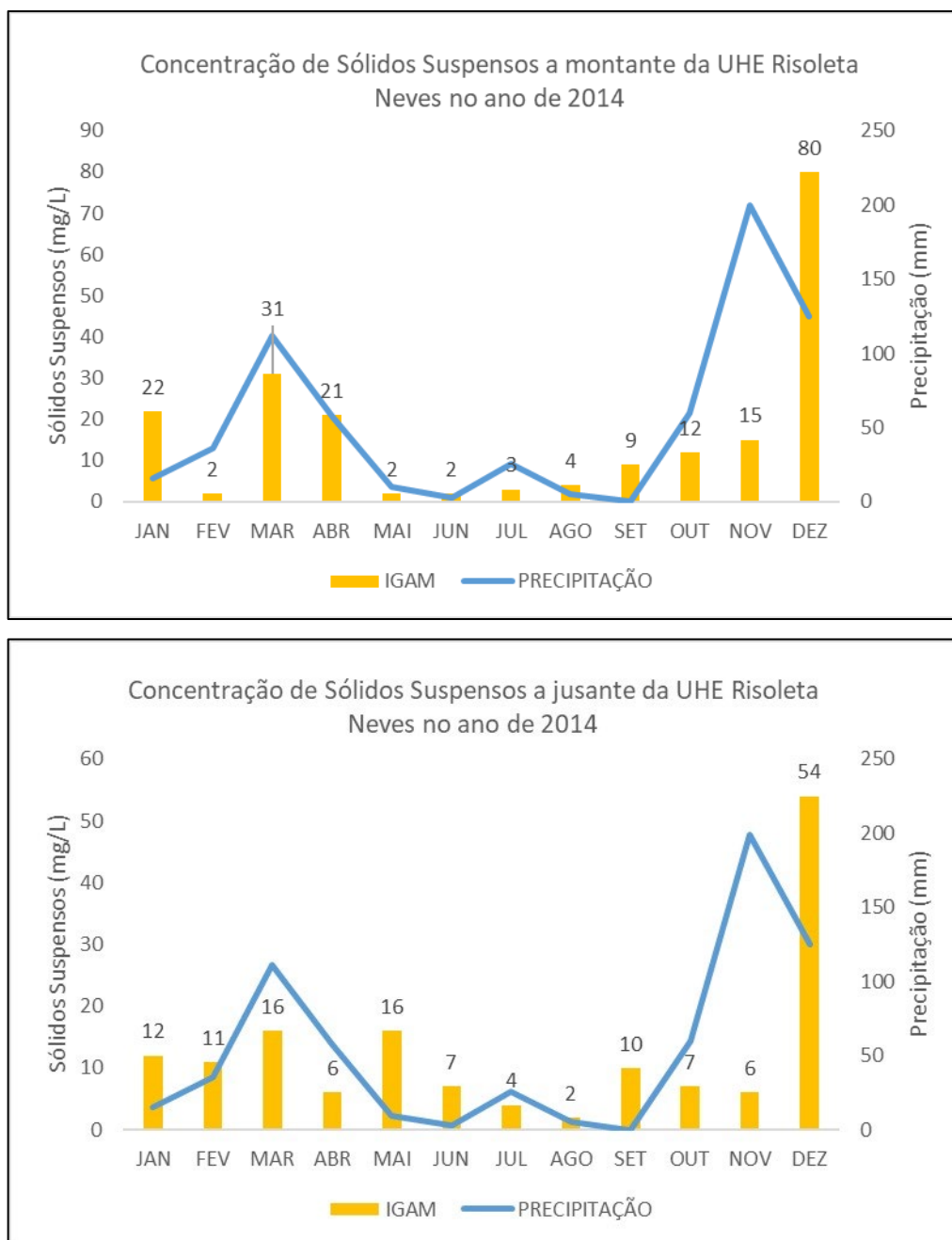
Na Figura 61 são apresentadas concentrações de sólidos suspensos a jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves ao longo dos anos de 2000 a 2023. Os dados contemplam estações operadas pelo IGAM e registrados no PMQQS (após o rompimento da barragem). Observa-se elevadas concentrações de sólidos suspensos para o ano de 2016 (310,45 mg/L), imediatamente após o rompimento da barragem de rejeitos de Mariana. Observa-se ainda, diferenças significativas nas concentrações de sólidos suspensos registrados nas estações do IGAM e do PMQQS nos anos de 2021, 2022 e 2023 quando avaliada à jusante do reservatório. Essa discrepância pode ter ocorrido devido às diferentes localidades onde as estações estão inseridas e às diferentes datas e horários de monitoramentos.

Figura 62: Concentração de sólidos suspensos a montante e a jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves (2013).



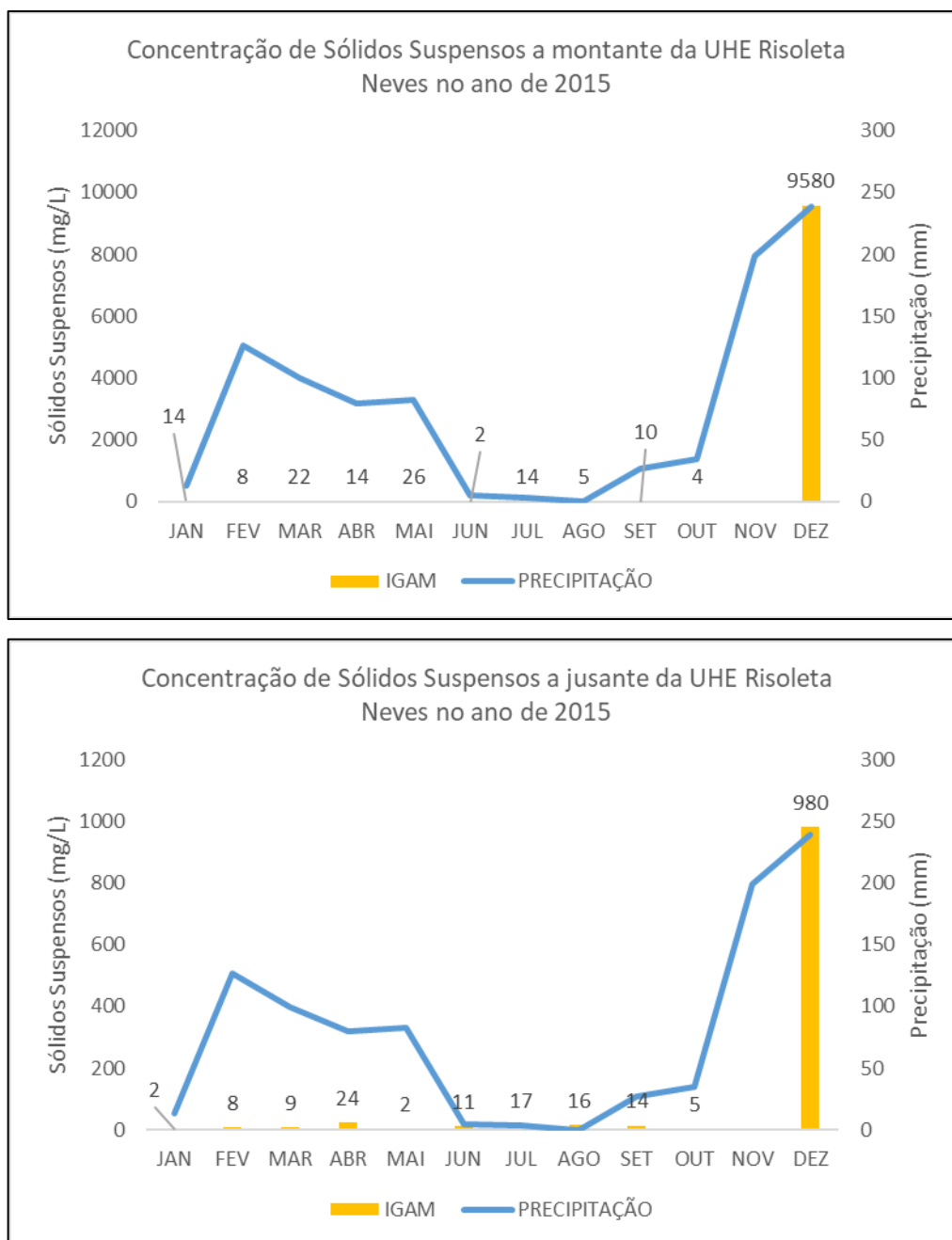
Na Figura 62 são apresentadas concentrações médias mensais de sólidos suspensos a montante e a jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves durante o ano de 2013, período anterior ao rompimento da barragem. Os dados contemplam registros de estações do IGAM. Observa-se mais elevadas concentrações nos meses de abril e dezembro.

Figura 63: Concentração de sólidos suspensos a montante e jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves (2014).



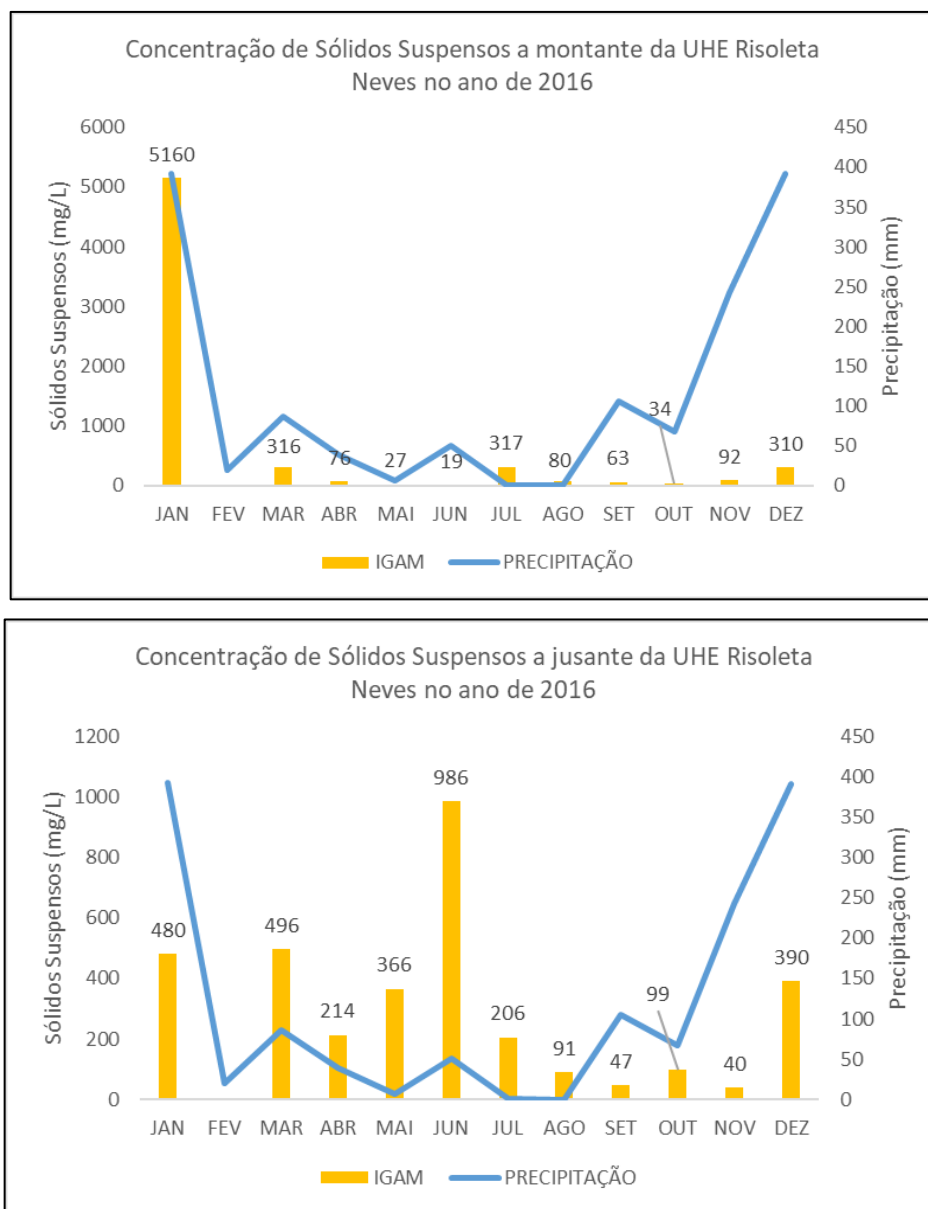
Na Figura 63 estão as concentrações médias mensais de sólidos suspensos a montante e jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves durante o ano de 2014, período que antecede o rompimento da barragem. Os dados contemplam estações do IGAM. Observa-se concentrações mais elevadas à montante e jusante do reservatório no mês de dezembro, sendo respectivamente de 80 mg/L e 54mg/L.

Figura 64: Concentração de sólidos suspensos a montante e jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves (2015).



Na Figura 64 são apresentadas as concentrações médias mensais de sólidos suspensos a montante e a jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves durante o ano de 2015. Os dados contemplam estações do IGAM. Observa-se concentrações elevadas para o mês de dezembro tanto a montante como a jusante da UHE, sendo 9.580 mg/L na estação a montante do reservatório e 980 mg/L a jusante. Este fato é consequência da passagem dos rejeitos provenientes do rompimento da barragem de Mariana, ocorrido em 05 de novembro de 2015, pelas estações de monitoramento. Devido à retenção de rejeitos no reservatório da UHE os valores médios de sólidos suspensos a jusante são inferiores àqueles a montante.

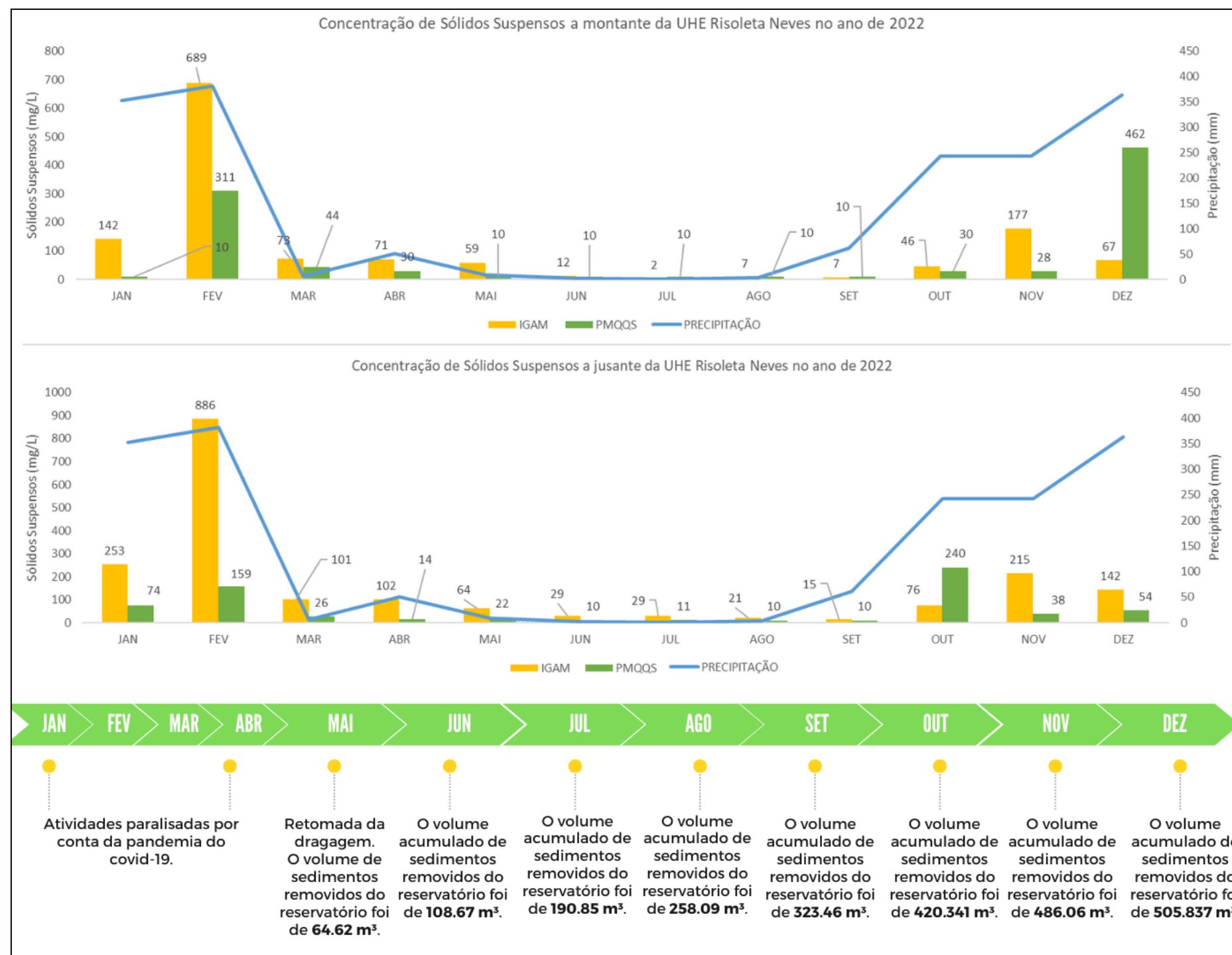
Figura 65: Concentração de sólidos suspensos a montante e jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves (2016).



Na Figura 65 são apresentadas as concentrações médias mensais de sólidos suspensos a montante e a jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves durante o ano de 2016, período posterior ao rompimento da barragem. Os dados foram registrados em estações operadas pelo IGAM. Podem ser observadas reduções de valores de sólidos suspensos em janeiro de 2016 em relação aos registrados em dezembro de 2015, tanto a montante como a jusante do reservatório. Destaca-se que de acordo com o banco de ações executadas na bacia, limpeza do reservatório foi iniciada em fevereiro de 2016, visando reinício da operação da Usina Hidrelétrica. Outras ações identificadas no banco de dados também foram executadas em 2016, como a construção da barragem Nova Santarém, construção de diques e alinhamento dos tributários com reconformação de calhas e planícies dos rios principais. Tais ações podem ter contribuído para alterações relacionadas com o parâmetro Turbidez. Não foram identificados no banco de dados do IGAM dados de sólidos suspenso referentes ao mês de fevereiro de 2016.



Figura 66: Concentrações de sólidos suspensos a montante e jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves (2022).

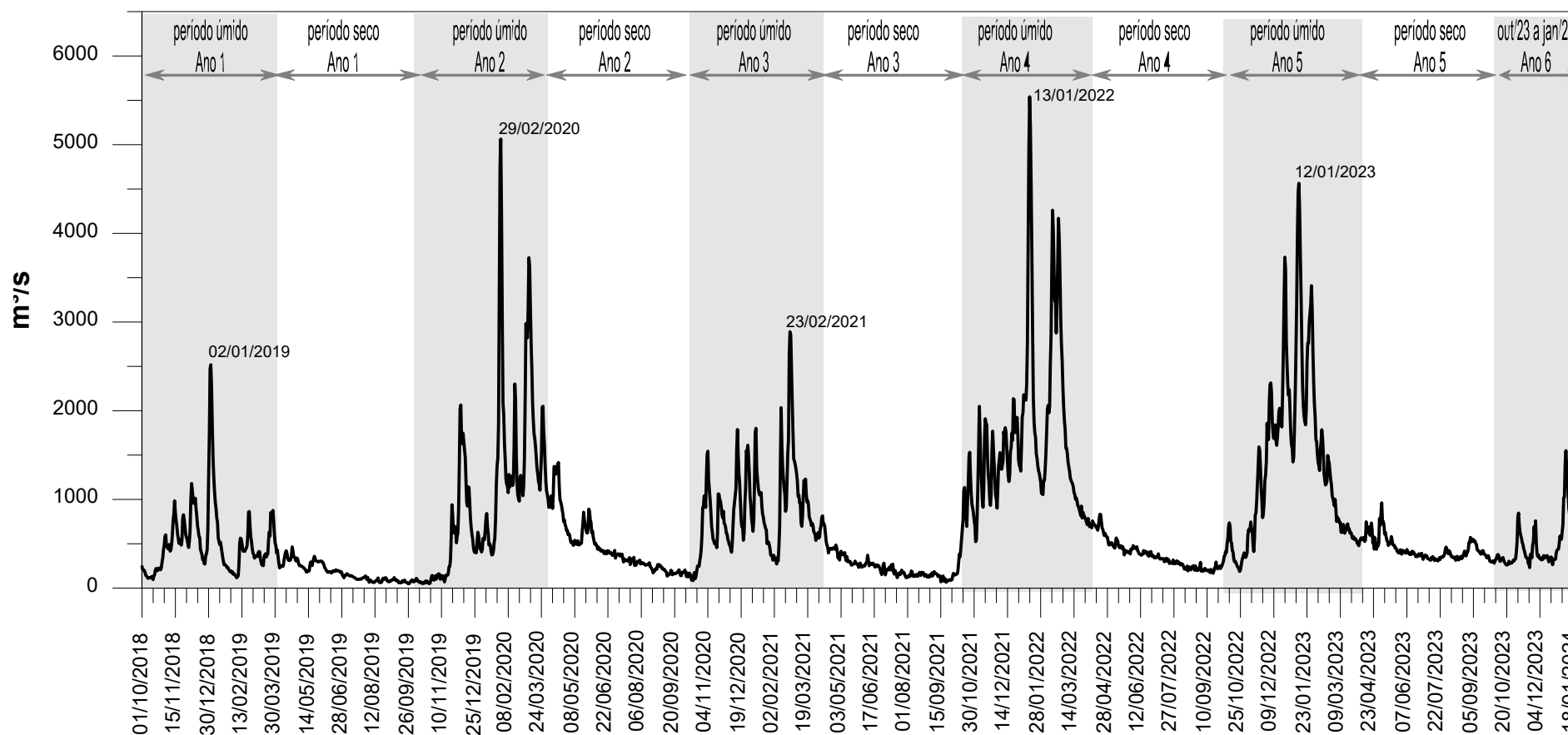


Na Figura 66 são apresentadas concentrações médias mensais de sólidos suspensos a montante e a jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves durante o ano de 2022. Os dados contemplam estações relativas ao IGAM e ao PMQQS. Os gráficos de sólidos suspensos foram combinados com o acompanhamento de ações no reservatório ao longo do ano. Essas ações são relacionadas com dragagem, para remoção de rejeitos retidos no reservatório da UHE. É possível observar que as obras foram conduzidas, em sua maior parte, no período seco. Observa-se que para todo o período de obras os valores de sólidos suspensos a montante do reservatório foram inferiores aos registrados a jusante, excetuando-se os casos dos registros do PMQQS referentes ao mês de dezembro. Esse comportamento pode estar relacionado com a ressuspensão de material de fundo durante a dragagem. Além disso, podem ser observados maiores valores médios de sólidos suspensos no período chuvoso. As discrepâncias entre os valores medidos nas estações do IGAM e do PMQQS podem ter ocorrido devido às diferentes localidades das estações e aos diferentes momentos de monitoramento. Salienta-se que não foi identificado para o ano de 2023 avanço na meta de dragagem da UHE Risoleta Neves, portanto a análise mensal se limitou ao ano de 2022.

### 3.3 HIDROLOGIA E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

#### 3.3.1 Vazão

Figura 67: Vazões médias diárias estimadas no Rio Doce (E21 - Linhares), obtidas com dados do PMBA/Fest.



As vazões medidas na estação E21, localizada em Linhares/ES, representam a contribuição de água doce oriunda da Bacia do Rio Doce para os ambientes marinho e costeiro adjacentes à foz do rio (Figura 67). A sazonalidade presente nos dados de vazão do rio influencia diretamente na saúde dos ambientes monitorados no PMBA/Fest, uma vez que em períodos úmidos ocorrem os maiores valores de vazão que causam ressuspensão de sedimentos depositados na calha do rio. Por outro lado, em períodos secos, ocorrem os valores mais baixos de vazão que podem contribuir na redução da diluição de poluentes presentes na água.

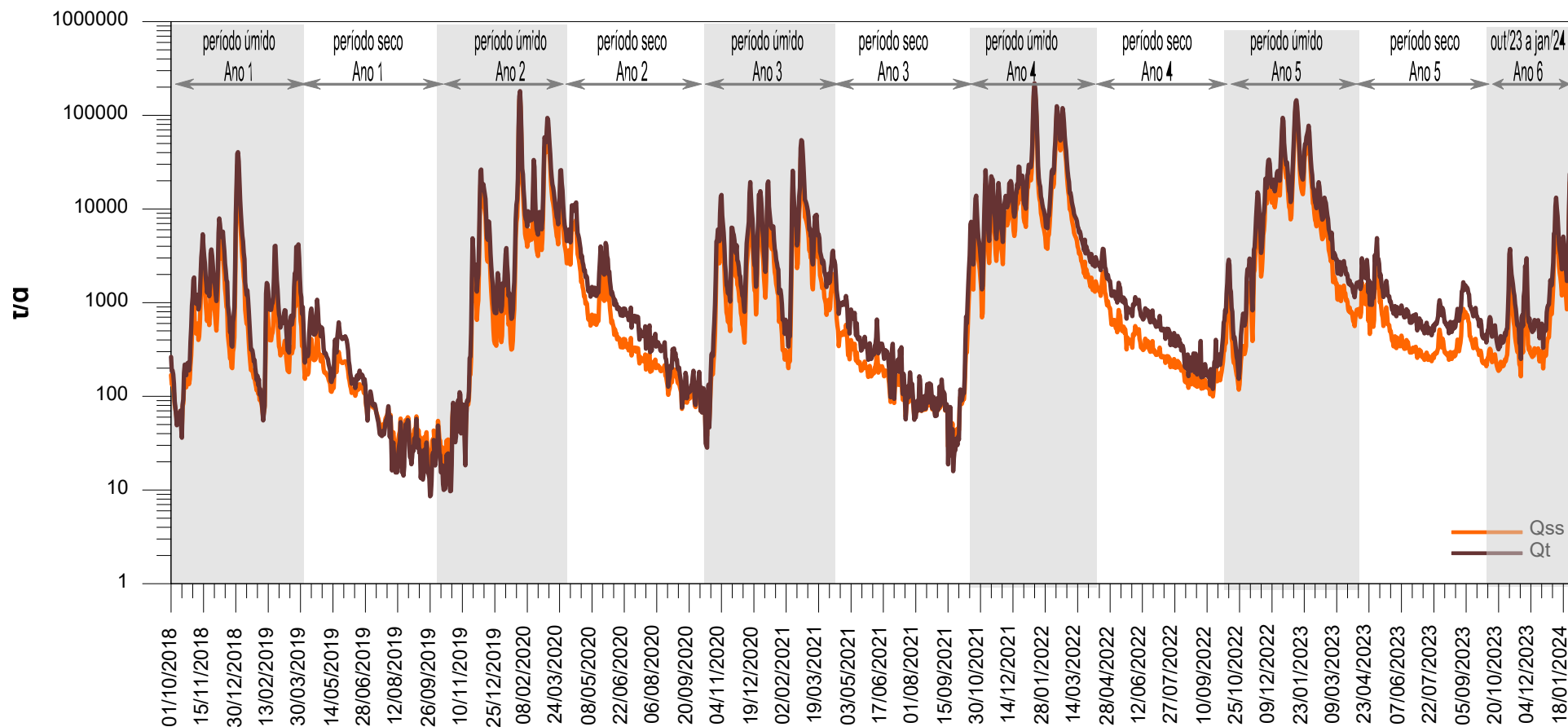
Para o período de monitoramento do PMBA/Fest (outubro de 2018 a janeiro de 2024), o período chuvoso do Ano 4 (outubro de 2021 a setembro de 2022) apresentou os maiores valores de vazões média e máxima diárias em comparação às obtidas nos demais anos de monitoramento, para o mesmo período. Em ordem decrescente de ocorrência, foram observados os seguintes valores de vazões média e máxima, respectivamente, para os períodos chuvosos: Ano 4 (outubro de 2021 a setembro de 2022) 1.600 e 5.539 m<sup>3</sup>/s, Ano 5 (outubro de 2022 a setembro de 2023) 1.382 e 4.565 m<sup>3</sup>/s, Ano 2 (outubro de 2019 a setembro de 2020) 988 e 5.179 m<sup>3</sup>/s, Ano 3 (outubro de 2020 a setembro de 2021) 873 e 2.889 m<sup>3</sup>/s e Ano 1 (outubro de 2018 a setembro de 2019) 519 e 2.584 m<sup>3</sup>/s (RRDM. 2022). O período compreendido entre outubro de 2023 a janeiro de 2024 apresentou vazões média e máxima diárias 549 e 2.100 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, valores próximos aos obtidos no Ano 1 do monitoramento para o todo período chuvoso. As vazões máximas obtidas no monitoramento PMBA/Fest foram inferiores a registros históricos de cheia do Rio Doce, com valores da ordem de 13.000 m<sup>3</sup>/s (1979), 8.000 m<sup>3</sup>/s (1997) e 10.700 m<sup>3</sup>/s (2013) (ANA, 2019b).

Em relação às vazões médias diárias obtidas nos períodos secos, observou-se que o Ano 1 apresentou o menor valor, 180 m<sup>3</sup>/s, seguido do Ano 3, 257 m<sup>3</sup>/s, Ano 4, 356 m<sup>3</sup>/s, Ano 5, 442 m<sup>3</sup>/s a Ano 2, 465 m<sup>3</sup>/s.

Em comparação à série histórica da estação fluviométrica Colatina (569945000 – 1938-2014), cuja vazão média de longo termo é 914 m<sup>3</sup>/s, a série histórica do PMBA/Fest apresentou valor inferior, 697 m<sup>3</sup>/s.

### 3.3.2 Descarga sólidas de sedimentos

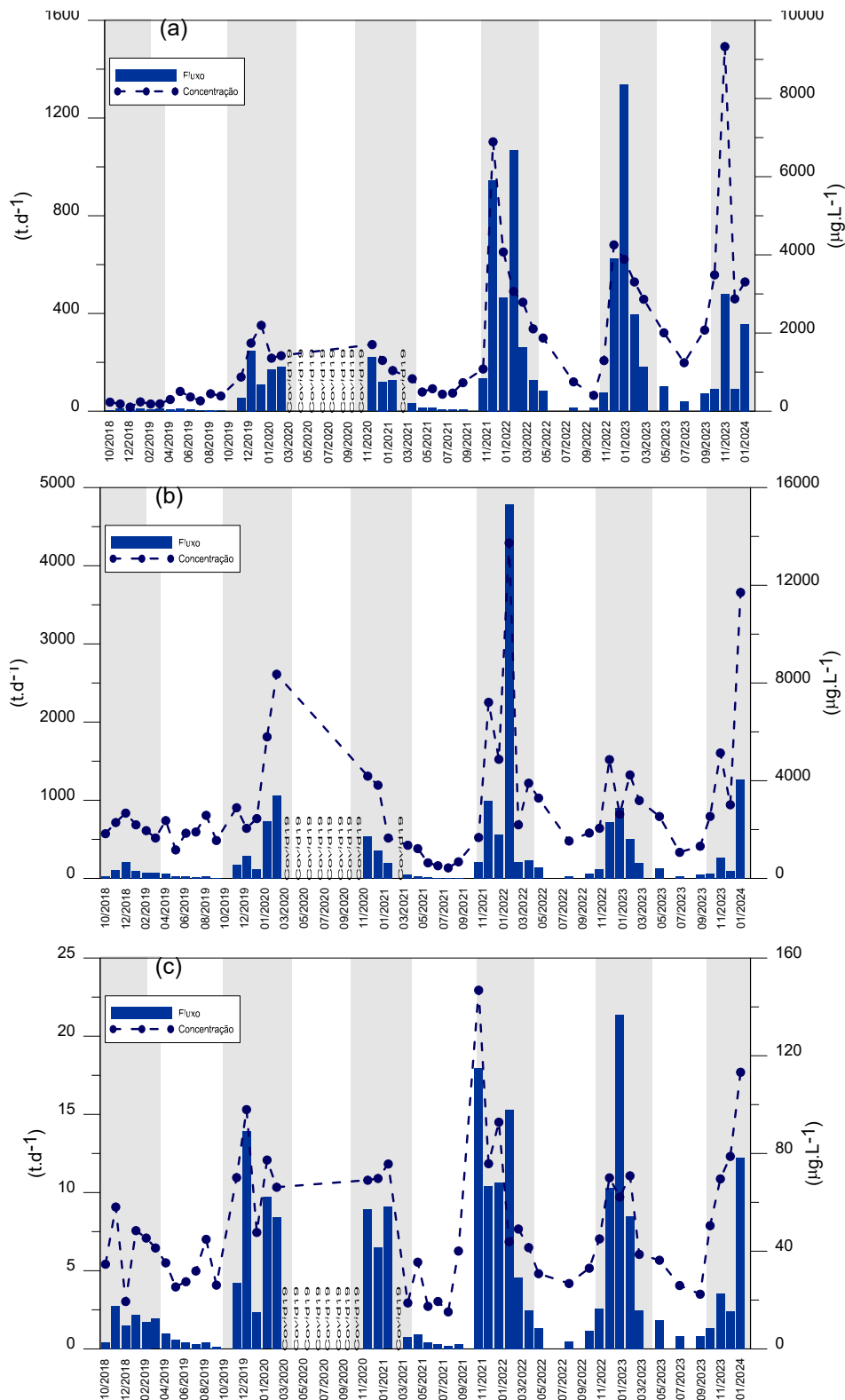
Figura 68: Descargas médias diárias de sedimentos totais ( $Q_t$ ) e suspensos ( $Q_{ss}$ ) estimadas para o Rio Doce (E21 – Rio Doce), obtidas com dados do PMBA/Fest.



As descargas de sedimentos obtidas para a estação E21, localizada em Linhares, representam a totalidade dos fluxos de sedimentos oriundos da Bacia do Rio Doce que afluem para região costeira e marinha adjacentes à foz do rio. Nos períodos chuvosos ocorrem os maiores aportes de sedimentos para a calha do rio, resultando em maiores valores de descargas de sedimentos (Figura 68). Esses sedimentos aportam ao ambiente costeiro, adjacente à foz do rio, chegando a concentrações de 1000 mg/L (RRDM, 2019a). Com o aumento das partículas de sedimentos em suspensão há elevação da turbidez da água e redução da penetração de luz na coluna d'água, influenciando negativamente o processo de fotossíntese, fundamental para a sobrevivência da biota aquática. Durante a passagem dos rejeitos do rompimento da barragem, a bacia do Rio Doce atravessava um período de estiagem. Os elevados valores de fluxos de sedimentos suspensos medidos nos dias 08 e 16/12/2015, respectivamente, 20.571 t/d e 22.480 t/d, na seção de Linhares, foram devido às altas concentrações de sedimentos suspensos (CPRM, 2016; RRDM, 2019b). O período de monitoramento do PMBA/Fest apresentou picos de fluxos de sedimentos com valores iguais ou superiores aos observados em dezembro/2015 (Figura 68). Em termos de fluxos totais, o Ano 4 (outubro de 2021 a setembro de 2022) apresentou os maiores valores de descargas totais média e máxima diárias, para o período chuvoso, cujos valores foram respectivamente, 20.809 e 186.983 t/d, seguido do Ano 5 (outubro de 2022 a setembro de 2023) 17.715 e 144.979 t/d, Ano 2 (outubro de 2019 a setembro de 2020) 10.700 e 155.254 t/d, Ano 3 (outubro de 2020 a setembro de 2021) 5.774 e 48.635 t/d e Ano 1 (outubro de 2018 a setembro de 2019) 2.260 e 36.589 t/d m<sup>3</sup>/s (RRDM, 2022). O período compreendido entre outubro de 2023 a janeiro de 2024 apresentou valores de descargas de sedimentos totais média e máxima diárias 2.976 e 24.931 t/d, respectivamente, valores próximos aos obtidos no Ano 1 do monitoramento para o todo período chuvoso. Enquanto houver remanescentes de rejeitos na calha do Rio Doce, ocorrerá transporte desse material, sobretudo nos períodos chuvosos, devido às maiores vazões do rio.

### 3.3.3 Resultados De Fluxos De Metais

Figura 69: Fluxos instantâneos de metais no Rio Doce (E21 – Rio Doce), obtidas no PMBA/Fest. (a) Alumínio Total. (b) Ferro Total. (c) Manganês Total.

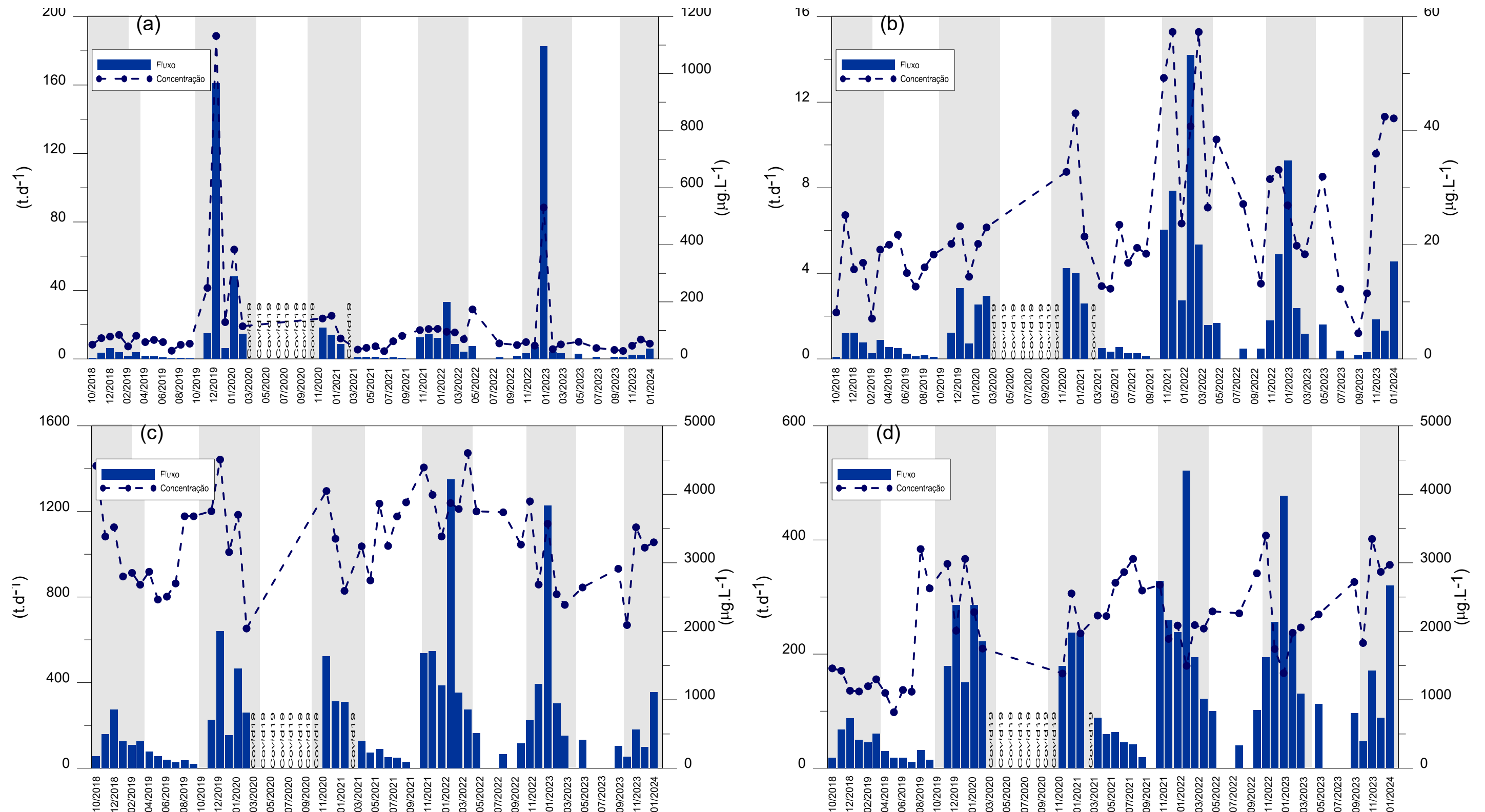




A presença de metais pode ocasionar distúrbios na produção primária, influenciando nos padrões de diversidade de organismos da biota aquática (CAGNIN, et al, 2022; RRDM, 2022). Ao longo do monitoramento do PMBA/Fest, os metais Al, Fe e Mn, na fração total, apresentaram maiores fluxos instantâneos nos períodos chuvosos (Figura 69). Assim como ocorreu com vazões e descargas de sedimentos, o Ano 4 (outubro de 2021 a setembro de 2022) apresentou os maiores valores de fluxos médios desses metais, cujos valores médios foram 574,8 ( $\pm$  371,2) t/d, 1.349,2 ( $\pm$  1.743,2) t/d e 11,8 ( $\pm$  4,6) t/d para Al, Fe e Mn, respectivamente. Os máximos valores observados nesse mesmo período foram 1.069,3 t/d (Al), 4.787,6 t/d (Fe), ambas na campanha de fev/2022, e 18 t/d (Mn), na campanha de nov/2021.

### 3.3.4 Resultados De Fluxos De Nutrientes

Figura 70: Fluxos instantâneos de nutrientes no Rio Doce (E21 – Rio Doce), obtidas no PMBA/Fest. (a) Fósforo Total. (b) Fósforo Inorgânico Dissolvido. (c) Nitrogênio Total. (d) Nitrogênio Inorgânico Dissolvido.



Os fluxos instantâneos de nutrientes também apresentaram valores mais elevados nos períodos chuvosos. Assim como ocorreu com vazões, descargas de sedimentos e metais (Al, Fe e Mn), o Ano 4 (outubro de 2021 a setembro de 2022) apresentou os maiores valores de fluxos médios de Nitrogênio Total, Nitrogênio Inorgânico Dissolvido e Fósforo Inorgânico Dissolvido cujos valores médios foram 635,3 ( $\pm$  365,9) t/d, 308.5 ( $\pm$  114,9) t/d e 7,2 ( $\pm$  3,9) t/d, respectivamente. O fluxo instantâneo médio de Fósforo Total foi maior no período chuvoso do Ano 2 (outubro de 2019 a março de 2020), devido à alta concentração medida na campanha de dezembro (Figura 70). Alterações de processos biogeoquímicos podem comprometer a disponibilidade de nutrientes que aportam no ambiente costeiro adjacente à foz do rio (VIAROLI et al, 2018).

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS 5 ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO**

O indicador Produção de Água por Região, conduzido a partir de modelagem chuva-vazão, torna possível indicar as porcentagens de água que aportam à região flúvio-estuarina-marinha do Rio Doce advindas de montante do reservatório de Aimorés e também das sub-bacias a jusante dele. Ocorrem variações destas porcentagem à medida que acontecem variações temporais e espaciais de chuva e vazão na bacia, embora essa relação chuva-vazão não seja estritamente direta, uma vez que outros fatores, em especial o uso e ocupação do território, possam interferir na dinâmica de escoamento da bacia hidrográfica.

No Ano 1 (outubro de 2018 a setembro de 2019) do PMBA/Fest, a parte superior da bacia (a montante do reservatório Aimorés) contribuiu durante o período chuvoso com cerca de 87% da produção de água da bacia, e no período seco contribuiu com cerca de 86%. No Ano 2 (outubro de 2019 a setembro de 2020), a parte superior da bacia contribuiu durante o período chuvoso com cerca de 83% da produção de água da bacia. No Ano 3 (outubro de 2020 a setembro de 2021), a parte superior da bacia contribuiu durante o período chuvoso com cerca de 72% da produção de água da bacia, e no período seco contribuiu com cerca de 73%. No Ano 4 (outubro de 2021 a setembro de 2022), a parte superior da bacia contribuiu durante o período chuvoso com cerca de 72% da produção de água da bacia, e no período seco contribuiu com cerca de 76%. No Ano 5 (outubro de 2022 a setembro de 2023), a parte superior da bacia contribuiu durante o período chuvoso com cerca de 72% da produção de água da bacia, e no período seco contribuiu com cerca de 74%. E, por último, no Ano 6, a parte da bacia a montante da UHE Aimorés contribuiu durante o período chuvoso incompleto (outubro de 2023 a janeiro de 2024) contribuiu com cerca de 74% da produção de água da bacia.

Em termos gerais, o período chuvoso apresenta maiores índices pluviométricos nos meses de dezembro e janeiro, sendo que os maiores valores se concentram nas regiões de cabeceira da bacia, onde se encontram os rios Piranga e Carmo, formadores do Rio Doce, e os rios Piracicaba e Santo Antônio. Esse é um padrão na bacia do Rio Doce. Especialmente, a parte alta da bacia possui as regiões que registram maior pluviosidade, ratificando a informação anterior. Durante os 5 primeiros anos de PMBA/Fest (outubro de 2018 a setembro de 2023) o período chuvoso com maior média pluviométrica acumulada foi o do Ano 4 (outubro de 2021 a março de 2022), seguido do Ano 5 (outubro de 2022 a março de 2023). Cabe ressaltar que o período chuvoso do Ano 6 (outubro de 2023 a março de 2024) não foi analisado em sua totalidade, uma vez que os resultados contemplados neste relatório são até janeiro de 2024, e, portanto, não tem como ser comparado aos demais períodos chuvosos. Já o período seco com menor média pluviométrica acumulada ocorreu no Ano 3 (abril a setembro de 2021), seguido do Ano 4 (abril a setembro de 2022), porém, as diferenças entre os períodos secos durante o PMBA/Fest não foram significativas.

A relação do tema com o impacto do rejeito do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana/MG é indireta, sendo sua principal contribuição possibilitar os demais temas explicarem variações temporais e espaciais de seus dados com maior precisão, utilizando como base as variações sazonais de

períodos chuvosos e secos na bacia, bem como a produção de sedimentos nas diversas regiões da bacia.

A estimativa da geração de sedimentos na bacia do Rio Doce ao longo dos anos do PMBA/Fest indicou que, ao longo dos anos do PMBA/Fest, a tendência na geração de sedimentos na bacia do Rio Doce inclinou-se para mais (todos os períodos chuvosos, em especial no Ano 4) ou para menos (todos os períodos secos) a depender do índice pluviométrico, o que ressalta a influência da sazonalidade hidrológica sobre a geração de sedimentos. Durante os 5 anos do PMBA/Fest (outubro de 2018 a setembro de 2023) o período chuvoso com a maior média de geração de sedimentos foi o do Ano 4 (outubro de 2021 a março de 2022), seguido do Ano 2 (outubro de 2020 a março de 2021). A menor geração de sedimentos entre os períodos chuvosos foi estimada para o Ano 1 (outubro de 2018 a março de 2019), que inclusive foi superado pelo período chuvoso incompleto do Ano 6 (outubro de 2023 a janeiro de 2024). Em relação a geração de sedimentos no período seco, destaca-se o Ano 2 (abril a setembro de 2020) com a maior média de geração de sedimentos, seguido do Ano 5 (abril a setembro de 2023), porém, independentemente do ano de análise, as gerações de sedimentos permaneceram baixas nos períodos secos em comparação aos períodos chuvosos.

Os resultados do transporte de sedimentos expresso na forma de descarga sólida em suspensão indicaram que os rios transportam baixa carga de sedimentos no período seco e trechos que transportam alta carga de sedimentos no período chuvoso, sendo consequência das altas precipitações e/ou da geração de sedimentos na bacia. Durante os 5 anos do PMBA/Fest (outubro de 2018 a setembro de 2023) o período chuvoso com o maior transporte de sedimentos foi o do Ano 4 (outubro de 2021 a março de 2022), seguido do Ano 5 (outubro de 2022 a março de 2023). O menor transporte de sedimentos da bacia do Rio Doce entre os períodos chuvosos foi estimado para o Ano 1 (outubro de 2018 a março de 2019), pois o período chuvoso do Ano 6 (outubro de 2023 a janeiro de 2024) está incompleto. Em relação ao transporte de sedimentos no período seco, destaca-se o Ano 2 (abril a setembro de 2020) com o maior transporte de sedimentos, seguido do Ano 5 (abril a setembro de 2023), porém, independentemente do ano de análise, o transporte de sedimentos se mantiveram baixos nos períodos secos quando comparados aos períodos chuvosos.

A ressuspensão do rejeito no fundo da intracalha contribuiu com o aumento da descarga sólida em suspensão no período de cheias, principalmente nos trechos diretamente impactados pelo rompimento da Barragem de Fundão. Nesse contexto, a ocorrência de elevadas precipitações sobre a bacia e, consequentemente, elevadas vazões, tendem a impactar de forma expressiva o transporte de sedimentos, evidenciando o impacto da ressuspensão do rejeito como o estimado no período chuvoso do Ano 4 (outubro de 2021 a março de 2022) que apresentou as maiores variações nas descargas sólidas em suspensão da bacia do Rio Doce em função da ressuspensão do rejeito devido ao elevado índice pluviométrico. Ainda assim, a nível de bacia, a ressuspensão do rejeito apresentou baixa influência no aumento da quantidade total de sedimentos que é exportada para a zona estuarina do Rio Doce. Nesse sentido, é importante destacar que naturalmente a bacia do Rio Doce apresenta uma alta geração e transporte de sedimentos, o que dificulta a percepção de baixa variação nas descargas

sólidas em suspensão em função da ressuspensão do rejeito a nível de bacia, pois os trechos que não apresentam rejeito tendem a reduzir a percepção do impacto.

Diante do exposto, a bacia do Rio Doce apresenta uma elevada geração e transporte de sedimentos nos períodos chuvosos, sendo mais proeminentes nos períodos que apresenta maior acumulado pluviométrico (Ano 4). Destaca-se ainda, a redução gradual dos volumes de depósito de rejeitos ao longo dos anos e aumento da descarga sólida em suspensão devido à ressuspensão do rejeito, o que pode ocasionar elevação da turbidez e outras alterações na qualidade da água. Exceção para os segmentos do Rio Doce que compreendem os reservatórios das UHEs, pois estes, desempenham um importante papel na retenção de sedimentos produzidos nos tributários a montante de sua localização e, para o trecho do Rio Doce entre Linhares e sua foz que apresentou aumento gradual no volume de depósito de rejeito. Porém, os resultados mostram que os impactos do rejeito em aumentar a descarga sólida em suspensão estão geralmente associados ao período de cheias, quando a carga de sedimentos naturalmente produzida pela bacia já é muito alta.

Os indicadores Vazão e Descargas Sólidas de Sedimentos são apresentados como séries diárias para a estação de monitoramento E21, localizada em Linhares; essa seção de monitoramento é representativa do aporte de fluxos oriundos da bacia do Rio Doce, com influência direta sobre os ambientes marinho e costeiro adjacentes à foz do rio.

Em termos de vazões média e máxima diárias, o período chuvoso do Ano 4 apresentou os maiores valores de todo o período monitorado, 1.600 m<sup>3</sup>/s e 5.539 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. As relações das vazões médias diárias do período chuvoso do Ano 4 em comparação aos demais períodos úmidos monitorados foram respectivamente 3,0 para o Ano 1 e para o período de outubro/2023 a janeiro/2024 (Ano 6); 1,6 para o Ano 2; 1,8 para o Ano 3 e 1,5 para o Ano 5. Para os períodos secos, as vazões médias diárias apresentaram valores entre 49 m<sup>3</sup>/s, no Ano 1 (mês de setembro), e 1.416 m<sup>3</sup>/s, no Ano 2 (abril). Em termos médios, a vazão média diárias dos períodos secos monitorados foi 346 m<sup>3</sup>/s.

O mesmo comportamento foi observado nos valores monitorados de descargas de sedimentos suspensos e totais, que apresentaram valores superiores no Ano 4 (20.809 e 186.983 t/d), em relação aos demais anos monitorados, para o período chuvoso, cujos valores de descargas médias e máximas diárias de sedimentos totais foram, respectivamente: 2.260 e 36.589 t/d (Ano 1), 10.700 e 155.254 t/d (Ano 2), 5.774 e 48.635 t/d (Ano 3), 17.715 e 144.979 t/d (Ano 5) e 2.976 e 24.931 t/d (Ano 6 período de outubro/2023 a janeiro/2024).

Os resultados de monitoramentos de vazões e fluxos de sedimentos na estação E21 corroboram os resultados obtidos para pluviosidade e modelagem de sedimentos, que também apresentaram valores mais elevados no período chuvoso do Ano 4.

As vazões e os fluxos de sedimentos apresentam variações sazonais, com valores mais elevados em períodos chuvosos, nos quais ocorre maior aporte de sedimentos para a calha do rio. A correlação dos indicadores apresentados nesse subprojeto com parâmetros bióticos possibilitará uma análise mais



efetiva sobre o efeito da sazonalidade nos organismos. Deve-se verificar os efeitos dos pulsos de vazões sobre os organismos estudados nos demais temas do Ambiente Dulcícola.

Quanto à linha de ação “Caracterização e análise de interrelações envolvendo ações na bacia hidrográfica, e aspectos de quantidade/qualidade da água e biodiversidade aquática”, aponta-se como indicadores de destaque aqueles relativos aos desempenhos dos programas da Fundação Renova denominados: Quantidade De Material Dragado Na UHE Risoleta Neves, Áreas Recuperadas, Nascentes Recuperadas, e Repasse Financeiro para Ações de Esgotamento Sanitário.

O monitoramento dos Programas da Fundação Renova que possuem potencial de interferir com aspectos de qualidade e quantidade de água e biodiversidade, é de suma importância para o PMBA/Fest, Fundação Renova, CT-Bio, CIF e para a sociedade Civil. O monitoramento das ações que compõem os Programas traz, de um modo geral, transparência sobre a implementação e desenvolvimento das mesmas, além de subsidiarem discussões sobre a efetividade, eficácia e melhorias futuras destes programas. Para os referidos indicadores são apresentadas sua evolução temporal, e quando possível o comportamento espacial destes, permitindo aos tomadores de decisão avaliarem o cumprimento das metas destes programas e refletirem sobre o escopo dos mesmos. Especificamente para o PMBA/Fest, estes indicadores apresentam significativa importância, uma vez que ações presentes nestes tem potencial de impactar nas variáveis e parâmetros monitorados por outros temas.

De modo geral, nos anos iniciais destes programas a evolução dos indicadores foi mais lenta, o que pode ser explicado pela necessidade de construção dos mesmos, por se encontrarem em fase inicial, onde o foco principal era seguir as orientações do TTAC, das Câmaras Técnicas do CIF, do próprio CIF e assim construir metodologias e escopos de projetos. Além disso, observou-se impactos da pandemia e a partir do ano de 2022 uma retomada mais significativa no desenvolvimento dos programas, que se mostra refletido no comportamento dos indicadores. De modo geral, os indicadores apresentam melhores resultados no ano de 2023, tendo crescimentos significativos neste ano, à exceção do indicador Quantidade De Material Dragado Na UHE Risoleta Neves, dado que a dragagem não foi realizada continuamente, tendo evolução principalmente no ano de 2022.

A submeta 14 do plano de trabalho do ambiente dulcícola aborda exclusivamente a proposição de cenários de simulação para avaliação de efeitos de modificações de uso e ocupação do solo, definidos por meio das ações levantadas, bem como dos resultados do monitoramento. Nesse sentido, para atender a referida submeta, foram propostos 4 cenários que envolvem a avaliação dos indicadores “produção de água” e/ou “geração e transporte de sedimentos” e/ou “ações na bacia”. O cenário 1 compreende “Avaliação dos efeitos das ações de recuperação florestal, executadas dentro dos Programas 26 e 27 da Fundação Renova, na produção de água e na geração e transporte de sedimentos”. Os Programas 26 e 27 da Fundação Renova atuam em diferentes sub-bacias do Rio Doce recuperando nascentes e áreas de preservação e recarga hídrica. Caso os Programas sejam implementados em suas totalidades, o cenário avaliaria quais seriam os possíveis efeitos observados na variação de classes de uso e ocupação do solo, na produção de água e na geração e transporte de

sedimentos. O cenário 2 corresponde à “Simulação do efeito da consideração do fator de práticas conservacionistas sobre o uso e ocupação do solo na geração e transporte de sedimentos da bacia hidrográfica do Rio Doce”. Caso sejam adotadas práticas conservacionistas nas áreas cuja classe de uso e ocupação do solo são identificadas como agricultura e/ou pastagem, o cenário avaliaria quais seriam os possíveis efeitos observados na geração e transporte de sedimentos. O cenário 3 propõe a “Simulação do impacto de eventos extremos de chuva e vazão sobre a geração e transporte de sedimentos da bacia hidrográfica do Rio Doce”, que avaliaria como a ocorrência de eventos extremos (aumento da chuva e vazão) impacta diretamente na ressuspensão de rejeito e, consequentemente, a elevação da descarga sólida em suspensão. Por fim, o cenário 4 propõe “Avaliar o impacto das mudanças climáticas na dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do Rio Doce em função das projeções futuras de modelos climáticos”, avaliando quais os possíveis impactos das mudanças climáticas na dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do Rio Doce.

## 5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS

Todos os itens previstos foram cumpridos para o Tema.

## 6 REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K.C. 2005. **Calibration of hydrologic models: when is a model calibrated**. In: ZERGER, A.; ARGENT, R.M. (eds) MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation. Canberra: Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, 2005.

ANA, Agência Nacional de Águas. **Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2017 5k (BHO 2017 5k)**. Brasília: ANA, 2018a. Disponível em: <https://metadados.ana.gov.br/geonetwork>

ANA, Agência Nacional de Águas. **Cota x Área x Volume dos Reservatórios de Usinas Hidrelétricas**. Brasília: ANA, 2019a. Disponível em: <https://metadados.ana.gov.br/geonetwork>

ANA, Agência Nacional de Águas. **Hidroweb**. Brasília: ANA, 2019b. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>.

ANA, Agência Nacional de Águas. **Portal de Informações e Dados Especiais da agência nacional de águas – GeoNetwork**. Brasília: ANA, 2018b. Disponível em: <<https://metadados.ana.gov.br/geonetwork>>.

ANDRIOLO, M. V. et al. **Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos**. VI Simpósio Sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas. Belo horizonte: Comitê Brasileiro de Barragens, 2008. p.1-17.

BARRETO, G. A. **Conectividade de sedimentos em grande bacia hidrográfica: Uma comparação com a modelagem de sedimentos**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito santo, Vitória, 2018.

BRITO NETO, R. L. et al. Aplicação do modelo MGB-IPH na bacia hidrográfica do Rio Pardo em diferentes cenários de uso e ocupação do solo. **Ciência Florestal**, v. 3, p. 191–213, 2021.

BRODERSEN, K. E. et al. Sediment resuspension and deposition on seagrass leaves impedes internal plant aeration and promotes phytotoxic H<sub>2</sub>S intrusion. **Frontiers in plant science**, v. 8, p. 247489, 2017.

BUARQUE, D. C. **Simulação da geração e transporte de sedimentos em grandes bacias: Estudo de caso do rio Madeira**. 2015. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

CAGNIN, R. C. et al., 2022. Macronutrients and dissolved iron in a land-ocean approach: Influences of contamination by ore tailings in Southeastern Brazil. **Frontiers in Marine Science**. 9:990809.

CARVALHO, N. O. (2008). **Hidrossedimentologia prática**. 2º ed. Rio de Janeiro, Interciência

CARVALHO, S. L. (2019). **Sistema De Suporte a Decisão Para Planejamento, Controle E Redução De Cargas Difusas e Pontuais em Bacias Hidrográficas**. PhD thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental -UFES. Tese de Doutorado em Engenharia Ambiental.

COLBY, B. R., HEMBREE, C. H. Computation of total sediment discharge: Niobrara River near Cody, Nebraska. US Geological Survey, **Water-Supply Paper**. 1357. Washington. 1955.

COLLISCHONN, W. et al. The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 878–895, 2007.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação Hidrológica de grandes Bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1, p. 95–118, 2001.

CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2016. Monitoramento Especial da Bacia do Rio Doce: Relatório 04 - Hidrometria, Sedimentometria e Qualidade da Água nas Estações Fluviométricas da RHN após a Ruptura da Barragem de Rejeito. Belo Horizonte, Disponível em: <[https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/21590/1/riodoce\\_relatorio4.pdf](https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/21590/1/riodoce_relatorio4.pdf)>

CZUBA, J. A.; et al. Comparison of fluvial suspended-sediment concentrations and particle-size distributions measured with in-stream laser diffraction and in physical samples. **Water Resources Research**, (2015).

ESA. Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM). Disponível em: <<https://doi.org/10.5270/ESA-c5d3d65>> Acesso em 10 de jan. 2023.

FAGUNDES, H. de O. **Modelagem hidrossedimentológica de grandes bacias com apoio de dados in situ e sensoriamento remoto**. 2018. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

FAGUNDES, H. de O. Sediment modeling of a large-scale basin supported by remote sensing and in-situ observations. **CATENA**, v. 190, p. 104535, 2020.

FAN F. M.; BUARQUE D. C.; PONTES, P.R.M.; COLLISCHONN W. Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Novembro de 2015, Brasília-DF. Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. PAP019919. 2015.

FÖEGER, L. B. et al. Large-scale sediment modeling with inertial flow routing: Assessment of Madeira River basin. **Environmental Modelling & Software**, v. 149, p. 105332, 2022.

FREITAS, Carlos Machado de; SILVA, Mariano Andrade da; MENEZES, Fernanda Carvalho de. O desastre na barragem de mineração da Samarco: fratura exposta dos limites do Brasil na redução de risco de desastres. **Ciência e Cultura**, v. 68, n. 3, p. 25-30, 2016.

FROEHNER, S.; MARTINS, R. F. Avaliação da composição química de sedimentos do Rio Barigüi na região metropolitana de Curitiba. **Química Nova**, v. 31, p. 2020-2026, 2008.

FUNDAÇÃO RENOVA. **Relatório Anual de Atividades**. 2017. Disponível em: [https://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2018/01/relatorio-mensal-de-atividades\\_dezembro\\_v02.pdf](https://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2018/01/relatorio-mensal-de-atividades_dezembro_v02.pdf). Acesso em: 20 mar. 2023.

FUNDAÇÃO RENOVA. **Relatório Anual de Atividades**. 2018. Disponível em: <https://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2019/01/renovaanual-1.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2023.

FUNDAÇÃO RENOVA. **Relatório Anual de Atividades**. 2019. Disponível em: [https://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2020/01/pmorl01200cifanual\\_200117.pdf](https://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2020/01/pmorl01200cifanual_200117.pdf). Acesso em: 20 mar. 2023.

FUNDAÇÃO RENOVA. **Relatório Anual de Atividades**. 2020. Disponível em: [https://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2021/01/relatorio\\_anual\\_de\\_atividades\\_2021ref.2020.pdf](https://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2021/01/relatorio_anual_de_atividades_2021ref.2020.pdf). Acesso em: 20 mar. 2023.

FUNDAÇÃO RENOVA. Relatório De Impacto Ambiental – RIMA. **Regularização Ambiental das Obras de Dragagem e Disposição de Rejeitos na Fazenda Floresta e Recuperação das Margens e Setores da área denominada como Trecho 12** (Área do reservatório da UHE Risoleta Neves). 2020.

FUNDAÇÃO RENOVA. **Relatório Anual de Atividades**. 2021. Disponível em: <https://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2022/02/doc.-01-relatorio-anual-de-atividades-2022-ref.-2021.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2023.

FUNDAÇÃO RENOVA. **Atualização do Volume 10: Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito nos Trechos 13 e 14**. 2021. Fornecido pela Fundação Renova mediante solicitação.

FUNDAÇÃO RENOVA. **Relatório Anual de Atividades**. 2022. Disponível em: <https://www.fundacaorenova.org/relatorios-anuais/>. Acesso em: 20 mar. 2023.

FUNDAÇÃO RENOVA. **Relatório Anual de Atividades**. 2023. Disponível em: <https://www.fundacaorenova.org/relatorios-anuais/>. Acesso em: 03 fev. 2024.

FUNDAÇÃO RENOVA. **Volume 1. Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito no Trecho 8 – Revisão 0**. 2017. Fornecido pela Fundação Renova mediante solicitação.

FUNDAÇÃO RENOVA. **Volume 11 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito no Trecho 15 – Revisão 02**. 2022a. Fornecido pela Fundação Renova mediante solicitação.

FUNDAÇÃO RENOVA. **Volume 12 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito no Trecho 16 – Revisão 02**. 2022b. Fornecido pela Fundação Renova mediante solicitação.

FUNDAÇÃO RENOVA. **Volume 2 - Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito nos Trechos 6 e 7 – Revisão 01**. 2018c. Fornecido pela Fundação Renova mediante solicitação.

FUNDAÇÃO RENOVA. **Volume 3 - Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito nos Trechos 1 ao 4**. 2018a. Fornecido pela Fundação Renova mediante solicitação.

FUNDAÇÃO RENOVA. **Volume 4 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito no Trecho 9 – Revisão 01**. 2018b. Fornecido pela Fundação Renova mediante solicitação.

FUNDAÇÃO RENOVA. **Volume 5 - Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito nos Trechos 10 e 11 – Revisão 01**. 2018d. Fornecido pela Fundação Renova mediante solicitação.

GONÇALVES, V. D.; S. FERNANDES, C. V. Interação água-sedimento e sua importância para o entendimento dos processos de poluição: estudo de caso seção fluvial do rio Iguaçu, Bacia do Alto Iguaçu. **Ambiência**, v. 13, n. 3, 2017.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Pedologia**. Coleção Manuais Técnicos em Geociências. Vol. 4. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa Pedológico - Base Dados Espacial**. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/15829-solos.html>.

JACOMINE, P. K. T. et al. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Boletim Técnico n. 60. **Levantamento exploratório – Reconhecimento de Solos do Norte de Minas Gerais (Área de Atuação da SUDENE)**. Recife: EMBRAPA, 1979.

KRISHNAPPAN, Bomman G. Modelling cohesive sediment transport in rivers. **IAHS Publication (International Association of Hydrological Sciences)**, n. 263, p. 269-276, 2000.

KUMAR, S.; MISHRA, A. Critical Erosion Area Identification Based on Hydrological Response Unit Level for Effective Sedimentation Control in a River Basin. **Water Resources Management**, v. 29, n. 6, p. 1749–1765, 2015.

LINDEN, Ricardo. **Algoritmos genéticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2012. xx, 475 p.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento.** 2002. 152 f. Tese (Doutorado em Agricultura) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MARCHIORO, E. **Modelagem hidrossedimentológica na bacia do córrego Santa Maria: Subsídios à aplicação de práticas de conservação de água e solo no noroeste fluminense.** 2008. 189 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MORIASI, D. N. et al. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

MOTTA, P. E. F.; BARUQUI, A. M.; SANTOS, H. G. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento – 44. **Levantamento de Reconhecimento de Média Intensidade dos Solos da Região do Alto Paraíba, Minas Gerais.** Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2004.

NEITSCH, S. L. **Soil and Water Assessment Tool – Theoretical Documentation.** Temple, Texas: Texas Water Resources Institute, 2005.

PAIVA, M. H. R de et al. **Simulação e calibração do modelo hidrológico MGB-IPH para as sub-bacias hidrográficas do rio Piranga e Piracicaba – MG.** In: Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica, 1, 2022, Ouro Preto. *Anais eletrônicos [...]*. Ouro Preto: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2022.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. **Journal of Hydrology**, v. 406, n. 3–4, p. 170–181, 2011.

PANOSO, L. A. (Coord.). Boletim Técnico n. 45. **Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Espírito Santo.** Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1978.

PANOSO, L. A. (Coord.). Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Boletim Técnico n. 76. **Levantamento Semidetalhado de Solos de Solos da Área do Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Leite, Coronel Pacheco, MG.** Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1980.

PFAFSTETTER, O. **Classificação de bacias hidrográficas: metodologia de codificação.** Rio de Janeiro: DNOS, 1989.

QUARESMA, V. S. et al., 2020. The effects of a tailing dam failure on the sedimentation of eastern Brazilian inner shelf. **Continental Shelf Research**. 205 (2020) 104172.

RRDM, Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual do PMBA/Fest-RRDM – Ambiente Dulcícola. RT-39B, **Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática**, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 613 p. 2022.



RRDM, Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual e Anexo 3 Dulcícola. Relatório Técnico RT-18C, **Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática**. Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 2019b.

RRDM. Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual e Anexo 3 Marinho e Sedimentologia. Relatório Técnico RT-19C, **Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática**. Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 2019a.

SILVA, R. L. da; PASSOS, C. J. S. **Controle de sedimentos em rios e reservatórios**. In: **Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**, XV, 2022, Campo Grande. *Anais eletrônicos* [...]. Campo Grande: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2022.

SIQUEIRA, V. A. et al. IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an open- source environment. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 274–287, 2016.

SPERLING, Marcos von. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. Belo Horizonte: UFMG, 2007. 588 p., il. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 7). Inclui bibliografia. ISBN 85-88556-07-2.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Abastecimento de água**. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Acesso em: 17 abr. 2024., 2004.

VERGASTA, L. A. et al. Avaliação do Balanço de água na Bacia do Rio Madeira Simulado Pelo Modelo Regional Climático Eta e o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias MGB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 2, p. 153–169, 2021.

VIAROLI, P. et al., 2018. Space and time variations of watershed N and P budgets and their relationships with reactive N and P loadings in a heavily impacted river basin (Po river, Northern Italy). **Science of the Total Environment**. 639 (2018) 1574–1587.

WILLIAMS, J. **Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor**. Oxford, 1975.

YANG, C. T. Unit Stream Power Equation for Gravel. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 110, n. 12, p. 1783–1797, 1984.