



INFLUÊNCIA DA TRANSPOSIÇÃO DE BACIAS DO PARAÍBA DO  
SUL-PIRAÍ-GUANDU NA DESCARGA DE SÓLIDOS SUSPENSOS PARA A  
BAIA DE SEPETIBA

Marcelo Di Lello Jordão

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Oceânica.

Orientador: Susana Beatriz Vinzon

Rio de Janeiro  
Junho de 2017

INFLUÊNCIA DA TRANSPOSIÇÃO DE BACIAS DO PARAÍBA DO  
SUL-PIRAÍ-GUANDU NA DESCARGA DE SÓLIDOS SUSPENSOS PARA A  
BAIA DE SEPETIBA

Marcelo Di Lello Jordão

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

---

Profa. Susana Beatriz Vinzon, D.Sc.

---

Prof. Marcos Nicolás Gallo, D.Sc

---

Prof. José Paulo Soares de Azevedo, Ph.D.

---

Profa. Mônica dos Santos Marçal, D.Sc.

---

Profa. Valéria da Silva Quaresma, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
JUNHO DE 2017

Jordão, Marcelo Di Lello

Influência da Transposição de Bacias do Paraíba do Sul-Piraí-Guandu na Descarga de Sólidos Suspensos para a Baía de Sepetiba/Marcelo Di Lello Jordão. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XXXIX, 255 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Susana Beatriz Vinzon

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Oceânica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 243 – 255.

1. descarga sólida em suspensão. 2. transposição de bacias. 3. rio Paraíba do Sul. 4. rio Guandu. 5. baía de Sepetiba. I. Vinzon, Susana Beatriz. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

*A Livi Faro.*



# Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a orientadora Prof. Dra. Susana B. Vinzon pela orientação e incentivo durante essa jornada. Ao Prof. Dr. Marcos Gallo pelos valiosos apontamentos e apoio para o campo. Aos demais membros da banca, Profa. PhD. Valéria Quaresma, Dra. Mônica Marçal e Prof. Dr. José Paulo Azevedo pelas preciosas contribuições. Aos Observadores de bacias pela inestimável ajuda na coleta diária das amostras. Ao Prof. Dr. Geraldo Wilson pelas críticas e sugestões. Ao Prof. Paulo Cesar Rosman e Maurício Molisani pelas contribuições na fase da qualificação. Aos colegas Raíssa Celina, Gabriela Aschi, Douglas Nemes, Lucas Chiabi, Francisco, Priscila Lopes, Iranilson Silva, Ernesto Molina, Raphaela Paiva, Sarah Rodrigues, Assis, Henrique Pereira, Felipe Amorim e Theodósio Nzualo pela solidária ajuda nos trabalhos de campo, laboratório e técnicas analíticas. À Raíssa Celina pelo frequente apoio nas campanhas de campo, nas ótimas fotografias e na comunicação com a comunidade local. Ao suporte essencial da Cristina e Marise nos desembaraços burocráticos e ao Jorge na organização do espaço de trabalho. À equipe do Inea, Edson e Larissa, na disponibilização de dados. Ao Nelson Reis pelas orientações e incentivos durante a participação no comitê de bacias. À minha amada esposa Livi Faro sempre ao meu lado e iluminar meu caminho. Aos meus pais, Márcio Jordão e Criseide Jordão, e a minha irmã Carolina Jordão por todo suporte e paciência. Aos pais da minha esposa, Dolores Ferreira e Paulo Faro. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado nos dois primeiros anos e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pela bolsa nos anos seguintes e pelo financiamento parcial dos custos do trabalho de campo através do projeto APQ1-2012/2: Estudo observacional dos efeitos da Transposição rio Paraíba do Sul – rio Guandu sobre a turbidez e aporte de sedimento fino na bacia do rio Guandu e baía de Sepetiba.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

INFLUÊNCIA DA TRANSPOSIÇÃO DE BACIAS DO PARAÍBA DO  
SUL-PIRAÍ-GUANDU NA DESCARGA DE SÓLIDOS SUSPENSOS PARA A  
BAIA DE SEPETIBA

Marcelo Di Lello Jordão

Junho/2017

Orientador: Susana Beatriz Vinzon

Programa: Engenharia Oceânica

Apresenta-se, nesta tese, um estudo sobre as repostas morfológicas e sobre a descarga de sólidos suspensos do rio Guandu, devido à transposição de bacias Paraíba do Sul-Piraí-Guandu. A primeira parte abordou a evolução morfológica do rio Guandu e do seu delta. A metodologia aplicada nessa parte envolveu visitas de campo e a construção de um acervo cartográfico, de imagens e relatórios. A bacia do Guandu chegou a ter sete configurações diferentes, entre 1729 e 2010. O aumento abrupto da vazão, devido à transposição, resultou na erosão do trecho a jusante, na redução da sua declividade e no aumento da profundidade média. Essa erosão sustentou o rápido crescimento do delta. A segunda parte buscou avaliar o impacto da transposição em termos da descarga anual de sólidos suspensos. A estimativa da descarga de sólidos suspensos foi obtida a partir do monitoramento de 11 estações instaladas ao longo da transposição e dos rios Guandu e Guandu Mirim, entre os anos hidrológicos de 2014 e 2016. A eficiência de retenção do conjunto de reservatórios da transposição foi de 59% durante o ano seco e, 62% no ano seguinte. Os reservatórios de Lajes e Vigário foram os principais responsáveis pela retenção dos sólidos suspensos. A estimativa da descarga de sólidos em suspensão que chegou no canal de São Francisco foi de  $26.446 \pm 20.761$  t para um ano seco e de  $90.337 \pm 16.318$  t para um ano típico. A transposição foi responsável por cerca de 40% da descarga anual no ano típico e 71% no ano seco. A estação de tratamento de água foi responsável pela transposição de  $38.687 \pm 9.340$  t para um ano típico e  $16.483 \pm 13.243$  t para um ano seco. Esse estudo concluiu que o canal Guandu é, atualmente, a principal foz por onde chegam os sólidos suspensos na baía de Sepetiba.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

## IMPACT OF THE PARAÍBA DO SUL-PIRAÍ-GUANDU INTER-BASIN ON SUSPENDED SEDIMENT LOAD TO SEPETIBA BAY

Marcelo Di Lello Jordão

June/2017

Advisor: Susana Beatriz Vinzon

Department: Ocean Engineering

In this thesis, a study on the morphological responses and wash load discharge from the Guandu River due to the Paraíba do Sul-Piraí-Guandu basins transposition is presented. The first part described the morphological evolution of the Guandu River and its delta. The methodology applied in this part involved field visits and the construction of a cartographic collection, images and reports. The Guandu basin had seven different configurations between 1729 and 2010. The abrupt increase in flow due to transposition resulted in the downstream erosion, the decreased of its slope and the increase in the mean depth. This erosion sustained the rapid growth of the delta. The second part described the impact of transposition in terms of the annual wash load discharge. The wash load discharge estimation was obtained from the monitoring of 11 stations installed along the transposition and the Guandu and Guandu Mirim Rivers between the hydrological years of 2014 and 2016. The transposition system trap efficiency was 59% during the dry year and 62% the during typical year. The Lajes and Vigário reservoirs were the main responsible for the suspended sediment retention. The São Francisco Channel wash load discharge was  $26,446 \pm 20,761$  t to the dry year and  $90,337 \pm 16,318$  t to the typical year. The transposition accounted for about 40% of the annual discharge in the typical year and 71% in the year of dry year. The water treatment plant was responsible for the transposition of  $38,687 \pm 9,340$  t to the typical year and  $16,483 \pm 13,243$  t to the dry year. This study concluded that, nowadays, the Guandu Channel is the main source of suspended sediment to the Sepetiba Bay.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xxix</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xxxiv</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xxxviii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo . . . . .	3
1.2 Organização da tese . . . . .	3
<b>2 Mudanças no domínio da bacia e na morfologia do rio Guandu</b>	<b>5</b>
2.1 Introdução . . . . .	5
2.2 Área de estudo . . . . .	7
2.3 Material e Métodos . . . . .	7
2.4 Aspectos geológicos e geomorfológicos . . . . .	12
2.5 Climatologia . . . . .	14
2.6 Solo e Cobertura vegetal primária . . . . .	15
2.7 Hidrografia original . . . . .	17
2.7.1 Bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul . . . . .	19
2.7.2 Bacia hidrográfica do rio Pirai . . . . .	19
2.7.3 Bacia hidrográfica do rio Guandu . . . . .	24
2.8 Margem noroeste da baía de Sepetiba . . . . .	26
2.9 Uso do solo . . . . .	29
2.9.1 Desmatamentos e atividade agropecuária . . . . .	30
2.9.2 Urbanização . . . . .	33
2.9.3 Perda de solo na bacia do Guandu . . . . .	35
2.9.4 Deslizamentos e chuvas extremas de janeiro de 1967 . . . . .	36
2.10 Intervenções hidráulicas . . . . .	38
2.10.1 Regularização de canais e vazão para controle de cheias . . . . .	38
2.10.2 Barragens e transposições de bacias para uso hidroelétrico . . . . .	44

2.10.3	Barragens e transposição de bacias para abastecimento público	50
2.10.4	Transposições para uso termoelétrico	55
2.11	Entrada de sólidos em suspensão por efluentes doméstico	55
2.12	Mineração do leito do canal para construção civil	56
2.13	Dragagens para operações portuárias	56
2.14	Variação do domínio da bacia do rio Guandu devido às intervenções antrópicas	57
2.15	Resposta morfológica do rio Guandu às intervenções antrópicas	59
2.16	Conclusões	70
<b>3</b>	<b>Operação dos múltiplos usuários e a crise hídrica</b>	<b>72</b>
3.1	Introdução	72
3.2	Sistema hidroenergético a montante da UEL Sta. Cecília	72
3.3	Sistema de transposição de bacias Paraíba do Sul - Pirai - Guandu	74
3.4	Usuários a jusante da UHE Pereira Passos	80
3.4.1	Setor hidroenergético	81
3.4.2	Abastecimento público	82
3.5	Mudanças operativas devido à crise hídrica	86
3.5.1	Nova regra operativa pós crise hídrica	92
3.5.2	Futura transposição para o Sistema Cantareira	94
<b>4</b>	<b>Coleta de dados e calibragem</b>	<b>96</b>
4.1	Introdução	96
4.2	Materiais e métodos	98
4.3	Classificação dos dois anos hidrológicos monitorados	98
4.3.1	Estimativa da incerteza	100
4.3.2	Critérios para escolha das estações hidrossedimentométricas	100
4.3.3	Observadores(as) de bacias	101
4.3.4	Coleta e extração da concentração de sólidos suspensos, fixos e voláteis	101
4.3.5	Granulometria	106
4.3.6	Vazão	106
4.4	Localização e descrição das estações hidrossedimentométricas	110
4.4.1	Instalação e manutenção da sonda nas estações 6 e 9	114
4.5	Calibração	115
4.5.1	Incerteza na medição para CSS, CSV e CSF	115
4.5.2	Curva de calibração da relação CSS-turbidez	121
4.5.3	Curva de calibração da relação pressão-nível	121
4.5.4	Campanha de correntometria na estação 9	122
4.5.5	Curva-chave de vazão	126

<b>5</b>	<b>Estimativa da descarga anual de sólidos suspensos captada pela UEL Santa Cecília</b>	<b>130</b>
5.1	Introdução . . . . .	130
5.2	Seleção e coleta de dados . . . . .	133
5.2.1	Seleção das variáveis . . . . .	133
5.2.2	Materiais e Métodos . . . . .	136
5.2.3	Vazão natural média diária ( $Q_N$ ) . . . . .	136
5.2.4	Modelo de imputação de dados faltantes na série de CSS . . .	136
5.2.5	Estatística de avaliação e validação . . . . .	137
5.2.6	Cálculo da descarga anual de sólidos suspensos ( $Q_{ss}$ ) . . . . .	139
5.3	Pré-processamento . . . . .	139
5.3.1	Tratamento da série de CSS . . . . .	139
5.3.2	Tratamento da série de precipitação . . . . .	142
5.3.3	Tratamento da série de vazão . . . . .	143
5.4	Modelo de imputação de dados de CSS . . . . .	148
5.5	Estimativas das descargas anuais de sólidos em suspensão bombeadas pela UEL Sta. Cecília . . . . .	154
5.6	Discussão . . . . .	155
5.7	Conclusão . . . . .	159
<b>6</b>	<b>Estimativa da eficiência de retenção de sólidos suspensos no sistema de múltiplos reservatórios da transposição</b>	<b>161</b>
6.1	Introdução . . . . .	161
6.2	Objetivo . . . . .	163
6.3	Seleção e coleta de dados . . . . .	163
6.3.1	Seleção das variáveis . . . . .	163
6.4	Materiais e Métodos . . . . .	165
6.4.1	Cálculo de eficiência (ER) para imputação de dados faltantes na série de CSS . . . . .	165
6.5	Pré-processamento . . . . .	165
6.5.1	Série de vazão média diária . . . . .	165
6.5.2	Série de concentração de sólidos suspensos . . . . .	169
6.6	Resultado . . . . .	184
6.6.1	Granulometria . . . . .	184
6.6.2	Descrição sedimentológica do TPPG . . . . .	189
6.6.3	Impacto da operação horária da UHE Pereira Passos na CSS .	192
6.6.4	Estimativa da descarga anual de sólidos suspensos e eficiência de retenção da TPPG . . . . .	193
6.6.5	Discussão . . . . .	199

6.7	Conclusões . . . . .	204
<b>7</b>	<b>Estimativa da descarga de sólidos suspensos afluente ao canal de São Francisco</b>	<b>205</b>
7.1	Introdução . . . . .	205
7.2	Objetivo . . . . .	205
7.3	Seleção e coleta de dados . . . . .	206
7.4	Pré-processamento . . . . .	206
7.4.1	Série de vazão média horária . . . . .	206
7.4.2	Série de concentração de sólidos suspensos . . . . .	209
7.5	Resultado . . . . .	220
7.5.1	Lançamento da ETA-Guandu, no rio Capenga, na sub-bacia do Guandu Mirim . . . . .	220
7.5.2	Granulometria . . . . .	221
7.5.3	Caracterização dos sólidos suspensos no trecho da bacia Guandu a jusante da UHE Pereira Passos . . . . .	225
7.5.4	Descarga anual de sólidos suspensos a jusante da UHE Pereira Passos . . . . .	231
7.6	Discussão . . . . .	238
7.7	Conclusões . . . . .	240
<b>8</b>	<b>Sumário de conclusões e recomendações</b>	<b>241</b>
8.1	Conclusões . . . . .	241
8.2	Recomendações . . . . .	242
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>243</b>

# Lista de Figuras

2.1	Mapa da área de estudo. . . . .	8
2.2	Série de vazão média diária a jusante da UHE Pereira Passos extraído da ONS e série de concentração sólidos suspensos totais a jusante de Pereira Passos (LG350), a jusante da ETA Guandu (GN200) e no rio Guandu Mirim (GM180). . . . .	10
2.3	Diagrama unifilar do trecho inferior do rio Guandu nos dias de hoje mostrando as estações de monitoramento de sólidos totais em suspensão: TPPG - transposição de bacias Paraíba do Sul-Piraí-Guandu; UTE - usina termoeletrica; ETA - estação de tratamento de água; LG350, GN200, GM180 - Estações de monitoramento de sólidos totais em suspensão do INEA. . . . .	12
2.4	Mapa geológico da bacia Paraíba do Sul até UEL Sta. Cecília. . . . .	13
2.5	Mapa geológico da bacia do Guandu. . . . .	14
2.6	Sistema de <i>rifts</i> cenozoicos do sudeste brasileiro: (A) <i>Rift</i> Paraíba do Sul; (B) <i>Rift</i> litorâneo; (C) <i>Rift</i> da Ribeira; e (D) <i>Rift</i> da marítimo (Extraído de ZALÁN e OLIVEIRA (2005). . . . .	15
2.7	Mapa topográfico da bacia Paraíba do Sul até UEL Sta. Cecília. . . . .	16
2.8	Mapa topográfico da bacia do Guandu. . . . .	16
2.9	Perfil estratigráfico da formação sedimentar Piranema (SONDOTECNICA, 2006). O triângulo invertido representa a altura do lençol freático. . . . .	17
2.10	Climograma dos trechos alto e baixo da bacia do Paraíba do Sul. . . . .	17
2.11	Climograma dos trechos alto e baixo da bacia do Guandu. . . . .	18
2.12	Mapa pluviométrico da bacia Paraíba do Sul até UEL Sta. Cecília. A isoietas representa a precipitação média acumulada anual para o período de 1977 a 2006. . . . .	18
2.13	Mapa pluviométrico da bacia do Guandu. A isoietas representa a precipitação média acumulada anual para o período de 1977 a 2006. . . . .	19



2.14	Precipitação mensal e anomalia de precipitação (mm) para janeiro 2010. As anomalias são desvios das médias mensais em relação à climatologia do INMET (1961 a 1990) (fonte: CPTEC/INPE). . . . .	21
2.15	Mapa pedológico da bacia Paraíba do Sul até UEL Sta. Cecília. . . . .	21
2.16	Mapa pedológico da bacia do Guandu. . . . .	22
2.17	Mapa da vegetação primária da bacia do Paraíba do Sul até UEL Sta. Cecília. . . . .	22
2.18	Mapa da vegetação primária da bacia do rio Guandu. . . . .	23
2.19	Hidrografia da bacia do Paraíba do Sul até UEL Sta. Cecília. . . . .	23
2.20	Hidrografia original da bacia do rio Guandu (extraído de PENHA (1830)). . . . .	26
2.21	Hidrografia original da bacia do rio Guandu. . . . .	27
2.22	Hidrografia detalhando o encontro dos rios Guandu, Itaguahy e Guandu Mirim antes de 1729. . . . .	27
2.23	Variação temporal da largura média dos rios e canais que formam o trecho baixo do rio Guandu. . . . .	28
2.24	Mapa textural da fundo da baía de Sepetiba. Em vermelho a argila, em azul o silte e em amarelo a areia. Extraído de FEEMA (1998). . . . .	28
2.25	Mapa batimétrico da margem noroeste da baía de Sepetiba, baseado no mapa de MOUCHEZ (1868). A-B é a seção batimétrica para comparação em perfil. . . . .	29
2.26	Mapa da vegetação remanescente e uso do solo na bacia do Paraíba do Sul até UEL Sta. Cecília. . . . .	30
2.27	Mapa da vegetação remanescente e uso do solo na bacia original do Guandu. . . . .	31
2.28	Escravos na colheita de café em uma colina no vale do Paraíba. Foto tirada por Marc Ferrez em 1882, acervo do Instituto Moreira Salles (IMS): <a href="http://www.ims.com.br/ims/explore/artista/marc-ferrez/obras">http://www.ims.com.br/ims/explore/artista/marc-ferrez/obras</a> . . . . .	32
2.29	Concentração de voçorocas em um vale de drenagem afluente direto do rio Barra Mansa, bacia do médio Paraíba do Sul, Município de Barra Mansa, RJ (extraído de SILVA (2013)). . . . .	32
2.30	Foto dos laranjais plantados em colinas no município de Queimados. Foto tirada por Hildebrando A. Góes em 1941 (GÓES, 1942). . . . .	33
2.31	Concentração de ravinas degradando um corte da estrada RJ 127 em uma área de pastagens abandonadas, a cerca de 200 m da ponte que cruza o rio Guandu no município de Paracambi - RJ. Foto tirada em 16/06/2015. . . . .	34

2.32	Gráfico do número de habitantes na bacia do Guandu entre 1940 e 2010. Percentual de participação de cada município foi extraído de SONDOTECNICA (2006). Censo 1940 - 2000: CARNEIRO (2001). Censo 2010: <a href="http://cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php">http://cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php</a> . . . . .	34
2.33	Evento de movimento de massa em uma encosta ocupada por residências próximo ao reservatório de Santana em 15/01/16, no município de Piraí - RJ. Foto extraída do Jornal Diário do Vale do dia 16/01/16. . . . .	35
2.34	Mapa da perda de solo na bacia original do Guandu. . . . .	36
2.35	Vale do ribeirão da Floresta, tributário do ribeirão da Lajes, após os deslizamentos na serra da Araras em 1967 (foto acima) (extraído de JONES (1973)) e no dias de hoje (foto abaixo) (extraído do Google Earth). . . . .	37
2.36	Saída da UHE Fontes Nova (foto superior) e reservatório de Ponte Coberta (foto abaixo) após a catástrofe natural da serra da Araras de 1967 (extraído de JONES (1973)). . . . .	39
2.37	Hidrografia detalhando o sistema de regulação e drenagem jesuítica que existiu entre 1729 e 1928. . . . .	40
2.38	Detalhe em escala (altura da pessoa = 1,65 m) dos arcos da ponte dos jesuítas do lado jusante e vista a montante da ponte ao lado do rio Guandu mirim. Fotos tiradas em 08/03/2016. . . . .	41
2.39	Imagem de satélite mostrando a antiga vala de S. Francisco (1729-1935) construída pelos jesuítas e o atual canal de S. Francisco (1935-2016). . . . .	41
2.40	Detalhe dos canais logo à montante da ponte dos jesuítas. Imagem de 2009 do Google Earth <sup>®</sup> . . . . .	42
2.41	Hidrografia detalhando os canais criado pelas comissões de saneamento entre 1928 e 1935, que ligavam os principais rios formadores do baixo Guandu. . . . .	43
2.42	Hidrografia detalhando os canais que ligavam os principais rios formadores do baixo Guandu entre 1936 e 1941 (GÓES, 1942). . . . .	46
2.43	Detalhe do antigo e meandrante rio Guandu e seu atual substituto, o canal do Guandu criado em 1930. Imagem de 2009 do Google Earth. . . . .	46
2.44	Diagrama unifilar do sistema hidroelétrico da bacia rio Guandu entre 1908 e 1912. . . . .	47
2.45	Caption for LOF . . . . .	47
2.46	Diagrama unifilar do sistema hidroelétrico da transposição de bacias Piraí-Guandu entre 1913 e 1952 . . . . .	48
2.47	Descarga líquida do canal São Francisco ao longo do tempo. . . . .	49

2.48	Diagrama unifilar do sistema hidroelétrico da transposição de bacias Paraíba do Sul-Piraí-Guandu entre 1953 e 2016. . . . .	49
2.49	Ponte da antiga Estrada de Ferro Central do Brasil (E.F.C.B.) que cruza o canal de S. Francisco. A foto, tirada em 1941 por Hildebrando de A. Goes, mostra o canal de S. Francisco confinado pelo vão da ponte, com aproximadamente 25 m de largura (GÓES, 1942). A segunda foto, tirada em 27/11/2014, mostra o atualmente canal de S. Francisco extravasando o vão da ponte, chegando a ter mais de 60 m de largura em condição típica. . . . .	50
2.50	Fotografias das primeiras transposições da bacia do Guandu: (a) adutora de rio S. Pedro e estrada de ferro usada para construção da adutora do rio D'Ouro, (b) reservatório de Pedregulho, (c) reservatório do rio D'Ouro, (d) ponte aqueduto dos rios D'Ouro e Sto. Antônio. Fotos tirada por Marc Ferrez entre 1879 e 1889 (extraído de RITTA (2009)). . . . .	51
2.51	Mapa dos mananciais explorados pelo Rio de Janeiro em 1965 (Extraído de SONDOTECNICA (2006)). . . . .	52
2.52	Esquema geral da ETA-Guandu entre os anos de 1955 e 1963. . . . .	53
2.53	Foto sem datação da construção da barragem para captação da ETA-Guandu, concluída em 1965. Foto extraído de RITTA (2009). . . . .	53
2.54	Esquema geral da ETA-Guandu entre os anos de 1965 e 1974. . . . .	54
2.55	Esquema geral da ETA-Guandu atual. . . . .	54
2.56	Hidrografia detalhando os canais que ligam os principais rios que formam o baixo Guandu entre 1950 e 2016 (IMUPP, 2007). . . . .	55
2.57	Perfil longitudinal da elevação do leito e do nível água do rio Guandu e a localização dos principais pontos antrópicos de entrada e saída de sedimento e água. . . . .	57
2.58	Região dragada do canal de acesso e bota-fora do porto de Itaguaí (EIA/RIMA n° 82, 1997 <i>apud</i> MONTEZUMA (2007)) . . . . .	58
2.59	As diferentes configurações no domínio da bacia do rio Guandu. . . . .	59
2.60	Mapa batimétrico da margem noroeste da baía de Sepetiba de 1935 (DHN, 1935), na qual a linha A-B representa o perfil vertical. . . . .	60
2.61	Mapa batimétrico da margem noroeste da baía de Sepetiba de 1999 (DHN, 1999)na qual a linha A-B representa o perfil vertical. . . . .	61
2.62	Mapa batimétrico da diferença entre das cartas náuticas da margem noroeste da baía de Sepetiba de 1935 e 1999 (DHN, 1935, 1999). . . . .	62
2.63	Perfil batimétrico do leito marinho entre os ponto A-B referentes as cartas náuticas de 1935 e 1999, onde o ponto A é a origem. . . . .	62

2.64	Descarga sólida de lavagem, de fundo e total no canal de São Francisco antes e imediatamente depois da transposição e mais recentemente. . . . .	63
2.65	Resposta de longo termo do canal de São Francisco devido ao incremento da vazão média pela TPPG. . . . .	64
2.66	Mudança na composição do sedimento das praias adjacentes ao longo do tempo: (a) Foto da praia de Sepetiba, que pelas roupas de praia, estima-se ser da déc. 30 a 50; (b) Foto da praia de Sta. Luzia, que pelos modelos de carros, estima-se ser da déc. 60; (c) Foto da praia de Sepetiba, que pela roupa de praia, estima-se ter ser da déc. 80 a 90; (d) Foto da praia de Sepetiba onde três salva-vidas resgatam um leão marinho encalhado no dia 19/01/2013. . . . .	66
2.67	Imagens do <i>Google Earth</i> mostrando as mudança na composição do sedimento da praia e depois da obra de reabilitação ambiental: (a) localização da praia de Sepetiba (1) e Sta. Luzia (2) em relação as fozes do canal de Itá (3), Guandu (3), S. Francisco (4) e rio da Guarda (5); (b) Praia de Sepetiba antes da obra; (c) Praia de Sepetiba com a obra recém concluída; (d) Praia de Sepetiba três anos depois da conclusão da obra. . . . .	67
2.68	Fotos da visita de campo à praia de Sepetiba em 30/10/13: (a) Foto mostrando a aparência da areia original utilizada na reabilitação ambiental; (b) Foto mostrando a composição arenosa escurecida pela mistura com sedimento fino e início de recolonização por mangue. . . . .	67
2.69	Mapa sobrepondo diferentes linhas de costa de 1935 (DHN, 1935), 1975 (Aerofotograma da FUNDREM 1975 (1:40000)) e imagens do landsat entre 1985 e 2016 (Google Earth Engine) e as isóbatas de -1 m de 1935 (DHN, 1935) e 1999 (DHN, 1999). . . . .	68
2.70	Localização da foz do rio Paraíba do Sul, os reservatórios e o hidrograma de vazão média anual da estação fluviométrica de Campos (extraído de LEME <i>et al.</i> (2015)) . . . . .	69
2.71	Mudanças na morfologia da foz do rio Paraíba do Sul em Atafona, São João da Barra (RJ): A - foto da cidade de Atafona de 1961 (fonte: DNOS); B - foto de Atafona em 2003 (fonte: IBAMA) com partes da cidade já destruída pela erosão costeira; C - comparação de mapas de 1954 e 2004, onde a área contornada de vermelho representa a retroprogradação da linha de costa e em laranja a progradação (extraído de RIBEIRO <i>et al.</i> (2004)) . . . . .	70
3.1	Diagrama unifilar do sistema hidroelétrico do rio Paraíba do sul a montante da UEL Sta. Cecília ilustrando a resolução ANA nº 211. . . . .	75

3.2	Diagrama unifilar do sistema de transposição de bacias Paraíba do Sul-Piraí-Guandu. . . . .	77
3.3	Mapa esquemático das cotas (m) do sistema de transposição de bacias Paraíba do Sul-Piraí-Guandu. . . . .	78
3.4	(a) Barragem de Tocos, foto tirada em 1914 (extraído de CBDB (2011)). (b) Entrada do túnel de Tocos, foto tirada em 2011 (extraído de SEA-PROJECTS (2011)). (c) Detalhe das 4 comportadas da entrada do túnel de Tocos, foto tirada em 2011 (extraído de SEA-PROJECTS (2011)). (d) Desembocadura do túnel de Tocos, foto tirada em 1914 (extraído de CBDB (2011)). . . . .	78
3.5	Barragem de Santana em 1953 e em 2014, esta última já visivelmente assoreado (extraído de FERREIRA e R.O. (2014)) . . . . .	79
3.6	Detalhamento da lagoa e tomada da ETA-Guandu . . . . .	82
3.7	Detalhamento da parte de tratamento da água da ETA-Guandu . . . . .	83
3.8	Precipitação mensal (mm) e anomalia de precipitação (mm) para janeiro 2015. As anomalias são desvios das médias mensais em relação à climatologia do INMET (1961 a 1990) (fonte: CPTEC/INPE). . . . .	87
3.9	Descrição estatística da vazão natural que passou em UEL Sta. Cecília entre 1931 e 2015. Comparação com os eventos de escassez hídrica dos anos de 2003, 2014 e 2015. Fonte: ONS (2015) . . . . .	89
3.10	Reservatório de Paraíbauna durante a estiagem de 2014/15. Faixa sem vegetação delimitando a área originalmente inundada em condições normais. Foto tirada em 04 de agosto de 2015 por José Gabriel ( <i>Greenpeace</i> ). . . . .	89
3.11	Descrição estatística do volume útil dos reservatórios de Paraíbauna e Santa Branca entre 2001 e 2015. Comparação com os eventos de escassez hídrica dos anos de 2003-2004 e 2014-2015. Fonte: ONS-IPDO . . . . .	90
3.12	Descrição estatística do volume útil dos reservatórios de Jaguari e Funil entre 2001 e 2015. Comparação com os eventos de escassez hídrica dos anos de 2003-2004 e 2014-2015. Fonte: ONS-IPDO . . . . .	91
3.13	Detalhamento da soleira submersa construída no canal de S. Francisco. . . . .	92
3.14	Precipitação mensal (mm) e anomalia de precipitação (mm) para janeiro 2016. As anomalias são desvios das médias mensais em relação à climatologia do INMET (1961 a 1990) (fonte: CPTEC/INPE). . . . .	93
4.1	Fluxograma geral das etapas necessárias para estimar a descarga de sólidos suspensos ( $Q_{ss}$ ). . . . .	97
4.2	Fluxograma geral da coleta de dados. . . . .	98

4.3	Formas de coleta das amostras de água. Coleta no meio do rio com ajuda de nadadeiras e colete salva-vidas (foto a esquerda), rio Guandu - estação 6. Coleta direta no meio do rio pelas pedras (foto do centro), rio Piraí - estação 2. Coleta no meio do canal com balde e corda pela ponte (foto a direita), tomada do UEL Vigário - estação 3. . . . .	102
4.4	Metodologia para análise das amostras de água. PF: peso do filtro, AS: peso da amostra seco, AV: peso da amostra calcinada. PSS: peso dos sólidos suspensos, PSF: peso dos sólidos fixos e PSV: peso dos sólidos voláteis. . . . .	104
4.5	Aparato para filtragem (a) e analisador de partículas Malvern (b) presentes no LDSC-UFRJ. . . . .	104
4.6	Aparato experimental para a calibração dos turbidímetros. . . . .	105
4.7	Coluna d'água graduada para simulação da variação de nível da água para teste do sensor de pressão da sonda RBR Duo: a foto da esquerda mostrando a leitura do nível e a foto da direita mostrando o aparato completo. . . . .	107
4.8	Descrição da metodologia e faixa de medição na seção de correntometria com ADCP no rio Guandu. . . . .	108
4.9	Localização das 11 estações hidrossedimentométricas (Est. xx). . . . .	110
4.10	Vista de cima da Estação 1: saída do túnel (estrutura de concreto) das águas da UEL Sta. Cecília para o reservatório de Santana. . . . .	111
4.11	Local de coleta: (a) Estação 2 junto à estação 58350001 no rio Piraí, (b) Estação 3 na tomada da UEL Vigário, (c) Estação 4 no Clube de Pesca Piraí no reservatório de Lajes, (d) Estação 5 no canal de engolimento do reservatório de Vigário. . . . .	112
4.12	Continuação das fotos das estações de coleta de água: estação 7 - ponte da RJ - 127 sobre o rio Guandu; estação 8 - ponte da BR-116 (Presidente Dutra) sobre o rio Guandu; estação 9 - margem esquerda do rio Guandu logo a jusante da ETA-Guandu; e estação 10 - ponte da BR-101 sobre o canal de S. Francisco. . . . .	113
4.13	Mergulho para fixação da sonda RBR Duo na estaca de caibro submersa: rib. das Lajes a jusante da UHE Pereira Passos, estação 6 e rio Guandu a jusante da ETA-Guandu, estação 9. Seta branca identificando o mergulhador. . . . .	115
4.14	Descrição dos postos hidrossedimentológicos e das cotas em relação aos níveis de referência (RNs) da estação 6, a jusante da UHE Pereira Passos, e da estação 9, a jusante da UTE Guandu. . . . .	115
4.15	Descrição dos pontos definidos como níveis de referência ba estação 6, a jusante da UHE Pereira Passos. . . . .	116

4.16	Descrição dos pontos definidos como níveis de referência na estação 9, a jusante da ETA-Guandu. . . . .	116
4.17	Foto tirada em 16/06/2015 mostrando a remoção de uma ilha de macrófitas flutuantes presa na estrutura de madeira que suportava a sonda RBR Duo na estação 9, a jusante da ETA-Guandu. . . . .	117
4.18	Sonda RBR Duo após 7 dias de monitoramento na estação 9 (esquerda) e após a limpeza (direita). . . . .	117
4.19	Curva turbidez-CSS, resíduo ( $e_{y1}$ , $e_{y2}$ ) e incerteza expandida ( $\varepsilon_{y2}$ ) do turbidímetro número 52546, estação 6, rib. das lajes, jusante da UHE Pereira Passos. . . . .	121
4.20	Curva-chave de turbidez, resíduo ( $e$ ) e incerteza expandida ( $\varepsilon_y$ ) do turbidímetro número 52545, estação 9, rio Guandu, jusante da ETA - Guandu. . . . .	122
4.21	Curva de calibração, resíduo e incerteza expandida do sensor de pressão número 52545, estação 9, rio Guandu, jusante da ETA - Guandu. . . . .	122
4.22	Curva de calibração, resíduo e incerteza expandida do sensor de pressão número 52546, estação 6, rio Rib. das lajes, jusante da UHE Pereira Passos. . . . .	123
4.23	Fixação do ADCP na balsa <i>Papillon</i> (foto à esquerda) e acomodação dos periféricos (bateria e computador) na caixa organizadora (foto à direita). . . . .	123
4.24	Campanhas de medição de vazão com ADCP. Medição utilizando apenas a balsa <i>Papillon</i> (foto à esquerda) e medição utilizando uma canoa apoiando a balsa <i>Papillon</i> (foto à direita). . . . .	124
4.25	Visualização gráfica da seção de correntometria realizadas na estação 9 nos dias 23/10/2014, 15/12/2014 e 17/12/2014. A seta em preto aponta para localização da sonda RBR duo. ME: margem esquerda; MD: margem direita. Medição do dia 23/10/2014 utilizou apenas a balsa <i>Papillon</i> e medição do 15/12/2014 e 17/12/2014 utilizou uma canoa apoiando a balsa <i>Papillon</i> . . . . .	125
4.26	Comparação entre a série de nível medida pela sonda RBR e a vazão disponibilizada pela Hidroweb na estação 6 . . . . .	127
4.27	Curva-chave de vazão, resíduo e incerteza expandida da estação 6, rio Rib. das lajes, jusante da UHE Pereira Passos. . . . .	128
4.28	Curva-chave de vazão, resíduo e incerteza expandida da estação 9, rio Guandu, jusante da ETA - Guandu. . . . .	128

4.29	Curva-chave de vazão, resíduo e incerteza expandida da estação do Inea próxima à estação 9 da tese, rio Guandu, jusante da ETA - Guandu. . . . .	129
5.1	Tipos de histerese na relação CSS-Q. . . . .	132
5.2	Área de estudo. Q <sub>n</sub> : vazão natural, PSL: precipitação acumulada em S. L. de Paraitinga, PTA: precipitação acumulada em Taubaté, PVR: precipitação acumulada em Volta Redonda. . . . .	134
5.3	Representação do procedimento de validação cruzada de K ciclos. Tr é conjunto de treinamento e Te é o conjunto de teste. . . . .	138
5.4	Série temporal das amostras coletadas no presente estudo na estação 1 com CSS e CSF conhecidos. . . . .	140
5.5	Histogramas das variáveis CSS e CSF. . . . .	140
5.6	Gráfico da reta de calibração e gráfico da correlação do real com o predito. . . . .	142
5.7	Histograma do resíduo e gráfico da probabilidade normal do resíduo. . . . .	143
5.8	Gráfico da variação temporal do resíduo da saída predita. . . . .	143
5.9	Série temporal da vazão natural do posto n° 125 e do modelo $\hat{y}_1$ balanço hídrico diário do Rio Paraíba do Sul a montante de UEL Santa Cecília. . . . .	145
5.10	Autocorrelação da série do posto n° 125 ( $y_1$ ) e do modelo $\hat{y}_1$ . . . . .	146
5.11	Correlação cruzada entre o modelo $\hat{y}_1$ e a série do posto n° 125 ( $y_1$ ). . . . .	147
5.12	Gráfico do resíduo dos modelos $\hat{y}_1$ , $\hat{y}_2$ e $\hat{y}_3$ . . . . .	147
5.13	Série temporal da vazão natural do posto n° 125 e do modelo de média móvel exponencial (MME) $\hat{y}_2$ . . . . .	148
5.14	Histograma do resíduo do modelo $\hat{y}_3$ e gráfico de correlação entre o modelo selecionado $\hat{y}_3$ e a série do posto n° 125 ( $y_1$ ). . . . .	148
5.15	Correlação cruzada entre o modelo $\hat{y}_3$ e a série do posto n° 125 ( $y_1$ ). . . . .	149
5.16	Série temporal de precipitação diária acumulada das localidades de São Luiz de Paraitinga (PSL), Taubaté (PTA) e Volta de Redonda (PVR). . . . .	149
5.17	Série temporal da vazão natural ( $Q_N$ ) e da concentração de sólidos suspensos (CSS). . . . .	150
5.18	Detalhamento do período entre 15/04/14 e 14/04/16 da série temporal de precipitação diária acumulada das localidades de São Luiz de Paraitinga (PSL), Taubaté (PTA) e Volta de Redonda (VR). . . . .	151
5.19	Detalhamento do período entre 15/04/14 e 14/04/16 da série temporal da vazão natural ( $Q_N$ ) e da concentração de sólidos suspensos (CSS). . . . .	151



5.20	Diagrama de caixa comparando os registros dos banco de dados (INEA/ANA/CPRM), coletados durante a tese, total e estação chuvosa e seca. . . . .	152
5.21	Primeiro e segundo ciclo da modelagem da curva chave de sedimento.	152
5.22	Terceiro e quarto ciclo da modelagem da curva chave de sedimento. . . . .	153
5.23	Quinto ciclo e modelo final da curva chave de sedimento. . . . .	153
5.24	Distribuição do resíduo e gráfico de correlação entre o real e o predito referente ao modelo de curva chave de sedimento . . . . .	154
5.25	Comparação das saídas do modelo CCS e dos dados medidos entre o período de 23/04/14 a 14/04/16. . . . .	155
5.26	Série temporal da CSS e $Q_{bomb}$ utilizada no cálculo da descarga anual de sólidos suspensos bombeado pelo UEL Sta. Cecília. . . . .	155
5.27	Gráfico em barra da CSS média mensal para o ano seco extremo (2014/15) e ano úmido típico (2015/16). . . . .	156
5.28	Série temporal da descarga de sólidos suspensos $Q_{ss}$ bombeada pela UEL Sta. Cecília para o ano seco extremo (2014/15) e ano típico (2015/16). . . . .	156
5.29	Gráfico em barra da $Q_{ss}$ média mensal para o ano seco extremo (2014/15) e ano típico (2015/16). . . . .	157
5.30	Diagrama em caixa comparando os anos seco e típico em relação ao resto do conjunto dos registros. . . . .	158
5.31	Afloramento de cianobactérias no reservatório de Funil. Foto tirada pela SUPMEP <i>apud</i> . ARAÚJO <i>et al.</i> (2012). . . . .	158
5.32	Teste da válvula difusora na UHE Funil em 18/11/14 durante 3 horas (11:00 - 14:00). Seta branca apontado a saída do difusor. Foto tirada por Marcelo Roberto Rocha de Carvalho. . . . .	159
5.33	Região de morros desmatados e colonizado por pastagens, entre Rio Claro - RJ e Bananal - SP. Foto tirada pela SUPMEP <i>apud</i> . ARAÚJO <i>et al.</i> (2012). . . . .	160
6.1	Mapa da área de estudo e localização das estações de coletas (Est. xx).	163
6.2	Série temporal de vazão média diária para o período de 14/04/14 a 14/04/16 para estação 2, constituída por dados horários do Hidroweb e diário da IPDO-ONS. . . . .	166
6.3	Série da vazão média diária para o período de 14/04/14 a 14/04/16 da soma das vazões bombeada pela UEL Sta. Cecília ( $Q_1$ ) e rio Pirai ( $Q_2$ ), série da vazão média diária para o período de 13/06/14 a 14/04/16 da tomada UEL Vigário ( $Q_3$ ) e a diferença entre os dois. . . . .	167

6.4	Série temporal da vazão média diária bombeada pela UEL Vigário (Q <sub>3</sub> ) para o período de 14/04/14 a 14/04/16 completada com imputação de dados. . . . .	167
6.5	Série temporal da vazão média diária defluente do reservatório de Lajes (Q <sub>4</sub> ) para o período de 14/04/14 a 14/04/16 completada com imputação de dados. . . . .	168
6.6	Série temporal da vazão média diária defluente do reservatório de Vigário (Q <sub>5</sub> ) para o período de 14/04/14 a 14/04/16 e a sua diferença em relação a vazão bombeada pela UEL Vigário (Q <sub>3</sub> ). . . . .	168
6.7	Série temporal da vazão média diária defluente do reservatório de Vigário (Q <sub>5</sub> ) para o período de 14/04/14 a 14/04/16 completada com imputação de dados. . . . .	169
6.8	Série temporal da vazão média diária defluente da UHE Pereira Passos (Q <sub>6</sub> ) para o período de 14/04/14 a 14/04/16 e a sua diferença em relação ao somatória das vazões defluentes dos reservatórios de Lajes (Q <sub>4</sub> ) e Vigário (Q <sub>5</sub> ). . . . .	169
6.9	Série temporal da vazão média diária defluente da UHE Pereira Passos (Q <sub>6</sub> ) para o período de 14/04/14 a 14/04/16 completada com imputação de dados . . . . .	170
6.10	Série temporal das amostras coletadas no presente estudo na estação 2, 3 e 6 com CSS e CSF conhecidos . . . . .	173
6.11	Gráfico da reta de calibração e o e gráfico da correlação do real com o predito para o rio Piraí (Est. 2). . . . .	173
6.12	Histograma do resíduo e gráfico da probabilidade normal do resíduo para o rio Piraí (Est. 2). . . . .	174
6.13	Gráfico da reta de calibração e gráfico da correlação do real com o predito para tomada do UEL Vigário (Est. 3) . . . . .	174
6.14	Histograma do resíduo e gráfico da probabilidade normal do resíduo para tomada do UEL Vigário (Est. 3). . . . .	175
6.15	Gráfico da reta de calibração e o e gráfico da correlação do real com o predito para jusante da UHE P. Passos (Est. 6). . . . .	175
6.16	Histograma do resíduo e gráfico da probabilidade normal do resíduo para jusante da UHE P. Passos (Est. 6). . . . .	176
6.17	Gráfico da variação temporal do resíduo da saída predita . . . . .	176
6.18	Séries temporais de vazão e CSS média diárias da estação 2, rio Piraí. . . . .	177
6.19	Curva-chave de sedimento para estação 2 no rio Piraí. . . . .	177
6.20	Histograma do resíduo e gráfico de correlação do valor real e predito do modelo de curva-chave de sedimento para estação 2 no rio Piraí. . . . .	178

6.21	Foto da leitura da régua (Est. 58350001) na estação 2 no dia 06/11/2014 as 15:38 e comparação com o dado disponibilizado pela Hidroweb para mesmo dia e hora . . . . .	178
6.22	Média mensal da CSS na estação 4 no reservatório de Lajes, onde a barra de erro representa o desvio padrão. . . . .	179
6.23	Série temporal NTU convertido em CSS na estação 6, jusante da UHE P. Passos. . . . .	180
6.24	Detalhe do impacto da remoção semanal do biofilme na série temporal NTU convertido em CSS na estação 6, jusante da UHE P. Passos. . .	180
6.25	Sonda RBR Duo após 7 dias de monitoramento na estação 6. . . . .	181
6.26	Registro do turbidímetro antes (círculo e linha contínua cinza) e depois (triângulo e linha tracejada cinza) da limpeza da janela óptica do sensor, diferença entre o antes e depois (círculo e linha contínua preta) da limpeza e diferença entre a amostra coleta nesse dia e a medição depois da limpeza (triângulo e linha tracejada preta). . . . .	181
6.27	Diferença entre dados amostrais de concentração de sólidos suspensos bombeada pela UEL Sta. Cecília (CSS <sub>1</sub> ) e a jusante da UHE Pereira Passos (CSS <sub>6</sub> ). . . . .	182
6.28	Tratamento dos dados série de CSS medidos pelo turbidímetro na estação 6 (CSS <sub>6</sub> ). . . . .	182
6.29	Curva ajustada para imputação de dados de CSS para a estação 6. . .	183
6.30	Histograma do resíduo e gráfico de correlação do valor real e predito do modelo de curva-chave de sedimento para estação 6 a jusante da UHE Pereira Passos. . . . .	183
6.31	Distribuição granulométrica das amostras de água coletadas entre 2014 e 2016 na estação 1, na saída do túnel da UEL Sta. Cecília. . . .	185
6.32	Distribuição granulométrica das amostras de água coletadas entre 2014 e 2016 na estação 2, no rio Pirai . . . . .	185
6.33	Distribuição granulométrica das amostras de água coletadas entre 2014 e 2016 na estação 3, na tomada da UEL Vigário . . . . .	187
6.34	Distribuição granulométrica das amostras de água coletadas entre 2014 e 2016 na estação 6, a jusante da UHE Pereira Passos . . . . .	189
6.35	Diagrama de caixas da CSS das amostras coletadas na tese e extraídas do banco de dados do Inea das estações 1, 2, 3, 4, 5 e 6. A barra do meio representa a mediana (50 %) e a caixa representam os quartis superior (75 %) e inferior (25 %). . . . .	190
6.36	Distribuição granulométrica média das amostras de água coletadas entre 2014 e 2016 na estação 1, 2, 3 e 6 . . . . .	191

6.37	Diagrama de caixas da CSV das amostras coletadas na tese das estações 1, 2, 3, 4, 5 e 6. A barra do meio representa a mediana (50 %) e a caixa representam os quartis superior (75 %) e inferior (25 %).	192
6.38	Séries de vazão e concentração de sólidos suspensos sem tratamento coletados a cada 15 minutos na estação 6, a jusante da UHE Pereira Passos.	193
6.39	Detalhe mostrando o impacto da um pico máximo de vazão na concentração de sólidos suspensos sem tratamento coletados a cada 15 minutos na estação 6, a jusante da UHE Pereira Passos.	193
6.40	Detalhe mostrando o impacto da picos menores de vazão na concentração de sólidos suspensos sem tratamento coletados a cada 15 minutos na estação 6, a jusante da UHE Pereira Passos.	194
6.41	Séries completas da vazão média diária e concentração média diária de sólidos suspensos para estação 2, no rio Pirai, para o período de 15/04/14 a 14/14/16.	194
6.42	Série temporal da descarga de sólidos suspensos $Q_{ss}$ do rio Pirai (Est. 2) para o ano seco extremo (2014/15) e ano típico (2015/16).	195
6.43	Séries completas da vazão média diária e concentração média diária de sólidos suspensos para estação 4, no Clube de Pesca Pirai do reservatório de Lajes, para o período de 15/04/14 a 14/14/16.	195
6.44	Série temporal da descarga de sólidos suspensos $Q_{ss}$ do reservatório de Lajes (Est. 4) para o ano seco extremo (2014/15) e ano típico (2015/16).	196
6.45	Séries completas da vazão média diária e concentração média diária de sólidos suspensos para estação 6, a jusante da UHE Pereira Passos, para o período de 15/04/14 a 14/14/16.	196
6.46	Série temporal da descarga de sólidos suspensos $Q_{ss}$ a jusante UHE Pereira Passos (Est. 6) para o ano seco extremo (2014/15) e ano típico (2015/16).	197
6.47	Gráfico em barra da CSS média mensal a jusante da UHE Pereira Passos (Est. 6) para o ano seco extremo (2014/15) e ano úmido típico (2015/16).	197
6.48	Gráfico em barra da $Q_{ss}$ média mensal a jusante da UHE Pereira Passos (Est. 6) para o ano seco extremo (2014/15) e ano típico (2015/16).	198
6.49	Gráfico em barra da $Q_{ss}$ média mensal comparando a entrada ( $Q_{ss1} + Q_{ss2} + Q_{ss4}$ ) e a saída ( $Q_{ss6}$ ) do sistema TPPG para o ano seco extremo (2014/15).	199

6.50	Gráfico em barra da $Q_{ss}$ média mensal comparando a entrada ( $Q_{ss1} + Q_{ss2} + Q_{ss4}$ ) e a saída ( $Q_{ss6}$ ) do sistema TPPG para o ano seco extremo (2014/15). . . . .	200
6.51	Pontos assoreados no reservatório de Santana (extraído de Ferreira e Ferreira (2014) FERREIRA e R.O. (2014)) . . . . .	200
6.52	Remoção de macrófitas no trecho médio do reservatório de Santana (foto a esquerda) e na tomada da UEL Vigário (foto a direita) (extraído de FERREIRA e R.O. (2014)) . . . . .	201
6.53	Erosão por chuva agindo na obra de corte e terraplanagem de uma encosta às margens direita do rio Pirai, a cerca de 1 km a jusante da estação 2, foto tirada em 27/11/14, as 14 horas, na beira da estrada RJ-145. . . . .	202
6.54	Fotos tiradas em 27/11/14 mostrando impacto na CSS no rio Pirai devido a erosão de uma obra na encosta próxima a margem direita: (a) estação 2, logo a montante da obra (7 mg/l) (b) logo a jusante da obra (48 mg/l). . . . .	202
6.55	Fotos mostrando uma condição típica do rio Pirai e uma condição de cheia após um pico de chuva de 35 mm/h entre 21:00 e 22:00. . . . .	203
7.1	Série de vazão defluente da UHE Pereira Passos e turbidez na captação da ETA-Guandu para o período de 31/07/1995 a 07/08/1995 (extraído de GALLO <i>et al.</i> (2012) . . . . .	206
7.2	Área de estudo. . . . .	208
7.3	Série de nível da estação 9 e estação Guandu-Seropédica (Inea). . . . .	208
7.4	Série de nível da estação 9 e estação Guandu-Seropédica (Inea) convertida em vazão. . . . .	209
7.5	Normalização pelo método <i>z-score</i> da série de nível (h) medida nas estações 6 e 9. . . . .	209
7.6	Correlação cruzada da série normalizada de nível da estação 6 ( $Q_6$ ) e da estação 9 ( $Q_9$ ). . . . .	210
7.7	Diferença entre a série de vazão média horária da estação 6 ( $Q_6$ ) e estação 9 ( $Q_9$ ). . . . .	210
7.8	Série de vazão média horária completa para estação 9, jusante da ETA-Guandu. . . . .	211
7.9	Diagrama em caixa com o conjunto total de registros de CSS coletados no trecho a jusante da UHE pereira Passos nas estações do presente estudo e do Inea, onde N é o número de amostras. . . . .	213
7.10	Série de dados com informações simultâneas de CSS e CSF para estação 9, a jusante ETA-Guandu. . . . .	213

7.11	Curva de ajuste do modelo conversão de CSF em CSS e correlação do dado CSS predito e real para a estação 9, a jusante da ETA-Guandu.	214
7.12	Histograma e probabilidade normal do resíduo do modelo para conversão de CSF em CSS para a estação 9, a jusante da ETA-Guandu.	214
7.13	Série de CSS medido e convertido da CSF pelo modelo linear para estação 9, a jusante da ETA-Guandu.	215
7.14	Série de turbidez medido pelo RBR Duo na estação 9 e sua conversão em CSS pela curva-chave de turbidez.	215
7.15	Comparação da série temporal de precipitação em Seropédica e a série de turbidez convertida em CSS na estação 9, a jusante da ETA-Guandu.	216
7.16	Comparação da série temporal de CSS na estação 6 e a série de turbidez convertida em CSS na estação 9, a jusante da ETA-Guandu.	216
7.17	Comparação da série temporal de vazão e a série de turbidez convertida em CSS na estação 9, a jusante da ETA-Guandu.	217
7.18	Foto tirada em 16/06/2015 mostrando a remoção de uma ilha de macrófitas flutuantes presa na estrutura de madeira que suportava a sonda RBR Duo na estação 9, a jusante da ETA-Guandu.	217
7.19	Sonda RBR Duo após 7 dias de monitoramento na estação 9 (esquerda) e após a limpeza (direita).	217
7.20	Série de vazão e CSS amostra e medida pela turbidímetro na estação 9 durante a parada programada anual do dia 19/11/14 para manutenção preventiva da ETA-Guandu e lagoa Cedae.	218
7.21	Histograma do resíduo e correlação entre o dado real e o dado predito pelo modelo de mínimo valor diário para estimação CSS a partir da série de dados de CSS medidos pelo turbidímetro da estação 9, a jusante ETA-Guandu.	220
7.22	Curva ajustada pelo MMQ para modelo de predição de CSS diária na estação 9 a partir de CSS diária na estação 6.	220
7.23	Histograma do resíduo e correlação entre o dado real e o dado predito pelo modelo de predição de CSS diária na estação 9 a partir de CSS diária na estação 6.	221
7.24	Série CSS completa para estação 9, a jusante da ETA-Guandu.	221
7.25	Comparação entre a CSS na estação 9 e estação 11: a foto à direita mostra o lançamento da ETA-Guandu e a esquerda a comparação visual das amostras da estação 9 e estação 11.	222
7.26	Comparação entre a CSS na estação 9 e estação 11.	222

7.27	Impacto da transposição do rio Pirai no tratamento de água da ETA-Guandu: a foto da esquerda mostra a cheia do rio Pirai após pico de chuva e a foto da direita mostra o lançamento da ETA-Guandu afetado pela transposição da cheia do rio Pirai. . . . .	223
7.28	Distribuição granulométrica das amostras de água coletadas entre 2014 e 2016 na estação 9, a jusante da ETA-Guandu. . . . .	223
7.29	Distribuição granulométrica das amostras de água coletadas entre 2014 e 2016 na estação 10, canal de São Francisco. . . . .	225
7.30	Diagrama em caixa com registros de CSS coletados em dias compartilhados por todas as estações do presente estudo a jusante da UHE pereira Passos, com o valor médio representado pela estrela. . . . .	226
7.31	Série temporal de CSS coletado pelo Inea e o presente estudo no trecho a jusante da UHE Pereira Passos. . . . .	227
7.32	Série temporal de CSS coletado pelo Inea e o presente estudo no trecho da captação da ETA-Guandu. . . . .	227
7.33	Diagrama de caixa da CSS coletado pelo Inea e o presente estudo no trecho a jusante da UHE Pereira Passos, onde a média é representada por uma estrela. . . . .	228
7.34	Diagrama de caixa da CSS coletado pelo Inea e o presente estudo no trecho a jusante da UHE Pereira Passos, onde a média é representada por uma estrela. . . . .	229
7.35	Série de precipitação, vazão e CSS na estação 9, a jusante da ETA-Guandu. . . . .	229
7.36	Série de nível descontado da média ( $\eta$ ) e vazão na estação 6 e 9 no dia 19/11/14 e vazão na estação 6 e 9 no dia 29/10/15. . . . .	230
7.37	Comparação da distribuição granulométrica média das amostras de água coletadas entre 2014 e 2016 na estação 6, 9 e 10 . . . . .	231
7.38	Comparação da distribuição granulométrica nas estações 6, 9 e 10 para os dias 24/01/15 e 03/02/15. . . . .	232
7.39	Comparação da distribuição granulométrica nas estações 6, 9 e 10 para os dias 13/02/15 e 21/02/15. . . . .	232
7.40	Comparação da distribuição granulométrica nas estações 6, 9 e 10 para os dias 26/02/15 e 13/03/15. . . . .	233
7.41	Comparação da distribuição granulométrica nas estações 6, 9 e 10 para os dias 02/04/15 e 01/05/15. . . . .	233
7.42	Comparação da distribuição granulométrica nas estações 6, 9 e 10 para os dias 16/06/15 e 14/07/15. . . . .	234

7.43	Série das descargas diárias sólidos suspensos a jusante da UHE Pereira Passos e ETA-Guandu para o ano seco (15/04/2014-14/04/2015) e para o ano típico (15/04/2015-14/04/2016). . . . .	234
7.44	Descargas mensais de sólidos suspensos a jusante da ETA-Guandu para os meses o ano seco (15/04/2014-14/04/2015) e para o ano típico (15/04/2015-14/04/2016). . . . .	235
7.45	Descargas mensais de sólidos suspensos para os meses do ano seco (15/04/2014-14/04/2015) da estação 6 e 9. . . . .	235
7.46	Descargas mensais de sólidos suspensos para os meses do ano típico (15/04/2015-14/04/2016) da estação 6 e 9. . . . .	236
7.47	Descarga de sólidos suspensos na bacia do Guandu para um ano típico, onde a espessura da seta é proporcional a descarga de sólidos em suspensão. . . . .	237
7.48	Planta esquemática da expansão futura da ETA-Guandu. . . . .	239



# Lista de Tabelas

2.1	Sumário climatológico da bacia do Paraíba do Sul até UEL Sta. Cecília (BHPS*), rio Piraí (SbHP) e rio Guandu original (BHG). T é a temperatura média anual (° C) e P é a precipitação acumulada anual média (mm). . . . .	20
2.2	Sumário hidrológico da bacia do Paraíba do Sul até UEL Sta. Cecília (BHPS*) e das sub-bacias do Piraí (SbHP), do Guandu original (BHG). RPS: rio Paraíba do Sul, BS: Baía de Sepetiba , RGA: rio Guandu Açu, Q: vazão média de longo termo. . . . .	20
2.3	Vazão média de longo termo (Q) para as bacias formadoras da bacia do Guandu original. A é a área (km <sup>2</sup> ), P é a precipitação acumulada anual média (mm). . . . .	25
2.4	Resumo cronológico do balanço hídrico na foz do canal de S. Francisco. . . . .	45
2.5	Impacto das outras transposições de bacias na descarga de lavagem (Q <sub>sl</sub> ): Abs - Abastecimento público; GEH - Geração de energia hidroelétrica; Abs - Efluente ; GET - Geração de energia termoelétrica. . . . .	52
2.6	Contribuição dos efluentes domésticos (t/ano) produzidos pela população residente (N° Hab.) na bacia do Guandu baseado na Equação 2.6 ao longo do tempo. . . . .	56
2.7	Resultado cálculo da descarga de fundo (Equação 2.3, Equação 2.4 e Equação 2.5), lavagem e total no canal de Francisco para um cenário antes e imediatamente depois da conclusão da TPPG e um mais recentemente: D - declividade, L - largura do rio (m), d <sub>50</sub> diâmetro mediano do grão, Q <sub>sf</sub> - descarga de fundo, Q <sub>sl</sub> - descarga de lavagem e Q <sub>st</sub> - descarga sólida total. . . . .	63
3.1	Sumário dos reservatórios e aproveitamentos hidroelétricos na bacia do Paraíba do Sul a jusante da UEL Sta. Cecília. A é a área do espelho d'água do reservatório (km <sup>2</sup> ) e Q <sub>d</sub> é a vazão defluente do reservatório (m <sup>3</sup> /s) (extraído do ONS (2012)). . . . .	74

3.2	Sumário dos reservatórios da transposição. $A$ é a área inundada do reservatório correspondente ao nível máximo (km <sup>2</sup> ). . . . .	76
3.3	Definição dos postos (xxx) de vazão natural e artificial e suas respectivas formulações (extraído do ONS (2015)). . . . .	79
3.4	Empreendimentos instalados na bacia responsáveis pela captação superficial de pelo menos 1 m <sup>3</sup> /s (extraído de COELHO e ANTUNES (2012)). . . . .	80
3.5	Unidades geradoras instaladas na bacia do Guandu a jusante da UHE Pereira Passos. . . . .	81
3.6	Caracterização física do rejeito da ETA-Guandu (extraído de DELGADO (2016)). . . . .	85
3.7	Caracterização química do rejeito da ETA-Guandu (extraído de DELGADO (2016)). . . . .	85
3.8	Caracterização ambiental do rejeito da ETA-Guandu (extraído de DELGADO (2016)). . . . .	86
3.9	Resoluções emitidas pela ANA que alteraram as regras da vazão mínima durante os eventos de escassez hídrica de 2003/04 e 2014/15. . . . .	88
4.1	Precipitação acumulada média anual (mm/ano) no ano seco (15/04/2014 a 14/04/2015) e típico (15/04/2015 a 14/04/2016) para as estações Volta Redonda - RJ (PVR), Taubaté - SP (PTA) e São Luis Paraitinga - SP (PSL). . . . .	99
4.2	Avaliação da hipótese nula da homogeneidade horizontal para CSS, CSF e CSV na seção das est. 6 e 9 pelo teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ). $\bar{e}$ é o resíduo (meio-margem). $\sigma_e$ é desvio padrão do resíduo. $\chi_{95,d}^2$ é o valor crítico do $\chi^2$ para valor-p de 0,05 com $d$ graus de liberdade. $t_{95,d}$ é o valor crítico t Student para valor-p de 0,05 com $d$ graus de liberdade. $\varepsilon_{hor}$ é o intervalo de confiança (IC) para valor-p=0,05 gerada pela aproximação. . . . .	119
4.3	Avaliação da hipótese nula da homogeneidade vertical para CSS na seção das est. 9 pelo teste t-Student ( $t$ ). $\overline{CSS}$ é a média da CSS na superfície e coluna d'água (mg/l). $Var(CSS)$ é a variância da CSS para superfície e na coluna d'água. $t_{95,d}$ é o valor crítico t-Student para valor-p de 0,05 com $d$ graus de liberdade. $\varepsilon_{col}$ é a incerteza expandida da hipótese nula com valor-p = 0,05. . . . .	120
4.4	Estimativa da incerteza de medição da CSS, CSF e CSV e suas componentes. . . . .	121
4.5	Medição da vazão na estação 9. . . . .	125

5.1	Estações selecionadas e estação criada no presente estudo (Cód.: 1 - LDSC). PSL: precipitação acumulada (mm/d) no município de São Luiz de Paraitinga; PTA: precipitação acumulada (mm/d) no município de Taubaté; PVR: precipitação acumulada (mm/d) no município de Volta Redonda; $Q_N$ : vazão natural diária a montante da captação de UEL Sta. Cecília; $Q_R$ : vazão regularizada diária a montante da captação de UEL Sta. Cecília. . . . .	135
5.2	Estações sedimentológicas usadas no presente estudo. N: número de registros. $\bar{\mu}$ é a média. $\sigma$ é o desvio padrão. CST é a concentração de sólidos totais suspensos. CSS é a concentração de sólidos suspensos. CSF é a concentração de sólidos fixos suspensos. CSV é a concentração de sólidos voláteis suspensos. . . . .	139
5.3	Estimador da CSS a partir da CSF. . . . .	141
5.4	Variáveis utilizadas no calculo da vazão natural para 2015 e 2016. $Q_a$ é vazão média diária afluyente ao reservatório. $Q_d$ é vazão média diária defluente ao reservatório. $Q_N$ é a vazão natural calculada . . . . .	144
5.5	Modelos para vazão natural para o período de 2015 e 2016. . . . .	145
5.6	Avaliação dos modelos para cálculo da vazão natural do posto 125 em Sta. Cecília, onde MM é média móvel aritmética e MME é a média móvel exponencial (em negrito o modelo selecionado). . . . .	146
5.7	Variáveis selecionadas para modelagem do estimador da concentração sólidos suspensos diários na est. 01. NI: não informado. . . . .	150
5.8	Resultado dos ciclos da validação cruzada do modelo de curva-chave de sedimento. . . . .	153
5.9	Comparação das estimativas de descarga de sólidos suspensos bombeados pela UEL Sta. Cecília obtidas pela BIRD-MPO/SEPURB/PQA-ABC-PNUD (1997), Molisani <i>et al</i> (2006) e tese (Simulado, seco e típico). NI: não informado. Simulado foi uma simulação usando os dados de CSS da ano típico (tese) e de Q do estudo de Molisani <i>et al</i> (2006). . . . .	159
6.1	Estações selecionadas e estação criada no presente estudo (LDSC). PI: rio Pirai; PP: jusante UHE Pereira Passos; RL: reservatório de Lajes; ST: tomada reservatório de Santana; SC: tomada UEL Santa Cecília; VG: defluência do reservatório de Vigário; T: turbidez. . . .	164

6.2	Estações sedimentológicas usadas no presente estudo. N: número de registros. $\bar{\mu}$ é a média. $\sigma$ é o desvio padrão. CST é a concentração de sólidos totais suspensos. CSS é a concentração de sólidos suspensos. CSF é a concentração de sólidos fixos suspensos. CSV é a concentração de sólidos voláteis suspensos. . . . .	171
6.3	Avaliação do modelo linear para estimação de CSS ( $\hat{y}_i$ ) a partir da CSF ( $x_i$ ), e estimação da incerteza expandida desse modelo para estações 2, 3 e 6. . . . .	171
6.4	Variáveis selecionadas para modelagem do estimador da concentração sólidos suspensos diários na estação 02. NI: não informado. . . . .	172
6.5	Avaliação do desempenho e estimação da incerteza expandida da saída do modelo de curva-chave de sedimento para estação 2 no rio Piraí. . . . .	172
6.6	Comparação da leitura da régua e cota disponibilizada pelo Hidroweb na estação 2 (Est. 58350001). . . . .	179
6.7	Correlação de Pearson da CSS <sub>6</sub> com CSS <sub>1</sub> para 0, 1, 2, 3, 4, e 5 dias de atraso. . . . .	183
6.8	Avaliação do desempenho e estimação da incerteza expandida da saída do modelo de imputação de dados de CSS <sub>6</sub> a partir da CSS <sub>1</sub> . . . . .	184
6.9	Estatística descritiva da granulometria das amostras da estação 1 e comparação com dados de CSS/F/V. . . . .	186
6.10	Estatística descritiva da granulometria das amostras da estação 2 e comparação com dados de CSS/F/V. . . . .	186
6.11	Estatística descritiva da granulometria das amostras da estação 3 e comparação com dados de CSS/F/V. . . . .	188
6.12	Estatística descritiva da granulometria das amostras da estação 6 e comparação com dados de CSS/F/V. . . . .	188
6.13	Resumo das descargas anuais de sólidos suspensos ( $Q_{ssi}$ ) das estações 1, 2, 4, 6 e somatório afluyente ( $Q_{ssa}$ ), retenção anual ( $S_{ss}$ ) e eficiência de retenção (ER). . . . .	198
6.14	Comparação das estimativas de descarga de sólidos suspensos defluente da UHE P. Passos, retenção e eficiência de retenção obtidas pela BIRD-MPO/SEPURB/PQA-ABC-PNUD (1997), Molisani <i>et al</i> (2006) e tese (seco e típico). NI: não informado. . . . .	201
6.15	Parâmetros de qualidade de água coletados nos reservatórios entre janeiro e fevereiro 2008. Mediana e [mín.- máx.] (extraído de ARAÚJO e ROCHA (2012)) . . . . .	204

7.1	Estações selecionadas (INMET e INEA) e estação criada no presente estudo (LDSC). P: precipitação (mm/d). Nível: nível da água (m). Q: vazão ( $m^3/s$ ). CST: concentração de sólidos totais suspensos (mg/l). CSS/F/V: concentração de sólidos suspensos, fixos e voláteis (mg/l). GRA: granulometria ( $\mu m$ ). Q <sub>ss</sub> : descarga de sólidos suspensos (t/d).	207
7.2	Descrição do conjunto de teste e resultado da avaliação do modelo de predição de CSS diária na estação 9 a partir de CSS diária na estação 6. . . . .	211
7.3	Descrição estatísticas das estações criadas no presente estudo e do Inea. . . . .	212
7.4	Descrição do conjunto de teste e resultado da avaliação do modelo de mínimo valor diário para estimação CSS a partir de dados de CSS medidos pelo turbidímetro da estação 9, a jusante ETA-Guandu. . .	219
7.5	Descrição do conjunto de teste e resultado da avaliação do modelo de predição de CSS diária na estação 9 a partir de CSS diária na estação 6. . . . .	219
7.6	Estatística descritiva da granulometria das amostras da estação 9 e comparação com dados de CSS/F/V. . . . .	224
7.7	Estatística descritiva da granulometria das amostras da estação 10 e comparação com dados de CSS/F/V. . . . .	226
7.8	Comparação das estimativas de descarga de sólidos suspensos defluente da UHE P. Passos obtidas pela ETEP/ECOLOGUS/SM-GROUP (1998), Molisani <i>et al.</i> (2006) e tese (seco e típico). NI: não informado; Q <sub>ss<sup>t</sup></sub> : descarga anual de sólidos em suspensão total ( $Q_{ss9} + Q_{ss11}$ ). . . . .	238

# Lista de Símbolos

$V_G$	Estimativa do volume da amostra coletada em l, p. 115
$\Delta_{AS}$	Incerteza padrão do desvio padrão da pesagem da amostra seca repetida 3 vezes (mg), p. 115
$\Delta_{esp}$	Incerteza padrão referente a distribuição retangular com largura igual ao erro máximo admissível da balança (0,2 mg), p. 115
$\Delta_{res}$	Incerteza padrão referente a distribuição retangular com largura igual à resolução da balança (0,1 mg), p. 115
$\alpha$	Fator de multiplicação na média móvel exponencial, p. 133
$\bar{\mu}$	média aritmética, p. 135
$\bar{y}$	Média aritmética dos valor real de saída, p. 134
$\tilde{y}$	Média dos resultados do modelo, p. 134
$\mathbf{Q}(\mathbf{t})$	Série temporal de vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), p. 107 0, 1, 2, ... dias, p. 133
$\theta_i$	Parâmetros de ajuste i: 0,1,...,n, p. 107
$\mathbf{h}'(\mathbf{t})$	Nível da água sobre o sensor de pressão corrigido da pressão atmosférica (m), p. 107
$\mathbf{h}_0$	Diferença de cota entre o ponto mais fundo do leito e ponto de medição do sensor de pressão (m), p. 107
$\mathbf{h}_1(\mathbf{t})$	Nível da água com a cota zero no ponto mais fundo do leito, p. 107
$\mathbf{y}(\mathbf{t} - \mathbf{k} + \mathbf{1})$	Variável de saída com atraso de k+1 dias, p. 132

$\rho_{y\hat{y}}$	Correlação entre os resultados do modelo e os valores observados da variável de saída, p. 134
$\sigma$	desvio padrão, p. 135
$\sigma_{AS}$	Desvio padrão da pesagem da amostra seca repetida 3 vezes (mg), p. 115
$\sigma_e^2$	Estimativa da variância dos resíduos, p. 96
$\varepsilon$	estimativa do erro ou incerteza do modelo, p. 97
$\varepsilon_{AS}$	Incerteza expandida da medição da pesagem da amostra seca, p. 115
$\varepsilon_{PF}$	Incerteza expandida da medição da pesagem do filtro (mg), p. 116
$\varepsilon_{PSS}$	Incerteza expandida do peso do sólido suspenso (mg), p. 116 0,05, p. 117
$\varepsilon_g$	Incerteza padrão associada a leitura do copo graduado (l), p. 115 0,05, p. 117
$\varepsilon_{lab}$	incerteza combinada da medição de CSS gerada no laboratório (mg/l), p. 116
$t_{\alpha,d}$	Valor da distribuição t de <i>Student</i> para d graus de liberdade, p. 97
$v_g$	Leitura direta do volume da amostra (l), p. 115
$y_r$	Valor esperado, p. 97
AS	Peso da amostra seca (mg), p. 101
AV	Peso da amostra calcinada (mg), p. 101
$CSF_i$	Concentração de sólidos fixos (mg/l) na estação i: 1,2,...,11, p. 101
$CSS_{i,t}$	Concentração de sólidos suspensos (mg/l) na estação i: 1,2,...,11 para o dia t: 1,2,...,365, p. 135

$CSS_i$	Concentração de sólidos suspensos (mg/l) na estação i: 1,2,...,11, p. 101
$CST_e$	Concentração de sólidos suspensos totais do efluente(mg/l)., p. 11
$CSV_i$	Concentração de sólidos voláteis (mg/l) na estação i: 1,2,...,11, p. 101
C	Coefficiente de Chezy, p. 9
D	Declividade do leito do canal (m), p. 9
ER	Eficiência de retenção (%), p. 161
L	Largura média do canal (m), p. 9
MAPE	Erro absoluto médio percentual, p. 134
$N_h$	Número de habitantes residentes na bacia do Guandu., p. 11
PF	Peso do filtro (mg), p. 101
PSF	Peso dos sólidos fixos (mg), p. 101
PSL	precipitação acumulada (mm/d) em São de Paraitinga-SP, p. 131
PSS	Peso dos sólidos suspensos (mg), p. 101
PSV	Peso dos sólidos voláteis (mg), p. 101
PTA	precipitação acumulada (mm/d) em Taubaté-SP, p. 131
PVR	Precipitação acumulada (mm/d) em Volta Redonda - RJ, p. 131
$Q_N$	vazão média diária natural ( $m^3/s$ ), p. 72
$Q_R$	vazão média diária regularizada ( $m^3/s$ ), p. 131
$Q_{bomb}$	vazão média diária bombeada UEL Sta. Cecília ( $m^3/s$ ), p. 72
$Q_{el}$	Descarga anual líquida efluente doméstico produzido por um habitante urbano (l/hab.d)., p. 11
$Q_{i,t}$	Descarga líquida ( $m^3/s$ ) na estação i: 1,2,...,11 para o dia t: 1,2,...,365, p. 135



	1,...,11, p. 161
$Q_{sl}$	Descarga anual de sólidos do leito (t/ano), p. 10
$Q_{ssa}$	Descarga de sólidos suspensos afluyente (anual: t/ano ou diário: t/d), p. 161
$Q_{ssd}$	Descarga de sólidos suspensos defluente (anual: t/ano ou diário: t/d), p. 161
$Q_{ssi}$	Descarga anual de sólidos suspensos (t/ano) na estação i: 1,2,...,11, p. 135
$Q_{ss}$	Descarga anual de sólidos suspensos (t/ano)., p. 11
$Q$	Vazão ( $m^3/s$ ), p. 9
$R^2$	Coefficiente de determinação, p. 134
$R_{log}^2$	Coefficiente de determinação sobre os logaritmos dos valores conservados e predito, p. 134
RMS	Raiz quadrada do EMQ, p. 134
$S_{ss}$	taxa de sedimentação (t/ano), p. 193
$d_{50}$	Diâmetro mediano do grão (mm), p. 10
$e(t)$	Resíduo do modelo no tempo t: 1,...,N, p. 133
$h$	Profundidade média do canal (m), p. 9
$q_c$	Descarga líquida crítica ( $m^3/s$ ) por unidade de largura (m), p. 10
$q_{sl}$	Descarga sólida do leito (t/s) por unidade de largura (m), p. 10

# Lista de Abreviaturas

ANA	Agência Nacional de Águas, p. 71
AP	Antes do Presente, p. 25
BN	Biblioteca Nacional, p. 8
BS	Baia de Sepetiba, p. 22
CDIG	Comissão de Dragagem dos rios Itá e Guandu, p. 41
CDSC	Comissão de Dragagem de Santa Cruz, p. 41
CESP	Centrais Elétricas de São Paulo, p. 71
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, p. 71
DNOS	Departamento de Obras e Saneamento, p. 37
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, p. 11
ETA	Estação de tratamento de água, p. 49
EUPS	Equação Universal de Perda de Solo, p. 11
FECAM	Fundo Estadual de Conservação Ambiental e Desenvolvimento Urbano, p. 63
FEEMA	Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente, p. 9
FUNDREM	Fundação para o Desenvolvimento da Região Metropolitana do Rio de Janeiro, p. 8
IC	intervalo de confiança, p. 96
IPDO	Informativo Preliminar Diário da Operação-Operador Nacional do Sistema Elétrico, p. 130
Inea	Instituto Estadual do Meio Ambiente do Rio de Janeiro, p. 3

MME	Média móvel exponencial, p. 132
MM	Média móvel aritmética, p. 132
MN	Museu Nacional, p. 8
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico, p. 9, 130
PCH	Pequena central hidroelétrica, p. 62
RMRJ	Região Metropolitana do Rio de Janeiro, p. 2
RPS	Rio Paraíba do Sul, p. 22
SEA	Secretaria Estadual do Ambiente, p. 7
TAC	Termo de Ajuste de Conduta, p. 63
TKCSA	Thyssenkrupp Companhia Siderúrgica do Atlântico, p. 50
TPPG	Transposição de bacias Paraíba do Sul-Piraí-Guandu, p. 3
UEL	Usina elevatória, p. 7
UHE	Usina Hidroelétrica, p. 9
UTE	Usina termoelétrica, p. 50
ZCAS	Zona de convergência do Atlântico Sul, p. 16

# Capítulo 1

## Introdução

Esta tese parte do interesse em conhecer as mudanças na morfologia e na descarga de sólidos suspensos do rio Guandu, devido às interferências antrópicas. Sabe-se que destas interferências podem agir tanto na bacia, alterando a produção de água e de sedimento, como diretamente no escoamento do rio, alterando a geometria do canal e as quantidades transportadas de água e material do leito. Entretanto, esse entendimento depende do conhecimento detalhado de variáveis geológicas, climatológicas, pedológicas, hidráulicas e sedimentológicas, que controlam tais processos.

A morfologia do trecho aluvial de um rio é condicionada pelo equilíbrio entre a alimentação sólida a montante, e a capacidade de transporte das vazões líquidas. O equilíbrio sedimentológico depende tanto da extensão do trecho como do período de tempo considerado.

Quando se quer reconstituir a história morfológica de um rio, é necessário conhecer a variação da vazão líquida, a topobatimetria do trecho (profundidade, largura e declividade do leito), o transporte do seu material de fundo e a forma e a composição do seu leito móvel, durante o período de tempo considerado. Qualquer intervenção hidráulica, que mude significativamente essas variáveis estará fadada a produzir impactos morfológicos indesejados, a menos que seja apoiada por estudos sedimentológicos prévios, que visem mitigar esses efeitos.

O rio Guandu possui um extenso histórico de importantes intervenções hidráulicas ao longo do seu curso. A primeira intervenção hidráulica ocorreu já na segunda metade do séc. XVIII. Nesse período, os jesuítas projetaram canais, barragem de regularização de vazão (ponte dos jesuítas), valas, diques e vertedouros laterais. Depois, por todo o séc. XX, uma série de obras hidráulicas e atividades mineradoras voltaram a mudar as características hidráulicas e sedimentológicas do rio. Nesse período, governo e empresas privadas conduziram obras de regularização da vazão, construção de novos canais e restauração dos antigos, desvio para captação, barragens, dragagens e transposições de bacias para fins hidro e termoeletrônicos. Apesar da grande diversidade de tipos de intervenções hidráulicas, uma característica é

comum a todas: a ausência de estudos sedimentológicos detalhados prévios.

Entre todas as obras hidráulicas feitas no rio Guandu, a mais relevante é a transposição de bacias Paraíba do Sul-Piraí-Guandu. Graças à transposição de centenas de metros cúbicos por segundo dos rios Piraí e Paraíba do Sul, o Guandu deixou de ser um modesto rio, com vazão média de dezenas de metros cúbicos por segundo, e passou a ser a principal fonte de abastecimento público da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ).

É razoável supor que tais intervenções modificaram algumas das principais variáveis hidráulicas e sedimentológicas, que controlam a morfologia do rio Guandu. Logo, esta tese se propõe a responder quais variáveis foram essas e como elas mudaram a morfologia deste rio. As respostas a essas perguntas permitiram mapear a relevância das principais intervenções hidráulicas, na história evolutiva recente do rio Guandu, em especial, no seu delta.

Hoje, o curso final do rio Guandu se divide em três canais que formam junto às suas fozes um extenso complexo deltaico na margem noroeste da baía de Sepetiba. Sobre essa feição morfológica, estende-se o terminal marítimo da TKCSA. À sua direita, encontra-se o porto de Itaguaí e, à sua esquerda, as praias de Sepetiba e Santa Luzia. A possibilidade de progradação desse delta é tratada como uma ameaça tanto para a navegação como para o ecossistema, uma vez que o sedimento coesivo pode adsorver contaminantes provenientes das atividades industriais e portuárias próximas.

Por outro lado, quando se trata da descarga de sólidos suspensos, esse levantamento histórico deve considerar, sobretudo, as diferentes formas de ocupação da bacia hidrográfica. Quando se analisa em termos de fonte, nota-se que, na maioria dos rios, o material transportado em suspensão é constituído, essencialmente, por sedimentos finos (menores do que  $62 \mu\text{m}$ ) e representado, principalmente, pela descarga de lavagem (*wash load*). A descarga de lavagem é a resposta mais rápida às mudanças observadas na bacia, uma vez que, durante um evento de chuva intensa e bem distribuída na bacia hidrográfica, os sedimentos finos são mais facilmente desagregados do solo e carregados pelo escoamento superficial para os rios (SILVA e WILSON-JR, 2013).

No caso da bacia do rio Guandu, o período de desmatamento mais intenso se concentrou entre o séc. XVI e XVIII. A primeira fase de uso de solo foi marcada pela produção agropecuária. Esse modelo de produção foi dominante do séc. XVII até a metade do séc. XX, quando rapidamente converteram a baixada de Sepetiba em aglomerados de cidades dormitórios, distritos industriais e zona portuária. Todavia, as regiões no interior com terrenos mais acidentados, como os municípios de Paracambi e Miguel Pereira, permanecem essencialmente rurais, onde extensas pastagens improdutivas expõem o solo acidentado aos agentes erosivos.

Quando se trata de fontes de sólidos suspensos, outras atividades não relacionadas diretamente à erosão do solo também devem ser consideradas, principalmente as transposições de bacias resultantes dos aproveitamentos hidro e termoelétricos e da estação de tratamento de água. Tais intervenções hidráulicas, desviam não apenas água, mas quantidades apreciáveis de sólidos suspensos para a bacia receptora. Ao considerar que a transposição Paraíba do Sul-Piraí-Guandu, a estação de tratamento de água ETA-Guandu e as termoelétricas de Santa Cruz e da TKCSA representam as maiores transposições de água com sólidos suspensos da bacia do rio Guandu, esta tese traz a seguinte pergunta: Qual a contribuição dessas intervenções no aporte e na distribuição dos sedimento fino nas margens noroeste da baía de Sepetiba?

Essas respostas permitem ainda esclarecer as mudanças recentes observadas nas praias de Sepetiba e Santa Luzia, no município de Sepetiba. Pescadores e moradores locais relatam que essas praias eram originalmente compostas por areias brancas e que, a partir da déc. 70, foram se enriquecendo de sedimento fino e matéria orgânica, convertendo-se, mais recentemente em praias lamosas de coloração escura e impróprias para o banho. Em 2012, o Instituto Estadual do Meio Ambiente (Inea) tentou recuperar essas praias através do Projeto de Reabilitação Ambiental da Praia de Sepetiba, executado pela empreiteira Odebrecht. A obra custou mais de 46 milhões de reais e logo após ser concluída já manifestava sinais de retorno do material orgânico e do sedimento fino. Este é um típico exemplo do que acontece quando estudos sedimentológicos de longa duração são negligenciados.

## **1.1 Objetivo**

A tese está dividida em duas partes. A primeira parte busca descrever as respostas morfológicas do rio Guandu e de seu delta, devido às transposições de bacias. A segunda avalia a contribuição das transposições de bacias no aporte e na distribuição da descarga de sólidos suspensos, na margem noroeste da baía de Sepetiba, para dois anos hidrológicos.

## **1.2 Organização da tese**

No capítulo 2, foi descrita a evolução morfológica recente do rio Guandu e seu delta. Essa descrição se divide em duas partes: a primeira trata da variação do domínio da bacia hidrográfica do Guandu, ao longo do tempo, e a segunda, da evolução morfológica do rio Guandu e do seu delta.

No capítulo 3, são apresentadas as regras operativas dos principais usuários das bacias dos rios Guandu, Paraíba do Sul e Piraí. As mudanças nas regras operativas

devidas à crise hídrica nas bacias do Paraíba do Sul e Guandu também são aqui apresentadas.

No capítulo 4, são descritas a coleta de dados, a calibração dos instrumentos e as estimativas de medição utilizadas, nas campanhas de campo e na análise de laboratório. Uma classificação foi proposta para os dois anos hidrológicos monitorados.

No capítulo 5, é estimada a descarga de sólidos suspensos bombeada pela usina elevatória de Santa Cecília, para os dois anos hidrológicos.

No capítulo 6, é estimada a descarga de sólidos suspensos no rio Pirai e logo a jusante da UHE Pereira Passos. Nesse capítulo também é estimada a eficiência de retenção de sólidos suspensos na transposição Paraíba do Sul-Pirai-Guandu. Essas estimativas são acompanhadas pelas descrições granulométricas das amostras ao longo da transposição.

No capítulo 7, é estimada a descarga de sólidos suspensos que chegou à baía de Sepetiba para dois anos hidrológicos. A participação dos principais usuários, na redistribuição dos sólidos suspensos pelas três fozes do sistema fluvial Guandu, é descrita. Essa estimativa é acompanhada por uma descrição granulométrica do material que chegou ao canal de São Francisco.

No capítulo 8, é apresentado o sumário das conclusões obtidas em cada capítulo e algumas recomendações.

## Capítulo 2

# Mudanças no domínio da bacia e na morfologia do rio Guandu

### 2.1 Introdução

Intervenções antrópicas são responsáveis por importantes mudanças na conformação de uma bacia hidrográfica e na morfologia de rios e deltas (DE VRIEND, 2015). Algumas dessas mudanças são indesejadas, tais como, assoreamento de reservatórios e perda do solo, tornando-se preocupações de ordem global e objeto de investigação de instituições internacionais como o Banco Mundial (MAHMOOD, 1987) e as Nações Unidas (OLDEMAN *et al.*, 1991). Apesar das respostas de longo prazo dos rios às intervenções humanas e dos mecanismos físicos serem bem conhecidos, DE VRIEND (2015) reporta que tais avaliações são frequentemente ignoradas por muitos gestores e seus consultores que atuam na área de recursos hídricos. Por isso, esse estudo se inicia com uma investigação de ordem qualitativa, buscando descrever as respostas morfológicas do rio Guandu e do seu delta frente às intervenções antrópicas ocorridas na região desde a chegada dos europeus.

O domínio de um sistema fluvial é formado pela bacia de drenagem, pelo rio e pelo delta (SCHUMM, 1977). A bacia de drenagem é responsável pela produção de água e sedimento. O trecho médio do rio é caracterizado pela transferência dessas quantidades e pela modelagem morfológica da planície aluvial. O trecho baixo é preferencialmente, deposicional, sendo que a morfologia do canal e do delta sofre influência das variações de nível do espelho de água do corpo receptor.

Em condições naturais, o tamanho do domínio hidrográfico é resultado da ação de agentes geológicos e paleoclimáticos (CHANG, 1992). Tais processos operam na escala de tempo geológica de milhares a milhões de anos. Entretanto, no sistema fluvial do rio Guandu, o tamanho do seu domínio variou consideravelmente, nos últimos 130 anos. Neste caso, sua evolução foi marcada por importantes intervenções



antrópicas, como transposições de bacias e canalizações que ampliaram ou reduziram seu domínio, ao longo do tempo.

A evolução morfológica dos rios, por sua vez, ocorre na escala de décadas a séculos (CHANG, 1992). Além dos agentes geológicos e paleoclimáticos de ordem temporal maior, a morfologia de canais e deltas também é modelada pela paleohidrologia, geometria do vale, clima, cobertura do solo, descarga média anual sólida e líquida (CHANG, 1992). Diversas intervenções antrópicas também alteram a morfologia de um sistema fluvial, algumas de forma intencional e outras como efeito indesejado (JANSEN *et al.*, 1979). Entre os efeitos intencionais, pode-se regularizar a vazão através de barragens, e a geometria dos canais através de obras de dragagem, regularização de margens e introdução de estruturas artificiais ou naturais (DE VRIEND, 2015). Por outro lado, usinas hidroelétricas e barragens podem produzir efeitos morfológicos indesejados, tais como erosão a jusante e retenção de sedimento a montante (YANG *et al.*, 2011). Efeitos indesejados também são produzidos pela mineração intensiva de areia que deixam profundas cavas no leito do canal, ameaçando o equilíbrio da declividade do leito (DE VRIEND, 2011). A agropecuária sem práticas conservacionistas do solo também pode resultar em efeitos negativos, sendo que a intensificação e generalização da erosão leva ao assoreamento de rios e deltas (JANSEN *et al.*, 1979).

Na escala morfológica de décadas e séculos, o uso da modelagem numérica é muito limitada (DE VRIEND, 2011). Entretanto, uma modelagem analítica mais simples pode ajudar a discernir qualitativamente respostas morfológicas de longa duração. DE VRIEND (2011) mostrou que muitas das respostas morfológicas de longa duração do rio Waal podem ser analisadas revisitando as equações básica de balanço de massa, de movimento, de sedimento e fórmula de transporte. Ao Simplificar o problema do escoamento para um regime de equilíbrio, o rio passa a ter sua profundidade e sua declividade explicada apenas pela descarga líquida e sólida de fundo (DE VRIEND, 2011).

Na história recente do rio Guandu e seu delta, sua morfologia precisou se ajustar a uma série de intervenções antrópicas. Na bacia houve desmatamento, atividades agropastoris, urbanas e industriais, enquanto que no rio houve obras de controle de cheias, captação para abastecimento público e geração de energia hidro e termoelétrica. Estudos prévios de MOLISANI *et al.* (2004) e DE CARVALHO GOMES *et al.* (2009), baseados em datação de radioisótopo, já identificaram sinais dessas mudanças, na qual apontam um aumento expressivo da taxa de sedimentação, na margem noroeste da baía de Sepetiba, a partir da metade do século XX.

Este capítulo é dividido em duas partes: a primeira parte trata da variação do domínio da bacia hidrográfica do Guandu, ao longo do tempo. Essa evolução foi descrita a partir da revisão bibliográfica existente e de visitas de campo, contem-

plando aspectos geológicos e paleoclimáticos, assim como a história das intervenções hidráulica na bacia, tais como: canal fluvial, canal de derivação, vala, dique, vertedouro, túnel hidráulico e usinas elevatórias e hidroelétricas.

A segunda parte trata da evolução morfológica do rio Guandu e do seu delta. Essa parte adicionou aspectos médios de outras variáveis: cobertura do solo, climatologia, pedologia, hidrologia, geometria do canal, transporte de sedimento, composição do leito, batimetria do delta, além de intervenções hidráulicas, tais como, mineração no leito, retificação de canal, retenção de sólidos em barragens, regularização da descarga hidráulica, dicamento e drenagem das planícies de inundação.

## 2.2 Área de estudo

As diversas intervenções hidráulicas ocorridas na bacia original do rio Guandu produziram mudanças no formato da bacia, ao longo do tempo. Por isso, a área de estudo desse capítulo será a mais ampla possível, de modo a contemplar toda a evolução desse domínio hidrológico no tempo. Assim, a área de estudo contou com 6 bacias hidrográficas atuais definidas pela SEA/INEA (SEA/INEA, 2010): Paraíba do Sul até a Usina Elevatória (UEL) de Santa Cecília (16.752,6 km<sup>2</sup>), que inclui a sub-bacia do Pirai (1.004,5 km<sup>2</sup>); Guandu<sup>1</sup> (1.396,6 km<sup>2</sup>); da Guarda (334,6 km<sup>2</sup>); Guandu Mirim (175 km<sup>2</sup>); do canal Itá (97,3 km<sup>2</sup>); e Mazomba (96 km<sup>2</sup>), totalizando 18.852,1 km<sup>2</sup> Figura 2.1.

## 2.3 Material e Métodos

As mudanças na rede hidrográfica e no delta da bacia do Guandu ao longo do tempo foram revistas a partir de um extenso levantamento de documentos históricos, mapas e cartas náuticas realizado na Biblioteca Nacional (BN) e no Museu Nacional (MN), onde foram reunidos:

27 mapas geográficos (1767 a 1999): LEÃO (1767), SN (1767), ROSCIO (1777), S.N. (18??), S.N. (1823), SN (1830), PENHA (1830), NIEMEYER (1839), MAHLMANN (1848), VILLIERS (1850), BELLEGARDE e NIEMEYER (1857), RENSBURG (1865), SN (1866), LAEMMERT (1866), SN (1879), CARVALHO (1887), CARVALHO (1888), MASSOW (1892), CCC (1907), FREIRE (1911), CCGE (1922), BRASIL (1922), BACKHEUSER (1925), GÓES (1942), DGE (1960), DBGEX (1999) e IMUPP (2007).

04 cartas náuticas (1834, 1868, 1935 e 1999): NORIE (1834), MOUCHEZ (1868), DHN (1935) e DHN (1999).

---

<sup>1</sup>Esta bacia foi submetida a uma revisão crítica, ganhando novos formatos, que são diferentes do apresentado pelo SEA/INEA (2010).

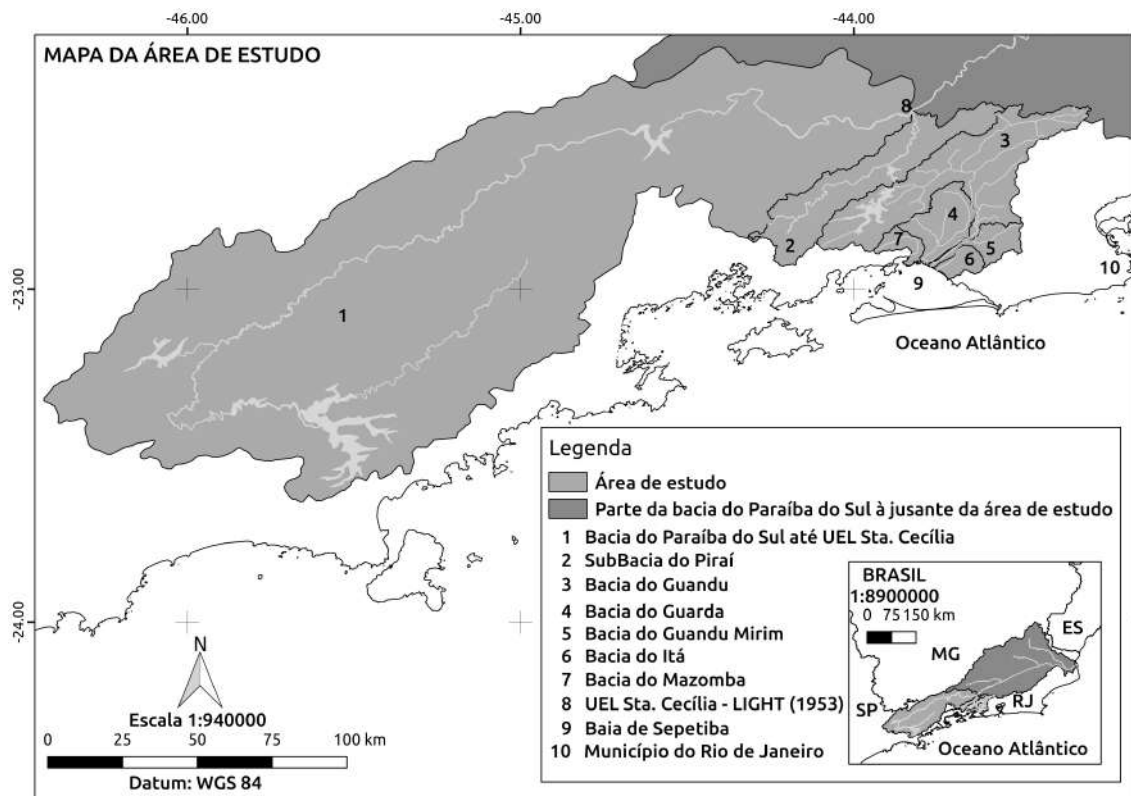


Figura 2.1: Mapa da área de estudo.

Dentre os 27 mapas geográficos encontrados, a carta do Distrito Federal de 1922 (BRASIL, 1922) é o mapa georreferenciado mais antigo. Executado pelo Serviço Geográfico Militar, em 1922, esse mapeamento se destacou dos demais pelo detalhamento e método científico adotados. Esta carta dispõe de um claro sistema de coordenadas e de uma metodologia científica sugerida pela Missão Cartográfica Austríaca, nos projetos de Cartografia implementados, naquela época (CORRÊA, 2008). De acordo com MENEZES e FERNANDES (2007), foi o primeiro mapeamento fotogramétrico do Brasil, onde se adotou a projeção gnomônica, com ponto de tangência, no Observatório Astronômico do Morro do Castelo. Logo, esta carta tornou-se a principal referência geográfica para a verificação e reconstituição histórica de antigos canais hoje inexistentes ou alterados.

Para reconstituição da linha de costa, o estudo contou com mapas (BRASIL, 1922) e imagens de satélite do *Landsat*, de 1984 a 2016, extraídas do *Google Earth Engine*<sup>2</sup>. Aerofotogramas da FUNDREM (1975) na escala 1:40.000 e 1:8.000, fotografias aéreas e terrestres e documentação escrita de diversas fontes complementaram o acervo histórico. Os dados georeferenciados foram digitalizados e tratados no *software Quantum Gis*<sup>®</sup>. Algumas informações extraídas das imagens e mapas, como antigos canais e estruturas, foram complementadas com visitas de campo, com in-

<sup>2</sup><https://earthengine.google.com/timelapse/>

tuito de confirmá-las no terreno referenciado. A quantificação do assoreamento do complexo deltaico foi possível através da digitalização e comparação das cartas náuticas de 1868, 1935 e 1999.

A reconstituição da largura dos rios, canais e valas nas diferentes configurações do trecho inferior do rio Guandu, foram extraídas dos estudos de GAMA (1875) e GÓES (1942), das imagens de satélite *Google Earth*<sup>®</sup> e das visitas de campo.

A estimativa para perda de solos, na bacia original do rio Guandu foi baseada no mapa de perda do solo do estado do Rio de Janeiro, produzido pela EMBRAPA (COSTA *et al.*, 2005). A contagem dos *pixels*, dentro da área da bacia original do rio Guandu, permitiu estimar o percentual de cada classe (cores) de perda de solo e a quantidade total de solo perdido anualmente.

Um modelo analítico simples é proposto para avaliar as mudanças no leito do rio Guandu após a conclusão da transposição Paraíba do Sul-Piraí-Guandu. Esse modelo é utilizado quando se é possível assumir que as flutuações na quantidade de água e material do leito que chegam a montante, não são importantes para explicar as relações qualitativas entres essas variáveis e a declividade do leito, diâmetro mediano do grão e profundidade média do canal (ver em JANSEN *et al.* (1979) p.119). Ao aplicar este modelo ao trecho aluvial, as mudanças na profundidade média (h) e na declividade do leito podem ser explicadas pelas mudanças na descarga média líquida (Q) e sólida (S) a montante, e na largura média do trecho (L) (ver em DE VRIEND (2011) p. 26 ):

$$h = \left( \frac{S}{aL} \right)^{\frac{1}{b}} \frac{Q}{L}, \quad (2.1)$$

$$D = \left( \frac{S}{aL} \right)^{\frac{3}{b}} \frac{L}{C^2 Q}, \quad (2.2)$$

Onde L é a largura do canal (m), C é o coeficiente de Chezy, a é um coeficiente de proporcionalidade e b é um expoente constante.

Por restrições de dados, a resposta do leito do rio foi avaliada apenas no trecho do canal de São Francisco. No caso, reconhecendo que a operação da usina hidrelétrica gera flutuações horárias na descarga defluente, assumiu-se para uso qualitativo, que essa flutuação não foi importante na escala de tempo considerada. Duas situações de equilíbrio são comparadas: a situação anterior e aquela posterior à transposição.

A descarga líquida média a montante (Q) foi extraída da soma da vazão naturais média de longo termo da bacia e vazões regularizadas médias defluente das barragens, subtraídas as captações de grandes usuários. As vazões naturais médias de longo termo das sub-bacias do Guandu foram obtidas do estudo de regionalização de

vazões, realizado pela ETEP/ECOLOGUS/SM (1998). A regionalização das vazões médias de longo termo foi realizada com base nos dados de nove postos situados na bacia, no período de 1931 a 1975. A vazão natural média de longo termo do rio Pirai foi extraída de FEEMA (1985). A vazão média defluente da transposição de bacias Pirai-Guandu foi calculada pela soma das contribuições do ribeirão das Lajes e da derivação do reservatório de Tocos (FEEMA, 1985). A vazão média defluente da transposição Paraíba do Sul-Pirai-Guandu foi calculada a partir da série de vazões médias diárias do posto fluviométrico usina hidrelétrica (UHE) Pereira Passos para o período 1952 a 2012, e que está disponível no banco de dados da Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (Figura 2.2).

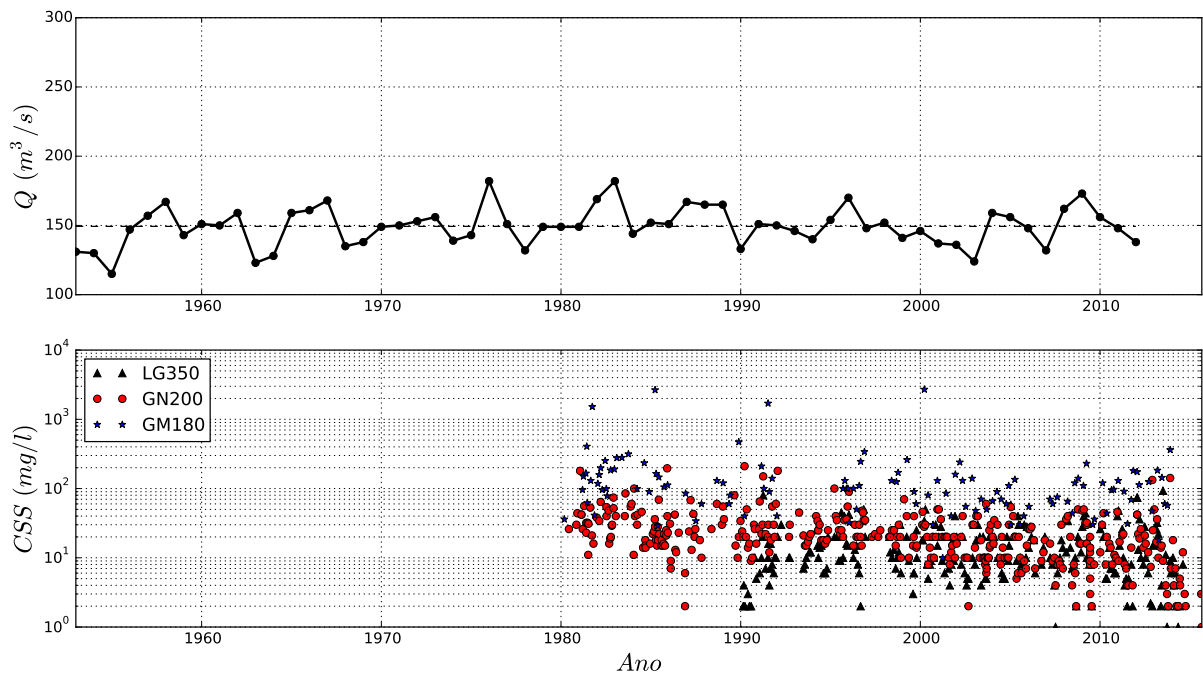


Figura 2.2: Série de vazão média diária a jusante da UHE Pereira Passos extraído da ONS e série de concentração sólidos suspensos totais a jusante de Pereira Passos (LG350), a jusante da ETA Guandu (GN200) e no rio Guandu Mirim (GM180).

Por restrição de dados, a declividade do canal foi avaliada apenas no trecho do canal de São Francisco. A declividade e a largura média do canal de São Francisco na fase anterior e posterior à transposição final foram extraído de GÓES (1942) e VINZON e CASSAR (1998), respectivamente.

A resposta imediata do leito ao aumento súbito da vazão, devido à transposição foi avaliado em ordem de grandeza, a partir da fórmula de transporte de fundo de Schoklitschs (1943) (YANG, 1996). O cálculo da estimativa da descarga anual de sólidos de fundo ( $Q_{st}$ ) é baseado na descarga líquida crítica por unidade de largura ( $q_c$ ), para gravidade específica do sedimento igual a 2,65 (YANG, 1996):

$$q_c = \frac{0,6d_{50}^{1,5}}{D^{1,1667}}, \quad (2.3)$$

$$q_{sl} = 2,500D^{1,5}\left(\frac{Q}{L} - q_c\right), \quad (2.4)$$

$$Q_{sl} = 31,536q_{sl}L, \quad (2.5)$$

Onde  $q_{sl}$  é a descarga sólida do leito por unidade de largura. Baseado na composição da Formação Piranema (GOES, 1994) e nos valores encontrados nos estudos hidrossedimentológicos, de 1997, no rio Guandu (VINZON e CASSAR, 1998),  $d_{50}$  ficou entre 0,25 a 1,00 mm.

Os dados de perda de solo da bacia do Guandu com resolução espacial de cálculo de até 90 x 90 m foram obtidos a partir do estudo da EMBRAPA - Solos, para bacias do estado do Rio de Janeiro. Este estudo usou a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) (COSTA *et al.*, 2005), desenvolvida para quantificação da perda de solo por erosão laminar em escala agrícola, a partir de parâmetros como clima, solo, relevo, uso e manejo. Em escala regional, sua aplicação pressupõe imprecisões, uma vez que foi calibrada por dados oriundos de experimentos controlados de pequena escala, desconsiderando, por exemplo, movimentos de massa e acumulação de sedimentos (COSTA *et al.*, 2005). Por isso, estes dados serão avaliados em termos qualitativos e de ordem de grandeza.

O monitoramento sistemático da descarga de sólidos totais em suspensão na bacia do Guandu é recente. Logo, a comparação ficou limitada ao período de 1980 a 2015. Essas séries temporais encontram-se no banco de dados de qualidade de água do INEA. Nesse capítulo foram utilizados três estações de qualidade de água: LG350, GN200 e GM180 (Figura 2.3 e Figura 2.2)). A estação LG350 representou a concentração de sólidos suspensos, oriunda da transposição Paraíba do Sul-Piraí-Guandu. A estação GN200 representou a concentração de sólidos suspensos que chega à ETA-Guandu e ao canal de São Francisco. A estação GM180 representa a concentração de sólidos em suspensão que chega ao canal do Guandu.

A estimativa da descarga de sólidos totais suspensos oriunda do lançamento de esgoto doméstico não tratado, na bacia do Guandu, baseou-se em valores típicos e foi calculada da seguinte maneira:

$$Q_{ss} = (365(CST_e)Q_{el}N_h 10^{-9})0,463, \quad (2.6)$$

Onde  $Q_{el}$  é a descarga anual de sólidos totais em suspensão produzida pelos

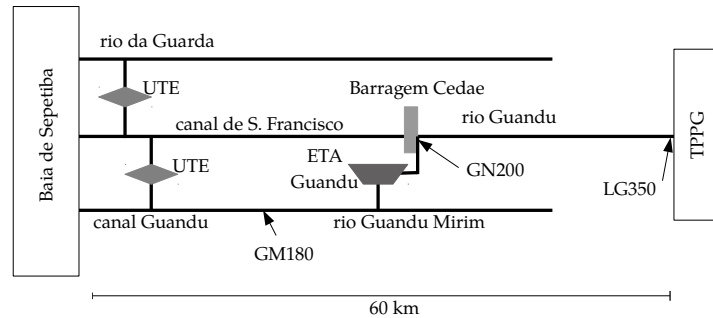


Figura 2.3: Diagrama unifilar do trecho inferior do rio Guandu nos dias de hoje mostrando as estações de monitoramento de sólidos totais em suspensão: TPPG - transposição de bacias Paraíba do Sul-Piraí-Guandu; UTE - usina termoelétrica; ETA - estação de tratamento de água; LG350, GN200, GM180 - Estações de monitoramento de sólidos totais em suspensão do INEA.

efluentes domésticos (t/ano). O número total de habitantes residentes na bacia do Guandu, ( $N_h$ ) foi calculado a partir do censo municipal de 2015 (IBGE) e ponderado pela proporção da área de cada município dentro da bacia.  $S$  é a proporção dessa população que não é atendida pela rede coletora de esgoto e que lança seus efluentes domésticos diretamente nos rios da bacia. O  $S$  adotado foi de 0,463 (46,3 %)(SONDOTECNICA, 2006). O valor típico adotado para concentração de sólidos totais em suspensão presente em efluentes domésticos ( $CST_e$ ) foi de 360 mg/l, referente a esgoto forte (PACHECO JORDÃO e ARRUDA PESSÔA, 2005). Ao seguir os valores típicos sugeridos pelo NBR 7229 – ABNT, o presente estudo adotou o volume diário de efluente doméstico produzido por um habitante urbano ( $Q_{el}$ ) de 200 l/hab.dia.

As séries temporais das captações e lançamentos dos usuários no rio Guandu e no canal de São Francisco, não estão disponíveis ao público. Assim, foram usadas, como substituto, as outorgas que foram atualizadas e listadas por COELHO e ANTUNES (2012).

A descarga de sólidos totais em suspensão, lançada pela ETA-Guandu, proveniente da lavagem dos filtros e remoção do lodo dos tanques de decantação, foi estimada somando a quantidade captada, a partir da estação GN200. A vazão do efluente é de aproximadamente 3 m<sup>3</sup>/s. Não foi considerado o gasto diário no tratamento dos sólidos suspensos: 140 t de sulfeto de alumínio e 30 t de cloreto férrico.

## 2.4 Aspectos geológicos e geomorfológicos

A área de estudo se insere em: afloramentos de rochas cristalinas ígneas e metamórficas de idade Pré-Cambriana, intrusivas alcalinas e básicas de idade Mesozóica e litologias mais jovens formadas por sedimentos coluviais, marinhos e fluviais do

Cenozoico (Figura 2.4 e Figura 2.5) (SONDOTECNICA, 2006). A região encontra-se estruturada em um sistema de *rifts*, com ombreiras, formando a serra do Mar e da Mantiqueira, e depressões preenchidas por sedimentos cenozoicos, formando o vale do Paraíba (*Rift* da Paraíba do Sul) e a baixada de Sepetiba (*Rift* litorâneo) (Figura 2.6) (ZALÁN e OLIVEIRA, 2005). Os vales das bacias do Paraíba do Sul até UEL Santa Cecília e Piraí encontram-se acima da cota de 351,5 m e cercado por serras com o cume mais alto a 2.791,6 m (Figura 2.7 ). A bacia do Guandu fica próxima ao nível do mar junto à baía de Sepetiba e ao fundo cercado por um conjunto de serras, que atinge a altitude máxima de 1.750 m (Figura 2.8).

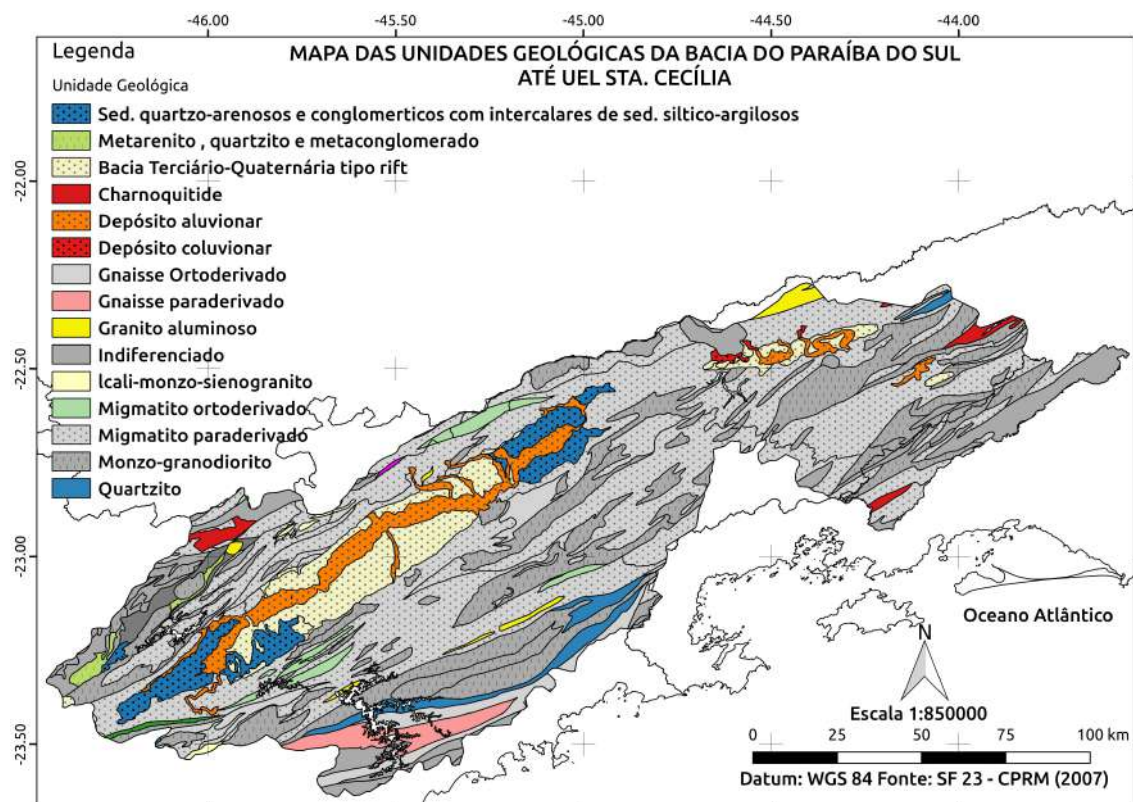


Figura 2.4: Mapa geológico da bacia Paraíba do Sul até UEL Sta. Cecília.

Em termos de unidades geomorfológicas da bacia original do Guandu, a faixa altimétrica acima de 80 m é formada por encostas estruturais costeiras, vales estruturais e rampas de colúvios, enquanto que a faixa altimétrica abaixo é formada por colinas aplainadas, planícies colúvio-aluvionares, flúvio-lacustres e flúvio-marinhas (GOES, 1994). No leito do rio Guandu, agentes hidrodinâmicos modelam a paisagem com os sedimentos da Formação Piranema. Essa Formação é constituída por duas fácies sedimentares: uma fácies arenosa pleistocênica, situada entre 2 e 5 m de profundidade, com 50 a 70 m de espessura, seguida por uma fácies siltico-argilosa Holocênica no topo (Figura 2.9) (GOES, 1994).



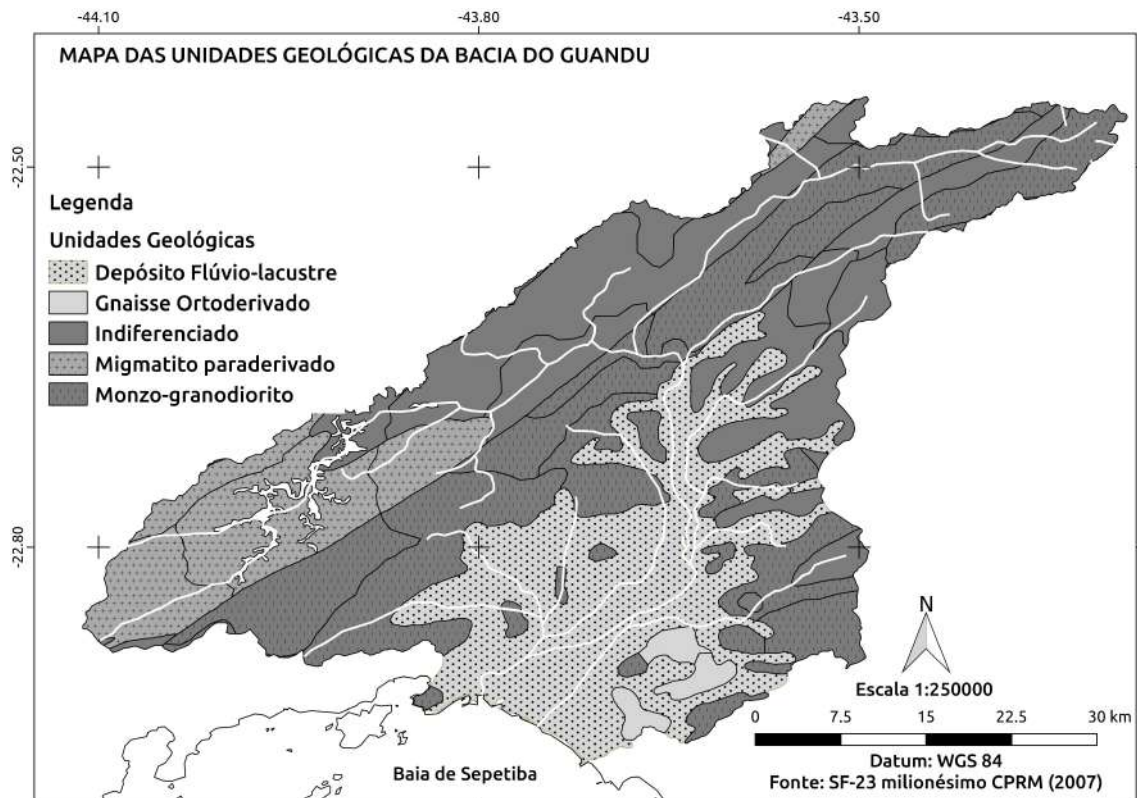


Figura 2.5: Mapa geológico da bacia do Guandu.

## 2.5 Climatologia

O clima da região é subtropical úmido com inverno mais seco, como pode ser observado na caracterização mensal de 6 postos climatológicos, divididos por trecho alto e baixo de cada bacia (Figura 2.10 e Figura 2.11). A temperatura média anual das bacias do Paraíba do Sul, Piraí e Guandu foi de, respectivamente 19,9° C, 20,6° C e 22,4° C, respectivamente (Tabela 2.1). A precipitação acumulada anual média das bacias do Paraíba do Sul, Piraí e Guandu foi de 1.789,2 mm, 1.500,0 mm e 1.525 mm, respectivamente (Tabela 2.1, Figura 2.12 e Figura 2.13). Com base nessas características a estação chuvosa foi definida entre novembro a abril e a estação seca, de maio a outubro.

A climatologia da região é controlada em grande parte, pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), secundariamente, pelas frentes frias e, localmente, por efeitos orográficos e pela proximidade com o oceano. Na Figura 2.14, por exemplo, mostra a dominância da ZCAS durante o mês de janeiro de 2010, com uma zona chuvosa bem definida cortando as regiões sudeste e centro-oeste do Brasil. A distribuição da precipitação, ao longo da ZCAS, determina verões mais ou menos chuvosos em relação à média. A frente fria, por sua vez, quando acompanhada de precipitação, ameniza a escassez de chuva característica do inverno.

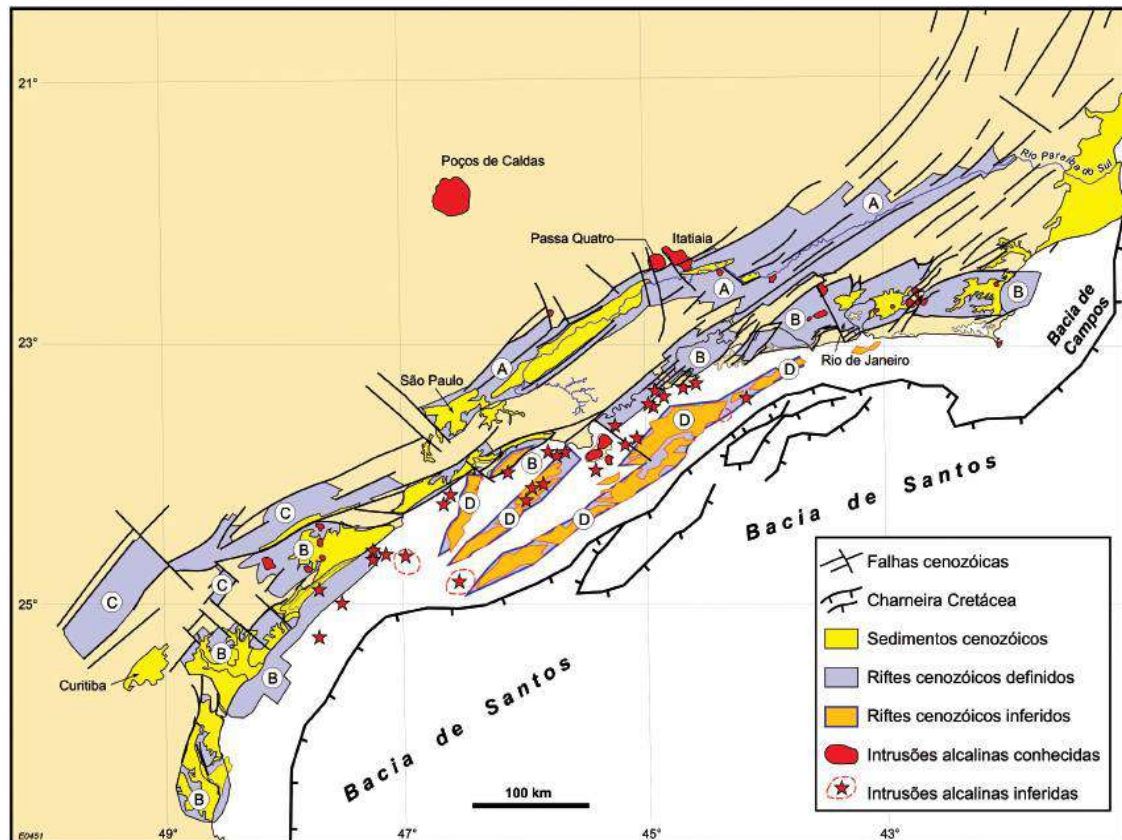


Figura 2.6: Sistema de *rifts* cenozoicos do sudeste brasileiro: (A) *Rift* Paraíba do Sul; (B) *Rift* litorâneo; (C) *Rift* da Ribeira; e (D) *Rift* da marítimo (Extraído de ZALÁN e OLIVEIRA (2005).

## 2.6 Solo e Cobertura vegetal primária

Na bacia do rio Paraíba do Sul, predomina o latossolo vermelho-amarelo e na bacia do Guandu predomina o argilossolo vermelho-amarelo com dominância do planossolo háplico na baixada (Figura 2.15 e Figura 2.16).

A área de estudo encontra-se sob domínio do bioma florestal Mata Atlântica (COMITÊ, 2006). Nas serras e ambientes úmidos da bacia do Paraíba do Sul, pre-valectiam florestas ombrófilas, seguida por uma área menor, ao norte, com floresta estacional semidecidual (Figura 2.17). A bacia do Guandu era dominada integralmente por florestas ombrófilas (Figura 2.18). Dentro desse tipo de ecossistema florestal, existiam florestais paludosas e brejais, ocupando as áreas alagáveis; restingas nos cordões arenosos litorâneos e manguezais nos ambientes estuarinos (SONDO-TECNICA, 2006).

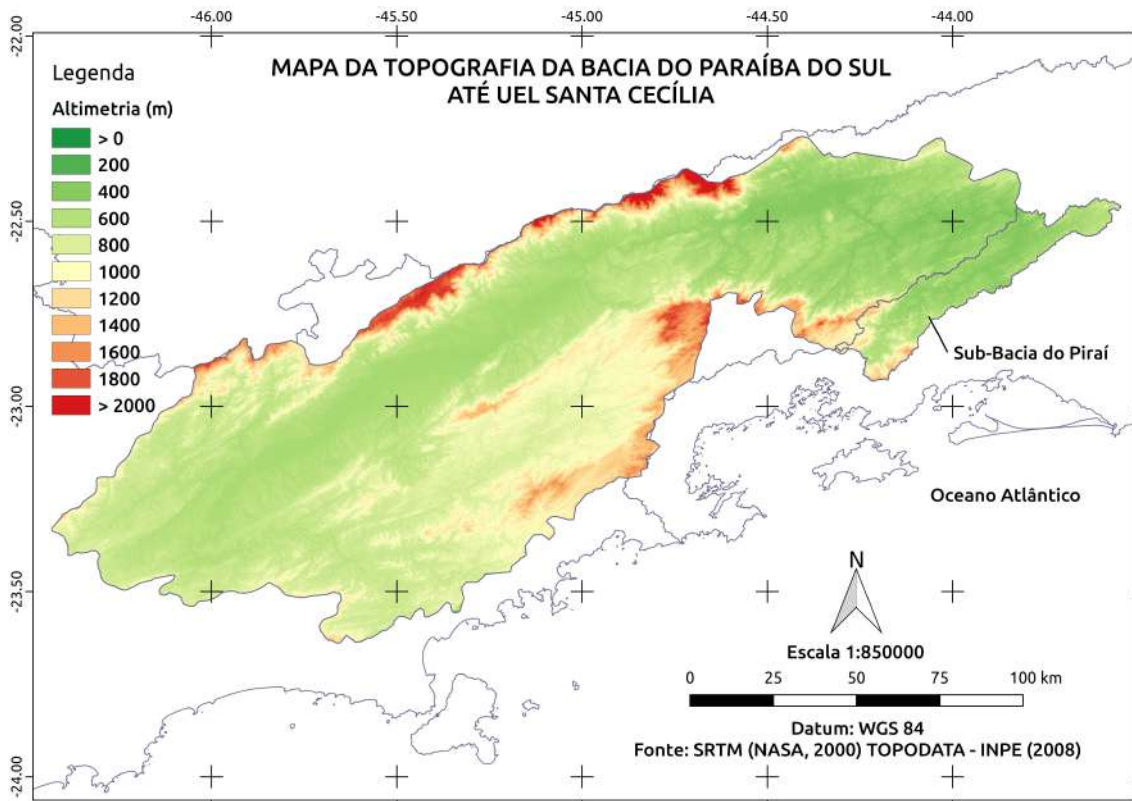


Figura 2.7: Mapa topográfico da bacia Paraíba do Sul até UEL Sta. Cecília.

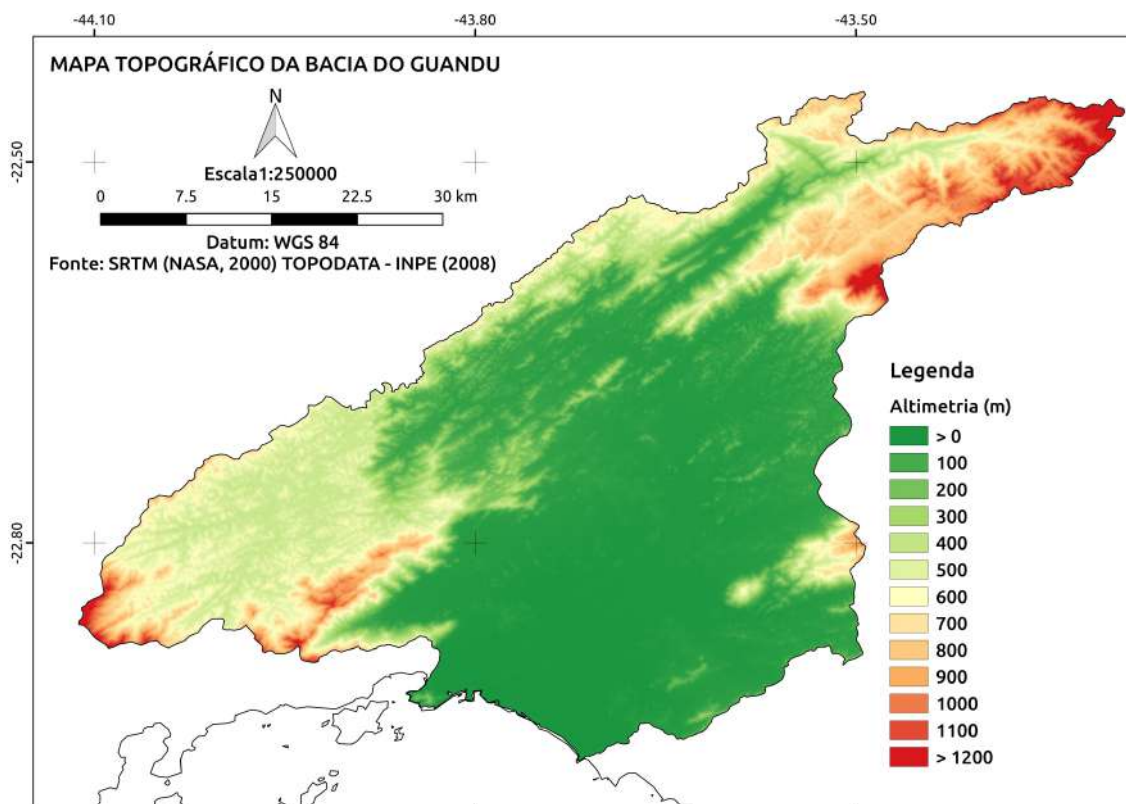


Figura 2.8: Mapa topográfico da bacia do Guandu.

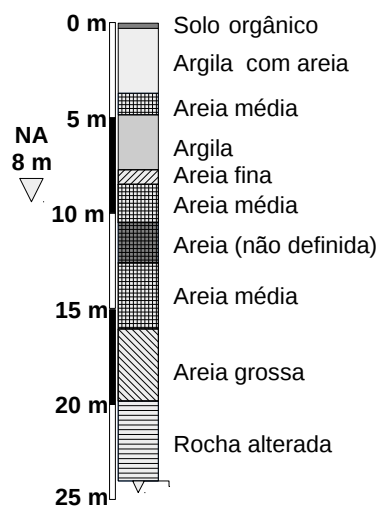


Figura 2.9: Perfil estratigráfico da formação sedimentar Piranema (SONDOTECNICA, 2006). O triângulo invertido representa a altura do lençol freático.

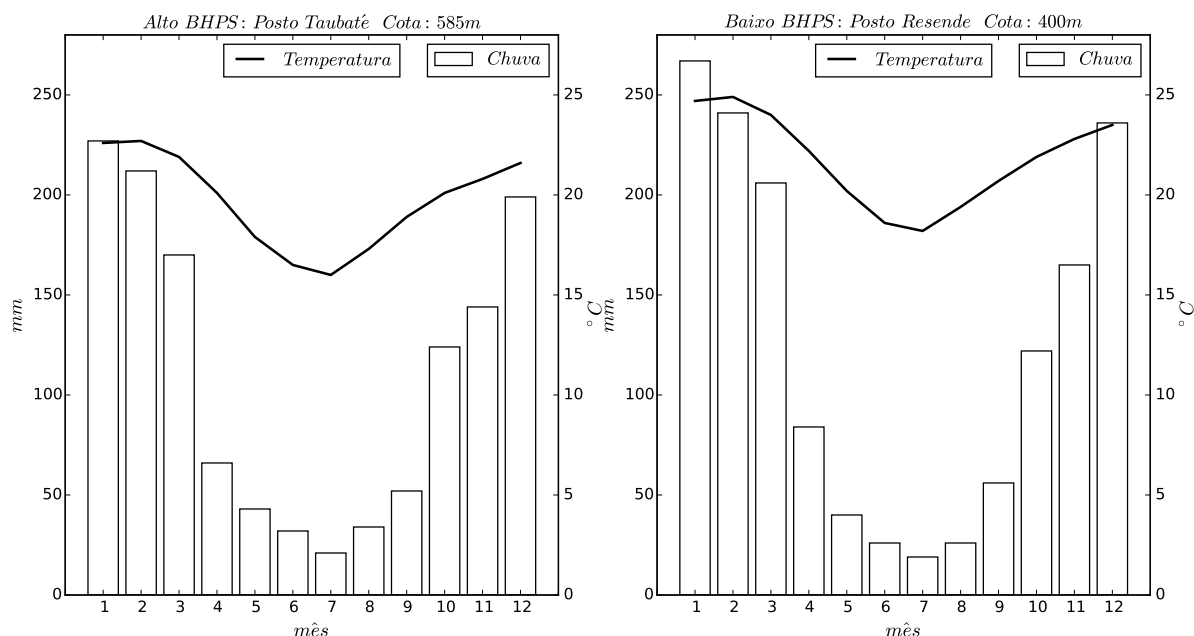


Figura 2.10: Climograma dos trechos alto e baixo da bacia do Paraíba do Sul.

## 2.7 Hidrografia original

A potamografia original dos rios da bacia do Guandu era bem distinta, formada pelos rios da bacia do Guandu Açú (atual Guandu), do Guandu Mirim e do Itaguahy (atual Guarda). Separada pela serra do Mar, a descarga líquida e sólida da bacia do Paraíba do Sul e do seu afluente Piraí desaguavam integralmente no oceano mais ao norte, no município de Atafona, norte fluminense.

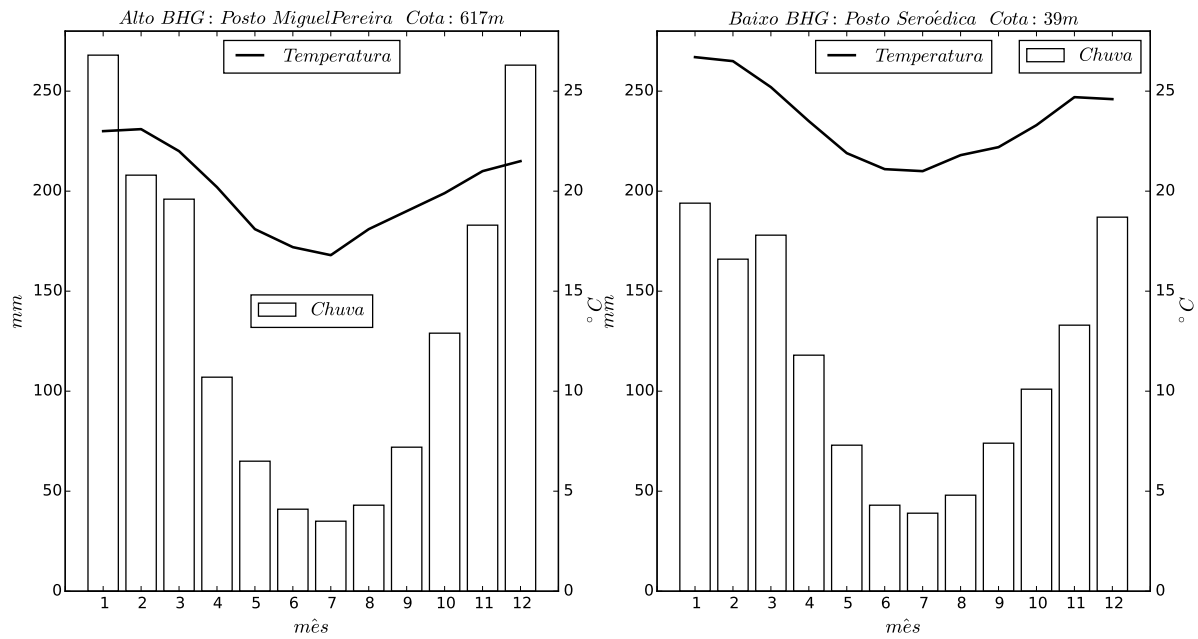


Figura 2.11: Climograma dos trechos alto e baixo da bacia do Guandu.

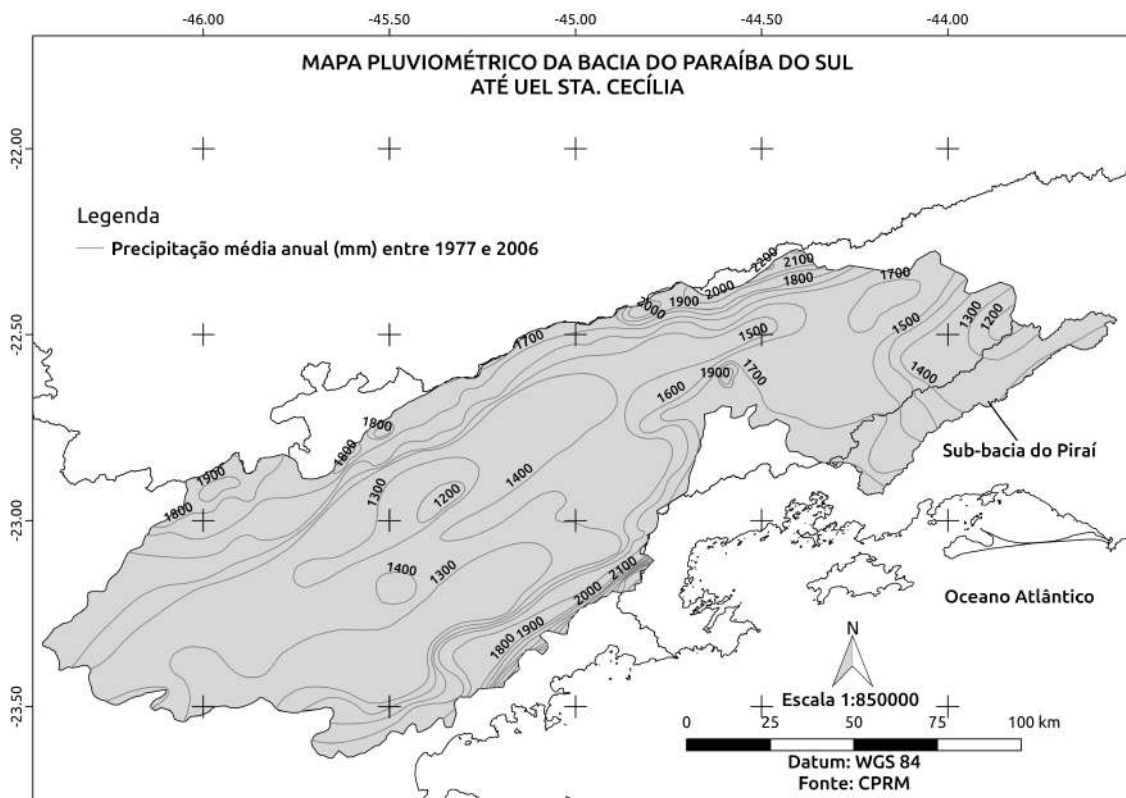


Figura 2.12: Mapa pluviométrico da bacia Paraíba do Sul até UEL Sta. Cecília. A isoieta representa a precipitação média acumulada anual para o período de 1977 a 2006.

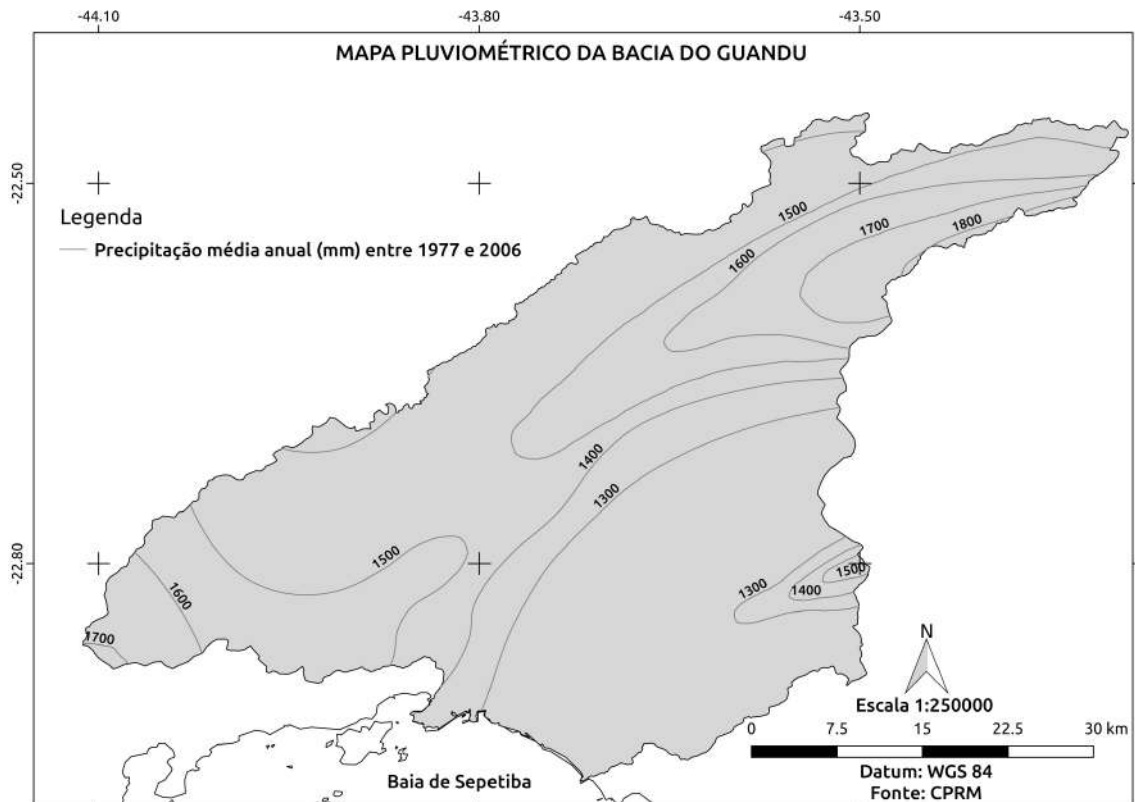


Figura 2.13: Mapa pluviométrico da bacia do Guandu. A isoieta representa a precipitação média acumulada anual para o período de 1977 a 2006.

### 2.7.1 Bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul

A parte de interesse da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, envolveu todo o trecho alto da bacia (ou trecho paulista) e parte do trecho médio do Paraíba do Sul até UEL Sta. Cecília na cota 351,5 m (Figura 2.19). Neste ponto mais a jusante, a vazão natural é 269 m<sup>3</sup>/s (Tabela 2.2). O rio nasce a 1.800 m de altitude, no município de Areias (SP), formando o rio Paraitinga, que, ao confluir com o rio Paraibuna, recebe o nome de Paraíba do Sul. Ao longo do seu curso até a UEL Sta. Cecília, o rio recebe cerca de 41 afluentes (COHIDRO, 2014).

### 2.7.2 Bacia hidrográfica do rio Pirai

A bacia do rio Pirai originalmente pertencia integralmente à bacia do Paraíba do Sul, desaguardo na altura de Barra do Pirai, próximo a cota 351,5 m (Figura 2.19). Atualmente quase todo o seu volume é desviado para a bacia do rio Guandu. O rio Pirai nasce nas serras do distrito de Lídice, em Rio Claro (RJ), a cerca de 1.600 m de altitude. Esta bacia chega a produzir uma vazão natural de 20,7 m<sup>3</sup>/s, recebendo contribuição de 4 afluentes principais (Figura 2.19).



Tabela 2.1: Sumário climatológico da bacia do Paraíba do Sul até UEL Sta. Cecília (BHPS\*), rio Pirai (SbHP) e rio Guandu original (BHG). T é a temperatura média anual ( $^{\circ}$  C) e P é a precipitação acumulada anual média (mm).

Característica	BHPS*	SbHP	BHG
Cota mín. (m)	351,5	351,5	0,0
Cota máx. (m)	2.791,5	2.750,0	1.750,0
T <sup>(a)</sup> ( $^{\circ}$ C)	19,9	20,6	22,4
Máx. T ( $^{\circ}$ C)	21,8	21,2	23,5
Mín. T ( $^{\circ}$ C)	16,8	19,9	20,0
P <sup>(b)</sup> (mm)	1.789,2	1.500,0	1.525,0
Máx. P (mm)	2.500,0	1.800,0	1.800,0
Mín. P (mm)	1.200,0	1.200,0	1.300,0

<sup>(a)</sup> Quantidades de estações: 50, 5 e 10, respectivamente. Fonte: <http://pt.climate-data.org>.

<sup>(b)</sup> Série histórica de 1977-2006 (PINTO *et al.*, 2011).

Tabela 2.2: Sumário hidrológico da bacia do Paraíba do Sul até UEL Sta. Cecília (BHPS\*) e das sub-bacias do Pirai (SbHP), do Guandu original (BHG). RPS: rio Paraíba do Sul, BS: Baía de Sepetiba, RGA: rio Guandu Açú, Q: vazão média de longo termo.

Característica	BHPS*	SbHP	BHG
Área (km <sup>2</sup> )	16.752,6	1.004,5	2.002,2 <sup>(a)</sup>
Nascente (rio)	Paraitinga <sup>(b)</sup>	Pirai <sup>(b)</sup>	Santana <sup>(c)</sup>
Cota nascente (m)	1.800,0 <sup>(b)</sup>	1.600,0 <sup>(b)</sup>	1.200,0 <sup>(c)</sup>
Receptor à jusante	RPS	RPS	BS
Cota jusante (m)	351,5 <sup>(c)</sup>	351,0 <sup>(c)</sup>	0,0
Q (m <sup>3</sup> /s)	296,0 <sup>(c)</sup>	20,7 <sup>(c)</sup>	65,7 <sup>(e)</sup>

\* Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul até UEL Sta. Cecília.

<sup>(a)</sup> Formada pelas bacias do Guandu, Guarda, Mazomba e Guandu Mirim.

<sup>(b)</sup> COHIDRO (2014).

<sup>(c)</sup> SEMADS (2001).

<sup>(d)</sup> FEEMA (1985).

<sup>(e)</sup> Ver em Tabela 2.3.

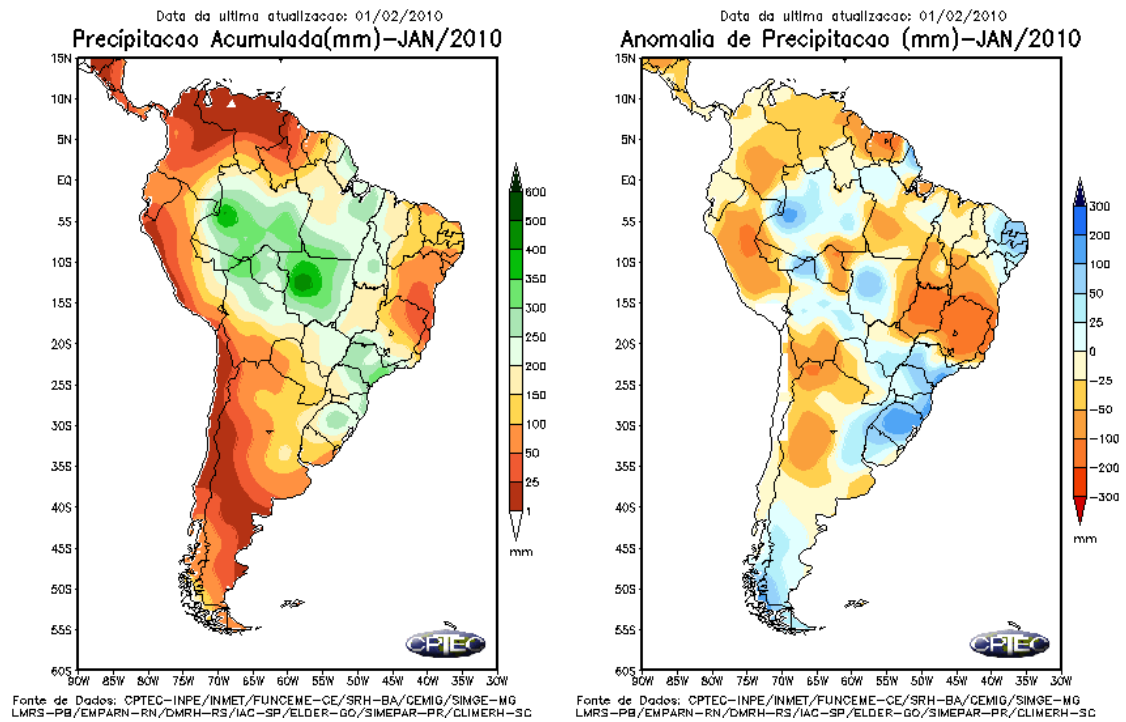


Figura 2.14: Precipitação mensal e anomalia de precipitação (mm) para janeiro 2010. As anomalias são desvios das médias mensais em relação à climatologia do INMET (1961 a 1990) (fonte: CPTEC/INPE).

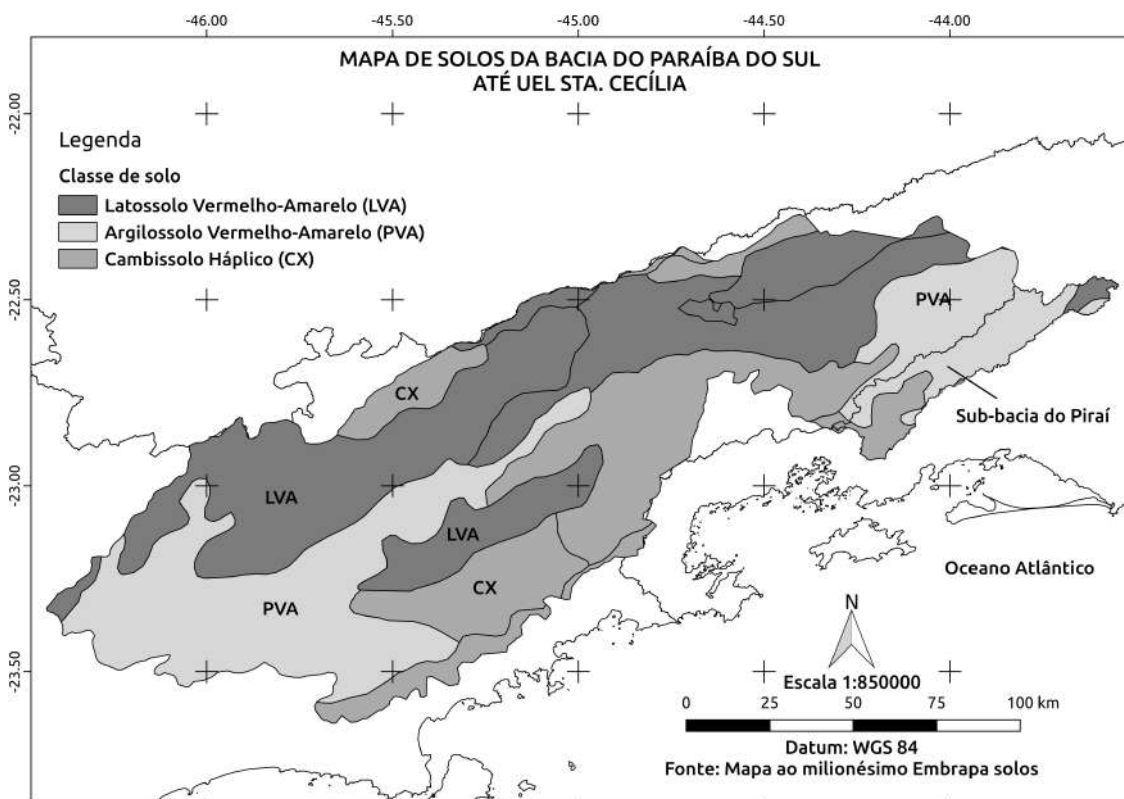


Figura 2.15: Mapa pedológico da bacia Paraíba do Sul até UEL Sta. Cecília.



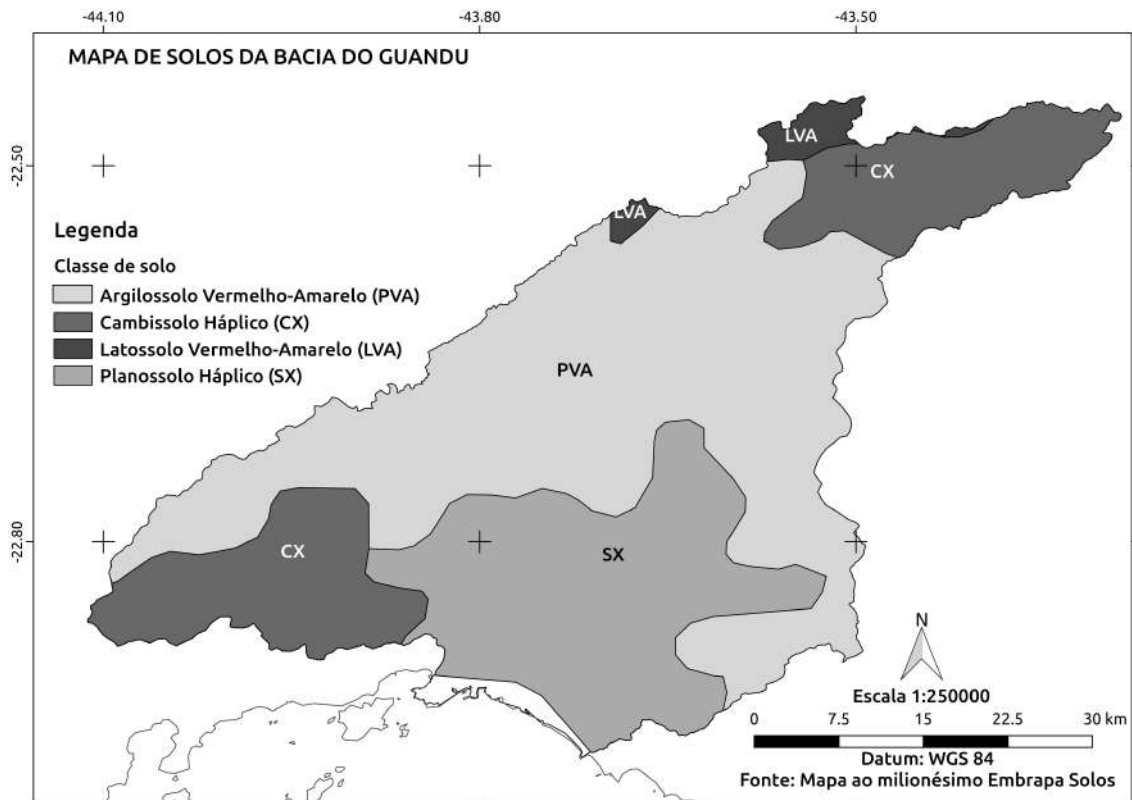


Figura 2.16: Mapa pedológico da bacia do Guandu.

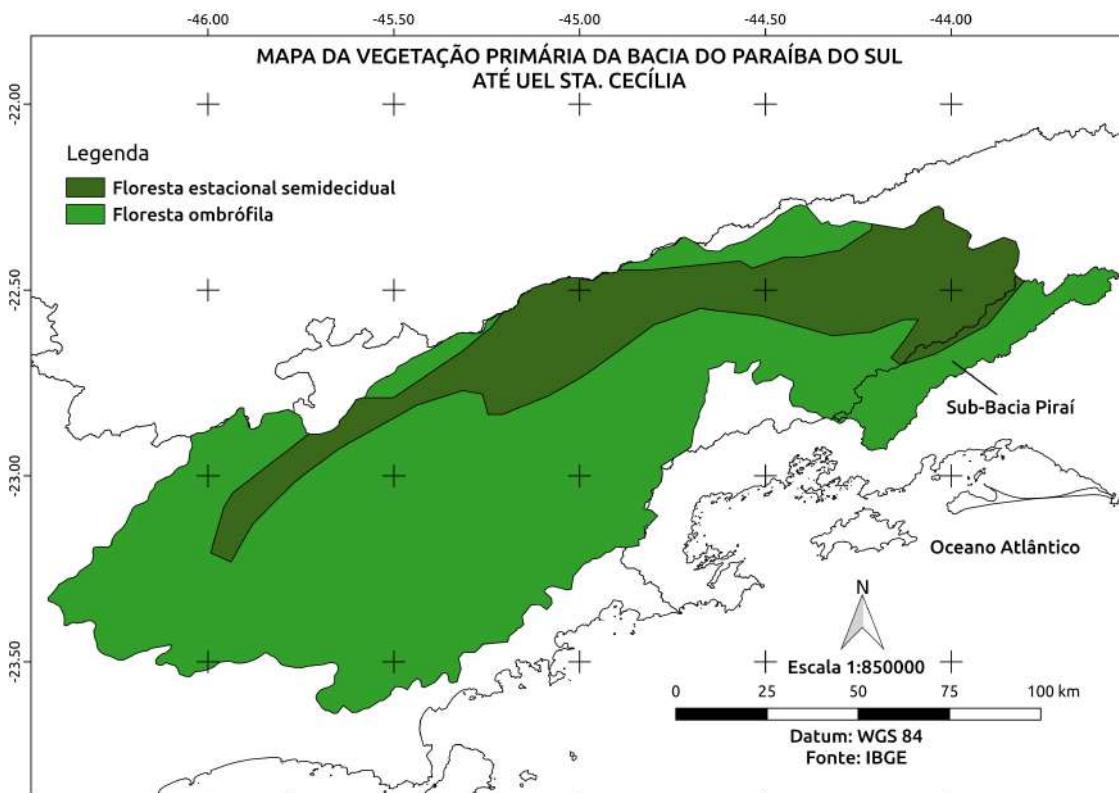


Figura 2.17: Mapa da vegetação primária da bacia do Paraíba do Sul até UEL Sta. Cecília.



Figura 2.18: Mapa da vegetação primária da bacia do rio Guandu.

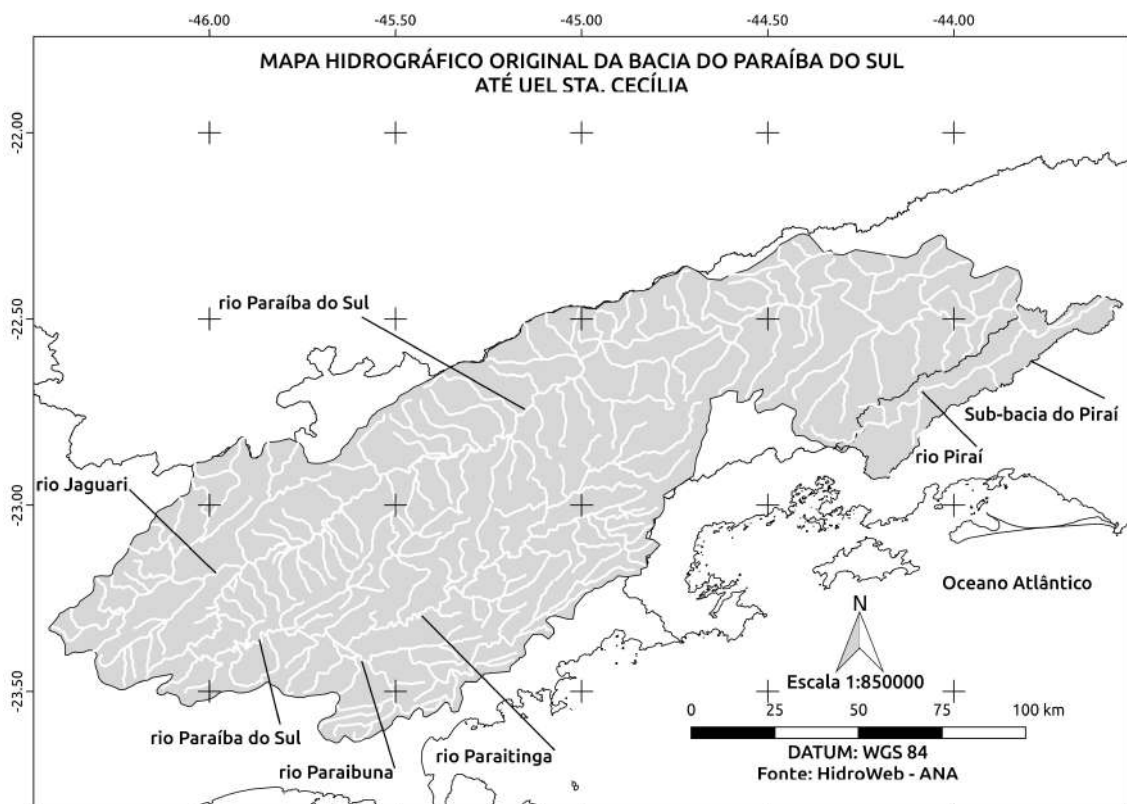


Figura 2.19: Hidrografia da bacia do Paraíba do Sul até UEL Sta. Cecília.

### 2.7.3 Bacia hidrográfica do rio Guandu

Os mapas históricos revelaram diversas sinonímias para rios da bacia do Guandu:

Rio da Guarda: rio Taguai (SN, 1767), rio Taguay (ROSCIO, 1777), rio Itagoay (S.N., 18??), rio Tagui (SN, 1830) , rio Itagouhy (BELLEGARDE e NIEMEYER, 1857), rio Itaguahy (GAMA, 1875), rio Grande (GAMA, 1875) e rio Itaguaí (GÓES, 1942).

Rio Guandu: rio Santa Cruz (NORIE, 1834), rio Guandú Grande (GAMA, 1875), rio Guandú Açú (GAMA, 1875) (GÓES, 1942), rio Guandú Assú (GÓES, 1942).

Rio Guandu Mirim: rio Guandú Merim (S.N., 18??), rio Tinguy (MASSOW, 1892) e rio Tingui (DGE, 1960).

Rio Capenga: rio Cabenga (GÓES, 1942).

A bacia do rio Guandu de hoje reflete a sobreposição de diversas obras hidráulicas, que ocorreram desde o séc. XVIII. A reconstrução de suas características hidrográficas originais foram baseadas em documentos e mapas históricos<sup>3</sup>. Originalmente, a bacia do rio Guandu era formada pela atual bacia do Guandu, da Guarda (antigo Itaguahy), Guandu Mirim e Mazomba, totalizando (2.002,2 km<sup>2</sup>).

Neste período o principal rio formador era o Santana (ou Sta. Ana), que nasce na serra do Tinguá na cota de 1.200 m (Tabela 2.2). O rio recebia o nome Guandu Açú na confluência do rio Santana com o ribeirão das Lajes. Segundo consta nos estudos GAMA (1875), quando os jesuítas começaram a explorar a região, na década de 1590, encontraram um rio que, antes de tangenciar os terrenos mais baixos da baixada de Sepetiba, bifurcava-se em dois ramos desiguais. O ramo maior bifurcava para esquerda e recebia o nome de rio Itaguahy ou rio Grande (atual rio da Guarda) (Figura 2.20). O ramo menor, chamado impropriamente de rio Guandu, cortava os campos, em numerosos meandros, até lançar-se na baía de Sepetiba, a cerca 5,5 km da foz do rio Itaguahy (Figura 2.20). Assim, a bacia dispunha de duas fozes,

---

<sup>3</sup>O mapa da Fazenda Sta. Cruz (S.N., 18??), não datado e de autor desconhecido, descreve o rio Itagoay (atual rio da Guarda) e o rio Guandu como rios independentes. A ficha descritiva fornecida pela Biblioteca Nacional, sugere que este mapa tenha sido confeccionado no séc. XIX, apesar do mapa ser baseado nas medições do tombo da Fazenda, que ocorreram muito antes, em 1596 (GAMA, 1875). De fato, o tipo de letra usado no mapa é semelhante ao encontrado em mapas do séc. XIX. O problema é que, apesar da riqueza de detalhes, a representação dos rios separados diverge muito da descrição presente no trabalho de GAMA (1875) e dos demais mapas históricos, e por isso, o mapa foi descartado na presente análise (Nota do Autor).

Tabela 2.3: Vazão média de longo termo (Q) para as bacias formadoras da bacia do Guandu original. A é a área (km<sup>2</sup>), P é a precipitação acumulada anual média (mm).

Bacias	A (km <sup>2</sup> )	P (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)
Guandu <sup>(a)</sup>	1.396,6	1.464,3	24,6
Guandu mirim	175,0	1.228,0	2,8
Guarda <sup>(a)</sup>	334,6	1.336,8	5,5
Mazomba	96,0	1.450,0	3,0

<sup>(a)</sup> Bacias hidrográficas conforme a SEA/INEA (2010), ver bacia 3 no mapa.

sendo a foz do rio Itaguahy a mais importante. O autor não descreve o traçado do rio Guandu Mirim, para este período, e os mapas são controversos neste ponto. Alguns mapas sugerem que o rio Guandu Mirim desaguava no rio Guandu antes da bifurcação (PENHA, 1830), e outros, sugerem a confluência depois da bifurcação, no ramo menor (BRASIL, 1922). A partir da interpretação dos mapas e de documentos históricos, foi possível reconstruir o traçado original, tendo como base georreferenciada o mapa BRASIL (1922)(Figura 2.22). Visita de campo e reconhecimento, por imagem de satélite, das marcas preservadas no terreno complementaram o estudo de reconstituição do traçado original dos rios e canais da época. Na Figura 2.22 só foram representados os rios Itaguahy, Guandu e Guandu Mirim, excluindo, para fins práticos, outros rios e canais menores, que não contribuíram no entendimento da união ou separação dessas bacias.

Se considerarmos a hipótese de que as condições climáticas e hidrológicas pré-colonização europeia eram similares ao período de medição usado na regionalização das vazões do estudo da ETEP/ECOLOGUS/SM (1998), a vazão natural da bacia, considerando as contribuições da bacia do Guandu (24,6 m<sup>3</sup>/s), Itaguahy (atual Guarda) (5,5 m<sup>3</sup>/s) e Guandu Mirim (2,8 m<sup>3</sup>/s), totalizaria algo em torno de 32,9 m<sup>3</sup>/s. Esta descarga líquida se dividiria em duas fozes, onde a foz do rio Itaguahy era a principal. A análise das imagens de satélite dos antigos meandros preservados na paisagem, permitiu estimar que a largura dos rios Itaguahy e Guandu eram de aproximadamente 15 m e 10 m, respectivamente (Figura 2.23).

Antes da colonização europeia, o trecho baixo do rio Guandu contava ainda com extensos brejais e planícies de inundações. Frequentemente, nos meses de verão, quando as chuvas torrenciais caíam copiosamente na bacia, todo aguaceiro convergia para a baixada, inundando-a, e ali se conservavam por muitos dias, porque os dois rios, Guandu e Itaguahy, não os esgotavam senão lentamente (GAMA, 1875). Os jesuítas relatavam que não era possível distinguir campos, rios e estradas. A





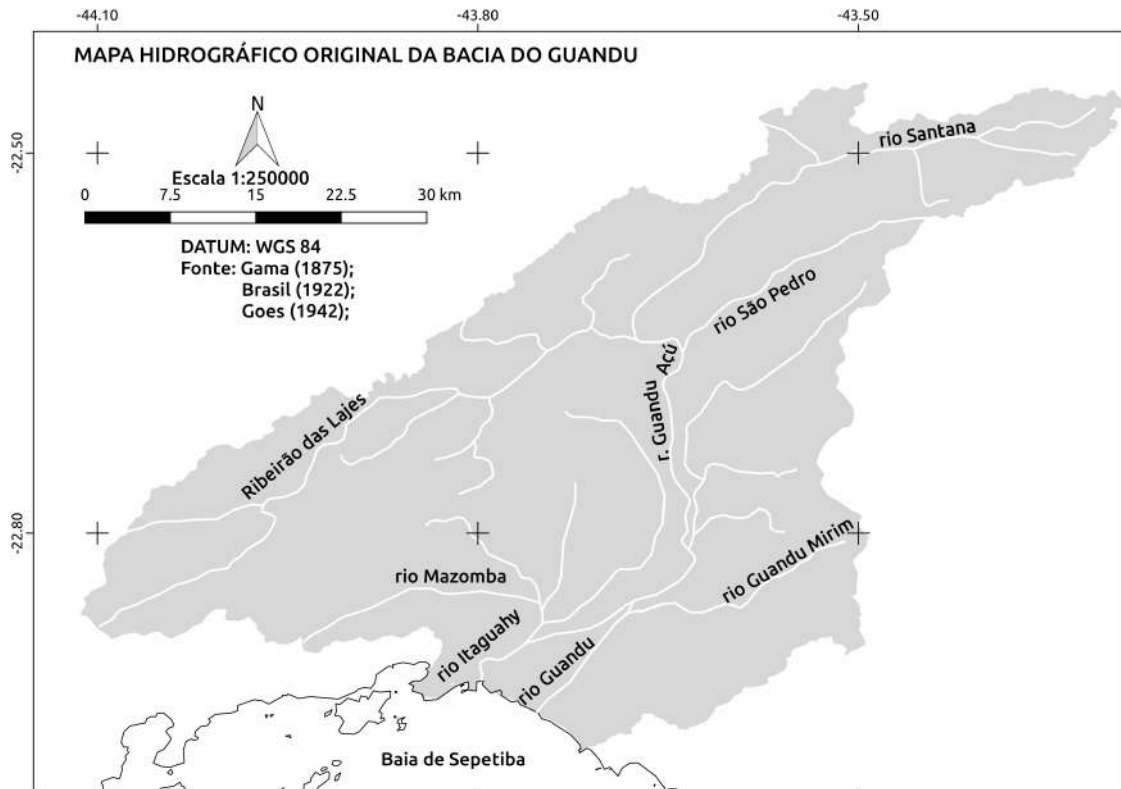


Figura 2.21: Hidrografia original da bacia do rio Guandu.

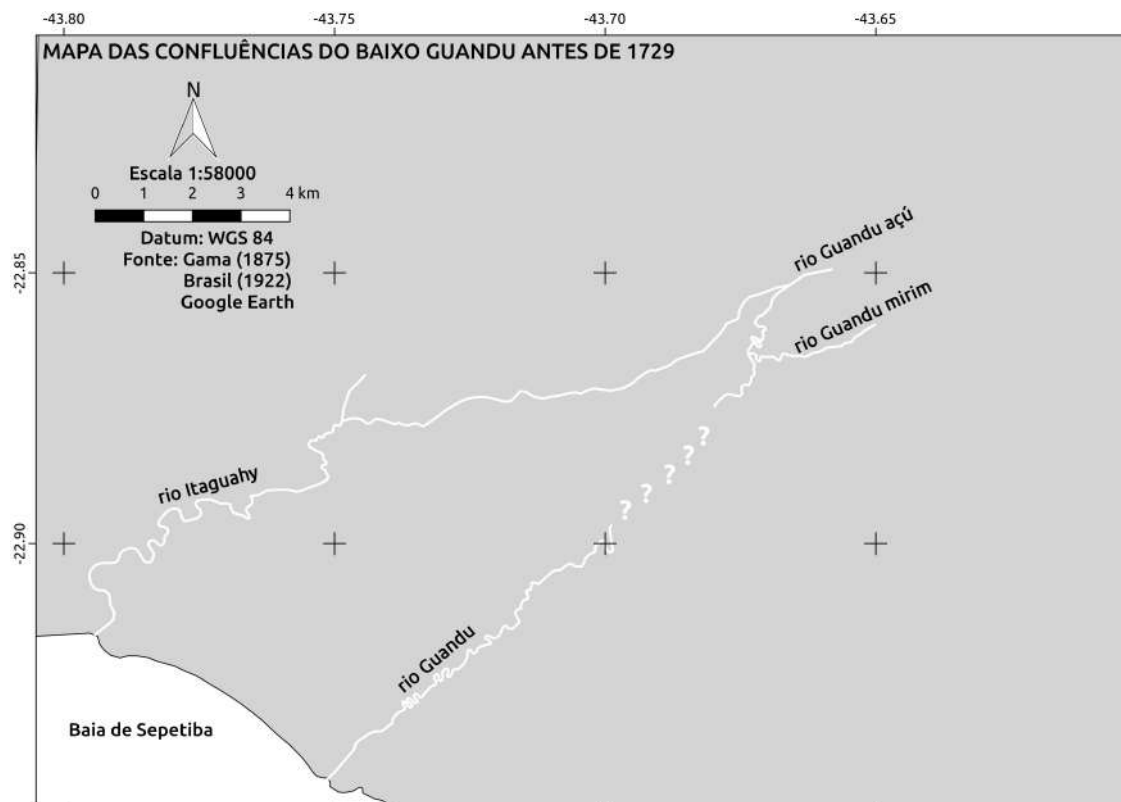


Figura 2.22: Hidrografia detalhando o encontro dos rios Guandu, Itaguahy e Guandu Mirim antes de 1729.

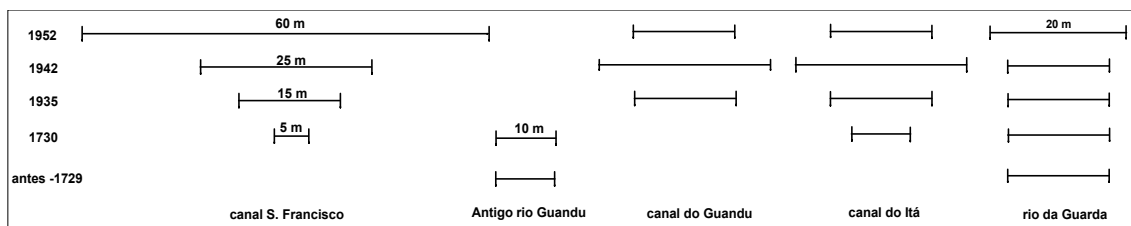


Figura 2.23: Variação temporal da largura média dos rios e canais que formam o trecho baixo do rio Guandu.

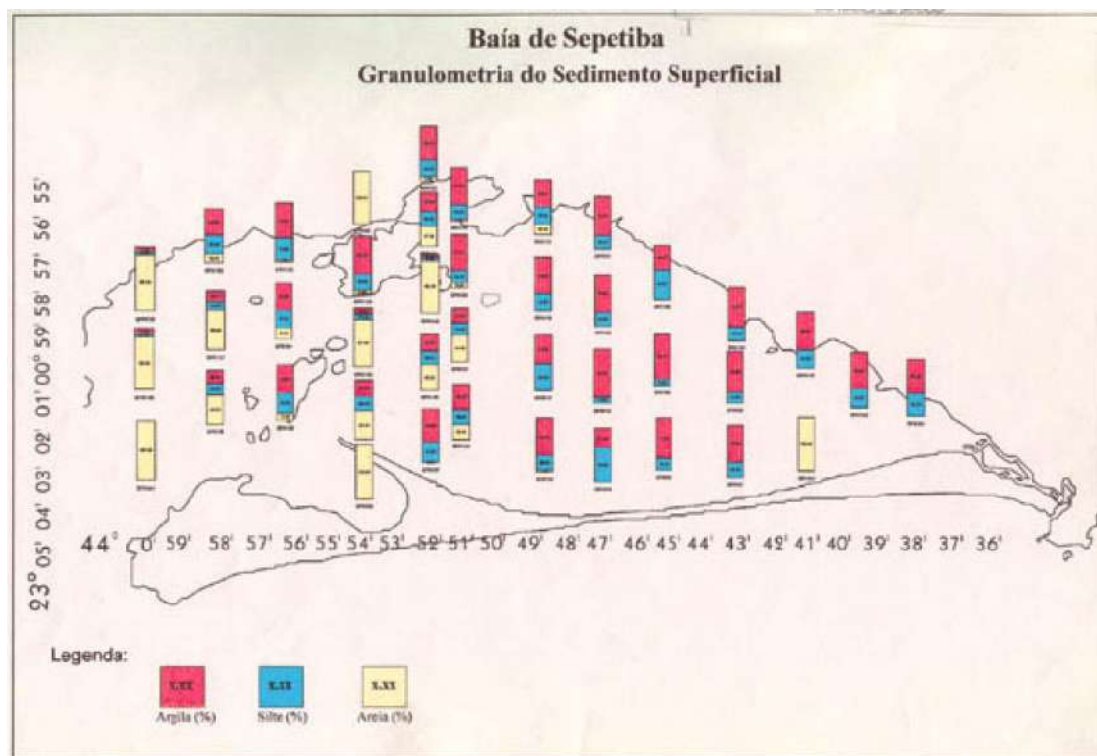


Figura 2.24: Mapa textural da fundo da baía de Sepetiba. Em vermelho a argila, em azul o silte e em amarelo a areia. Extraído de FEEMA (1998).

Em reação à margem noroeste da baía, há pouca informação sobre sua batimetria original. O mapeamento mais antigo encontrado foi a carta batimétrica de MOUCHEZ (1868), período em que a drenagem dos rios já havia sido alterada pelos jesuítas e no qual o uso (pecuária e monoculturas) do solo já era pleno (Figura 2.25). O mapa de Mouchez não representa a foz do canal de Itá, que já deveria existir na época. Nesse período, o rio Itaguahy era a principal foz da bacia do Guandu, que dispunha de uma barra possivelmente arenosa, conhecida como barra de Itaguahy (BRASIL, 1922), onde as canoas e pequenas embarcações se concentravam (GAMA, 1875).

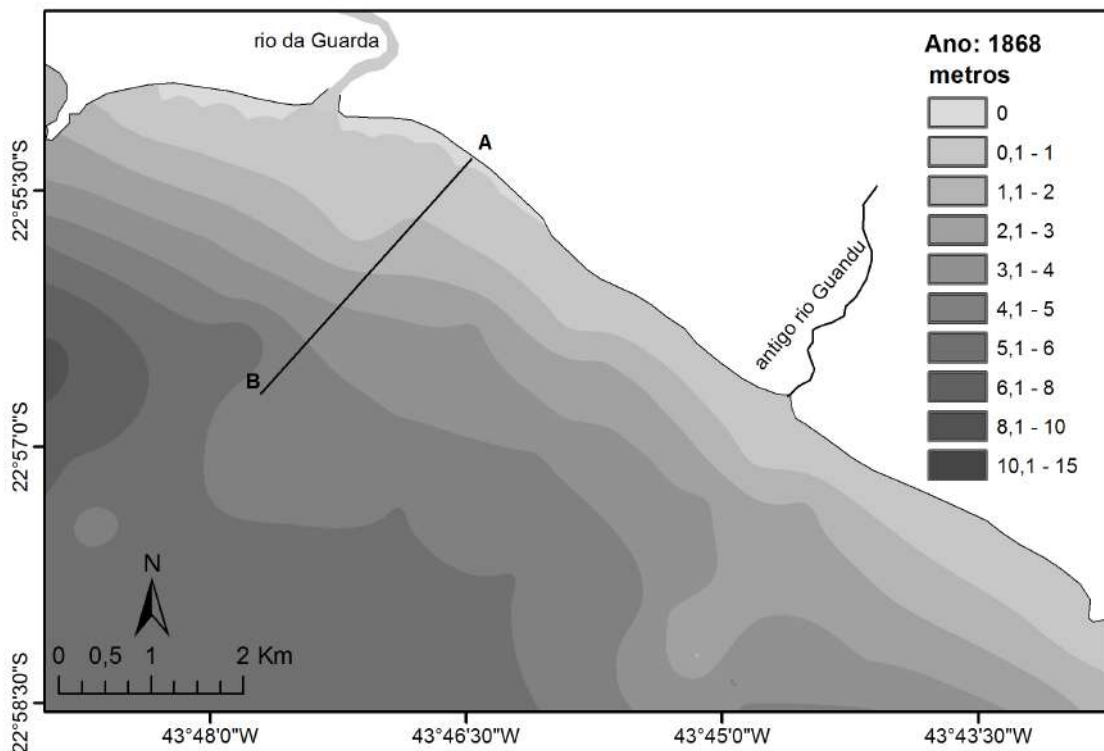


Figura 2.25: Mapa batimétrico da margem noroeste da baía de Sepetiba, baseado no mapa de MOUCHEZ (1868). A-B é a seção batimétrica para comparação em perfil.

## 2.9 Uso do solo

Os registros mais antigos de ocupação humana na baixada de Sepetiba foram encontrados em 34 sítios arqueológicos (sambaquis) apontando a presença de coletores e pescadores pré-históricos de tradição Tupi-guarani, há pelo menos  $2.260 \pm 160$  AP (KNEIP e PALLESTRINI, 1987). Entretanto, o fato histórico de maior relevância em termos de remoção de vegetação primária e de uso solo, foi a chegada dos portugueses, na área de estudo, em 1567.

Atualmente, o que restou da Mata Atlântica, na bacia do Paraíba do Sul, ocupa menos de 11 % da bacia (COMITÊ, 2006). Deste restante, cerca de 50 % encontra-se protegida por unidades de conservação (Figura 2.26).

Segundo um levantamento feito, em 1997, na bacia original do Guandu, a vegetação remanescente representaria cerca de 24 %, sendo que 67 % dessa vegetação encontra-se protegida por unidades de conservação (Figura 2.27) (SONDOTECNICA, 2006). Atualmente, a maior parte da vegetação primária da bacia foi substituída por campo e pastagens (46 %) (SONDOTECNICA, 2006).



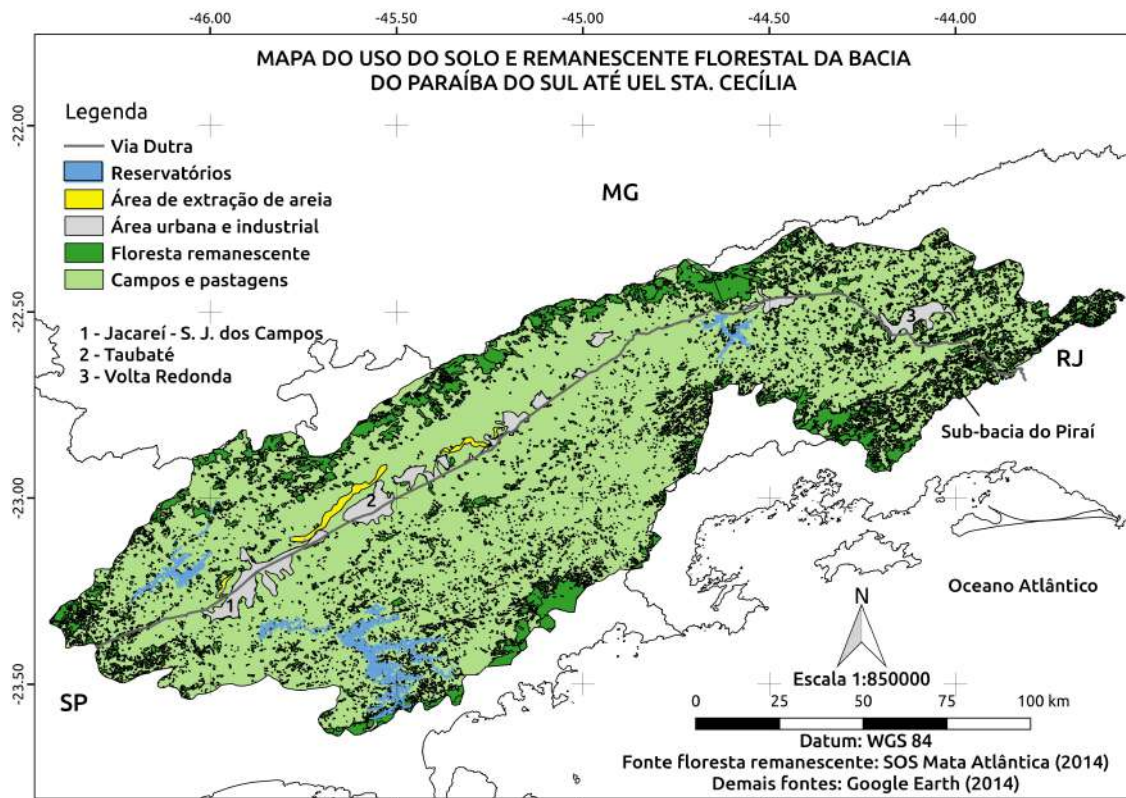


Figura 2.26: Mapa da vegetação remanescente e uso do solo na bacia do Paraíba do Sul até UEL Sta. Cecília.

## 2.9.1 Desmatamentos e atividade agropecuária

Entre 1567 e 1589, boa parte da baixada de Sepetiba pertencia à sesmária da família Monteiro. Desde então, juntamente com outras propriedades da região, foi sendo parcialmente doada ou vendida para a Companhia de Jesus, até se tornar, em 1656, uma propriedade de 2.265 km<sup>2</sup> (AMANTINO e COUTO, 2013). Tombada com o nome de Fazenda Santa Cruz, a propriedade dos jesuítas compreendia o que é hoje o bairro de Santa Cruz, no Rio de Janeiro, e parte dos municípios fluminenses de Barra do Piraí, Itaguaí, Mendes, Nova Iguaçu, Paracambi, Engenheiro Paulo de Frontin, Piraí, Rio Claro, Vassouras e Volta Redonda. Sob administração dos jesuítas, a terra passou a ser intensamente explorada e dividida em duas partes. A parte da baixada, região de brejais e alagados, foi convertida principalmente, em pastagens e, secundariamente, em plantações de mandioca. A segunda parte, mais no interior, na região das serras, voltou-se para extração de madeira. Para se ter uma compreensão do grau de aproveitamento e uso do solo, sobretudo na baixada de Sepetiba, os registros mostram que, entre 1701 e 1757, o número de cabeças de gado variou entre 15.000 a 35.378 (AMANTINO e COUTO, 2013). A fazenda também se tornou uma das maiores fábricas de farinha de mandioca da colônia (AMANTINO e COUTO, 2013).

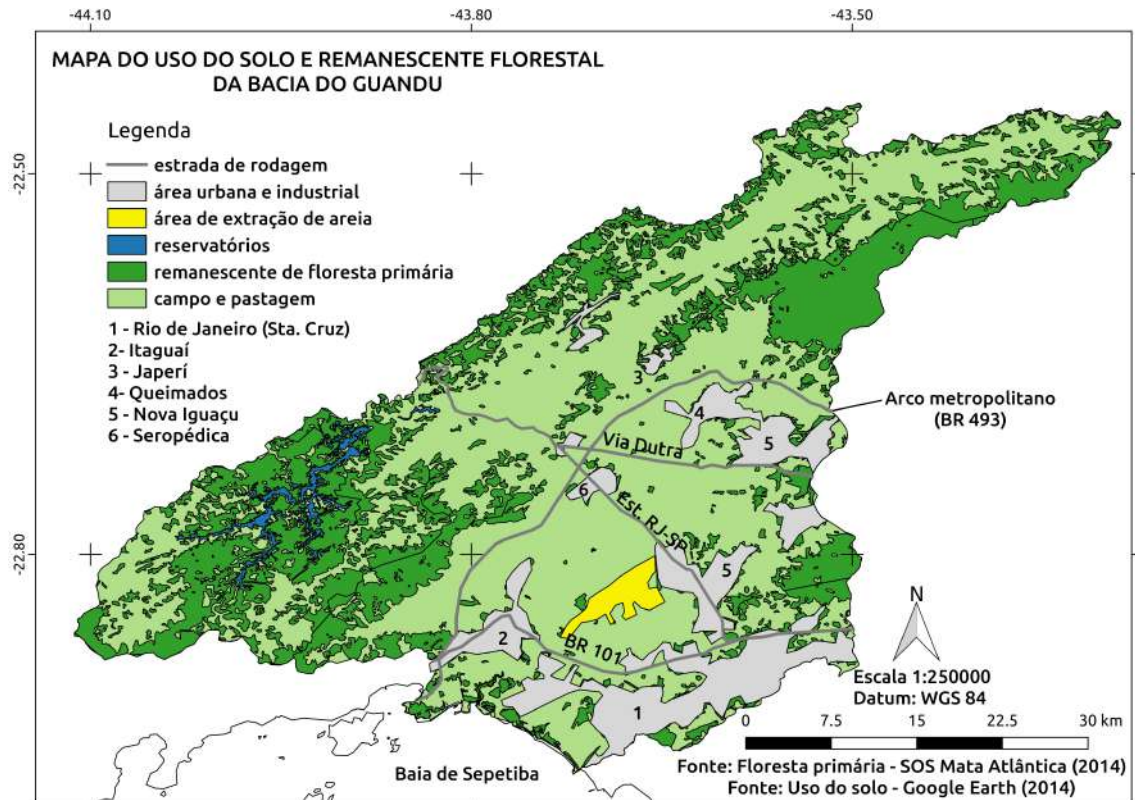


Figura 2.27: Mapa da vegetação remanescente e uso do solo na bacia original do Guandu.

Após o sequestro da Fazenda Sta. Cruz e a expulsão dos jesuítas, pela coroa portuguesa em 1759, a propriedade entrou em decadência, mas manteve como forma de uso do solo, a pastagem (GÓES, 1942). A partir do séc. XVIII, o interior da baixada de Sepetiba passou ser explorado por engenhos de cana e por poucos cafezais, nas encostas serranas.

No caso do Vale do Paraíba, a exploração começou mais tardiamente, a partir do séc. XVIII, mas com maior intensidade e abrangência, no séc. XIX, devido ao ciclo do café (FRIDMAN, 2013). O ciclo do café foi responsável pelo rápido desmatamento da região e pelo surgimento de ricas cidades e fazendas (FRIDMAN, 2013). A plantação dos cafezais acontecia, sobretudo, nas encostas e com práticas não conservacionistas, esgotando rapidamente o solo (Figura 2.28). Na virada para o séc. XX a região já se encontrava em decadência, com suas luxuosas fazendas desmembradas em propriedades menores e/ou convertidas em pastos abandonados ou de baixa produtividade (Figura 2.26 e Figura 2.29).

Por outro lado, o início do séc. XX foi uma fase economicamente positiva para a baixada de Sepetiba, que vivia um segundo momento de crescimento, com a lucrativa exportação de laranjas para o mercado europeu. Os laranjais se estendiam por toda região, hoje conhecida como Nova Iguaçu, Queimados, Japeri e Santa Cruz, tornando a região a maior exportadora de laranja do Brasil (Figura 2.30). Por



Figura 2.28: Escravos na colheita de café em uma colina no vale do Paraíba. Foto tirada por Marc Ferrez em 1882, acervo do Instituto Moreira Salles (IMS): <http://www.ims.com.br/ims/explore/artista/marc-ferrez/obras>



Figura 2.29: Concentração de voçorocas em um vale de drenagem afluente direto do rio Barra Mansa, bacia do médio Paraíba do Sul, Município de Barra Mansa, RJ (extraído de SILVA (2013)).



conta deste prestígio, uma série de projetos foram executados na região, entre eles, a criação das colônias agrícolas (exemplo.: Núcleo Colonial Agrícola de Santa Cruz) e a construção da Escola Nacional de Agronomia (atual UFRRJ). O objetivo era criar um cinturão verde para abastecer a cidade do Rio de Janeiro. Entretanto, com a Segunda Guerra, o Brasil perde o mercado de laranjas e a região entra novamente em declínio econômico. Atualmente, essas extensas áreas rurais foram convertidas em áreas de pastagens improdutivas (Figura 2.27). A pastagem em terrenos acidentados, como a região de Paracambi, é uma das formas de uso de solo mais propícias para o avanço de processos erosivos. Na Figura 2.31 é possível notar uma concentração de ravinas, em argilossolo vermelho-amarelo coberto por pastagem abandonada e cortado pela estrada RJ 127, a cerca de 200 m da ponte que cruza o rio Guandu no município de Paracambi. Esse material erodido é rapidamente transportado pela drenagem da estrada, onde seu sumidouro fica junto à ponte que cruza o rio Guandu.



Figura 2.30: Foto dos laranjais plantados em colinas no município de Queimados. Foto tirada por Hildebrando A. Góes em 1941 (GÓES, 1942).

## 2.9.2 Urbanização

Com o fim do ciclo da laranja, em meados da déc. 40, a baixada de Sepetiba passou a suportar todo o ônus da rápida urbanização e expansão da cidade do Rio de Janeiro (Figura 2.32). Esta urbanização, tanto no Rio de Janeiro quanto em São Paulo, foi condicionada por uma industrialização de baixos salários e um mercado de moradias restrito e concentrado (SANTOS, 2005). Dentre as regiões mais densamente urbanizadas, destaca-se o município de Nova Iguaçu<sup>4</sup> que possuía 38.960 habitantes, em 1920, e saltou para 103.125 habitantes, em 1940, ainda durante o ciclo da laranja. Essa tendência de crescimento se manteve nos anos seguintes, devido ao loteamento das chácaras. O processo de expansão urbana encontrou, nas

<sup>4</sup>Neste período, Duque de Caxias (1943), Queimados (1990), Japeri (1991), Belford Roxo (1990) e Mesquita (1999) ainda pertenciam ao município de Nova Iguaçu.



Figura 2.31: Concentração de ravinas degradando um corte da estrada RJ 127 em uma área de pastagens abandonadas, a cerca de 200 m da ponte que cruza o rio Guandu no município de Paracambi - RJ. Foto tirada em 16/06/2015.

malhas ferroviária e rodoviária, seu caminho preferencial (SANTOS, 2005). A região rural rapidamente se converteu em cidade-dormitório e parque industrial.

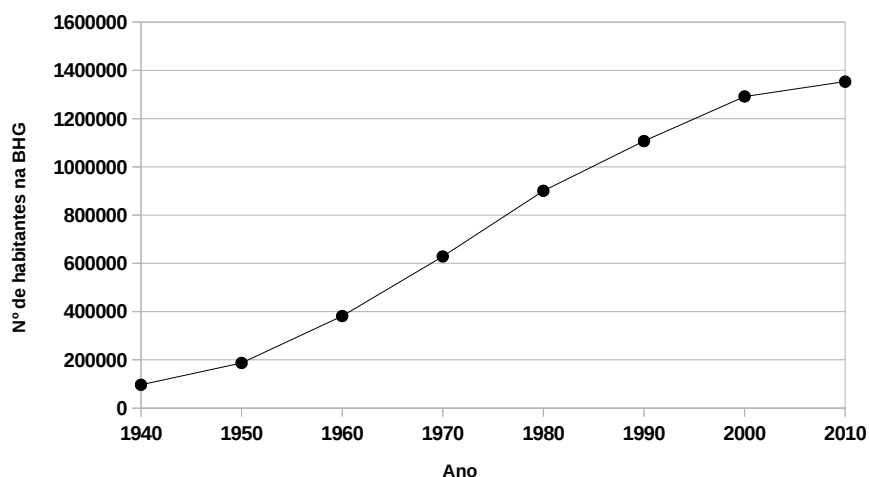


Figura 2.32: Gráfico do número de habitantes na bacia do Guandu entre 1940 e 2010. Percentual de participação de cada município foi extraído de SON-DO TECNICA (2006). Censo 1940 - 2000: CARNEIRO (2001). Censo 2010: <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>.

Atualmente a área urbanizada ocupa cerca de 8 % da bacia original do Guandu e cerca de 1 % da bacia do Paraíba do Sul até a UEL Sta. Cecília (Figura 2.26 e Figura 2.27). Apesar da área urbanizada não ser expressiva em relação à área total da bacia, os impactos provenientes de um tipo de urbanização proletária, caracterizado pela omissão do Estado em ofertar serviços básicos de saneamento e abastecimento, resultaram, inevitavelmente, em rios, valas e canais poluídos pelo lançamento direto de esgoto doméstico não tratado. Em 2010, a área de maior concentração populacional era formada por 48,9 % da área total do município de Nova Iguaçu (389.370

hab.), o município de Queimados (137.962 hab.) e os bairros mais densos do município do Rio de Janeiro: Campo Grande (328.370 hab.) e Santa Cruz (217.333 hab.). Esta região está inserida nas sub-bacias dos rios Queimados e Guandu Mirim, que, conseqüentemente, são os rios mais poluídos da bacia do Guandu.

A região serrana e do vale do Paraíba também sofreram um crescimento urbano rápido e desordenado, principalmente nas, cidades próximas à rodovia Presidente Dutra (BR-116). Loteamentos e ocupações urbanas do solo em gradientes além dos limites suportáveis pela constituição geológica são as principais causas de movimento de massa e formação de voçorocas. Eventos de movimento de massa têm capacidade de ofertar grande quantidade de sedimento para os cursos d'água, como mostra a Figura 2.33, em uma área urbana do município de Piraí, nas margens do reservatório de Santana. O traçado desordenado das ruas e da drenagem urbana funcionam como verdadeiros concentradores do escoamento de água das chuvas torrenciais, agravando a erosão urbana, sobretudo, nas áreas periféricas, onde essas águas convergem.



Figura 2.33: Evento de movimento de massa em uma encosta ocupada por residências próximo ao reservatório de Santana em 15/01/16, no município de Piraí - RJ. Foto extraída do Jornal Diário do Vale do dia 16/01/16.

### 2.9.3 Perda de solo na bacia do Guandu

A partir do mapa de perda solo do estado do Rio de Janeiro realizado pela EMBRAPA (COSTA *et al.*, 2005), a contagem dos *pixels* mostrou que a perda de solo, na bacia do Guandu foi, na sua maioria (82 %), inferior a 10 ton/ha.ano (Figura 2.34). Apenas 10 % da bacia possui perda entre 10 e 49 t/ha.ano, 6 % entre 50 e 99 t/ha.ano, 2 % entre 100 e 199 t/ha.ano e 1 % com mais de 200 t/ha.ano (Figura 2.34). Valores de perda de solo acima de 12 %, encontrado por CARVALHO

(2008), pode ser considerado acima do limite de tolerância para os tipos de solos presentes na bacia. As áreas mais comprometidas se encontram nas sub-bacias do ribeirão das Lajes e rio Santana.

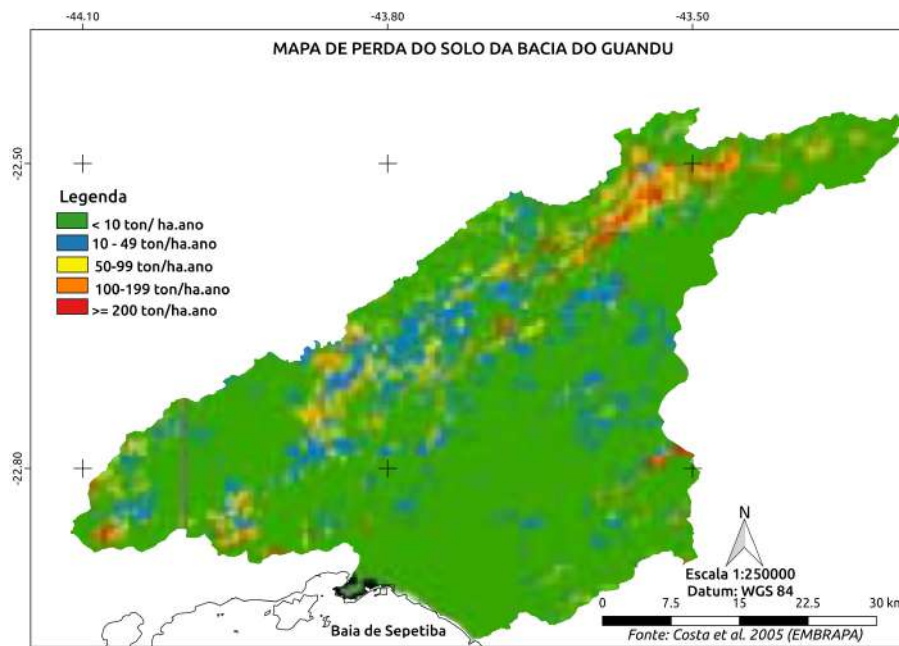


Figura 2.34: Mapa da perda de solo na bacia original do Guandu.

Somando todos os *pixels* presentes na bacia, estima-se que, anualmente, sejam perdidos aproximadamente 4.948.646 t de solo na bacia do Guandu. Entretanto, apenas uma parcela pequena do material erodido (razão de transferência - *sediment delivery ratio*), pelos processos erosivos e de movimento de massa chega de fato nos rios, na baía ou no reservatório. Estimativas feitas para outras outras bacias apontam que entre 70 % e 90 % deste material fica retido permanentemente ou provisoriamente, em colúvios na base da encosta, depressões, vegetação e planícies de inundação (WALLING, 1983).

#### 2.9.4 Deslizamentos e chuvas extremas de janeiro de 1967

Deslizamentos de terra e inundações devido, a chuvas torrenciais, são eventos que ocorrem com certa frequência, nesta região. Registros desse tipo são feitos desde a época da ocupação dos jesuítas. Entretanto, o temporal da noite do dia 22 para 23 janeiro de 1967 se destacou dos demais devido ao enorme volume de sedimentos e detritos mobilizado pelos movimentos de massa que se generalizaram por toda Serra das Araras (Figura 2.35). Estima-se que os deslizamentos e inundações deste evento tenham matado cerca de 1.700 pessoas, tornando-o o maior desastre natural registrado do Brasil. Para se compreender a magnitude do evento, a recente tragédia de Teresópolis, em 2011, ocorreu após um volume de chuvas de 140 mm, em 24 horas.



Na Serra das Araras, em 1967, o volume de chuvas chegou a 275 mm, em apenas três horas (JONES, 1973). Quase o dobro de água em um oitavo do tempo.



Figura 2.35: Vale do ribeirão da Floresta, tributário do ribeirão da Lajes, após os deslizamentos na serra da Araras em 1967 (foto acima) (extraído de JONES (1973)) e no dias de hoje (foto abaixo) (extraído do Google Earth).

Nenhuma quantificação do volume de sedimentos transportado pelo rio Guandu foi feita na época. Neste evento, uma grande quantidade de terra invadiu e interditou as UHE Fontes e Nilo Peçanha por vários dias. Segundo informações de um vídeo produzido pela própria LIGHT<sup>5</sup>, cerca de 200.000,0 t de lama e detritos

<sup>5</sup>[https://www.youtube.com/watch?v=fJNzW7AQ\\_2Q](https://www.youtube.com/watch?v=fJNzW7AQ_2Q)



foram removidos da usina. Na limpeza da usina, foram usados jatos de água, destinando boa parte do material fino diretamente para o reservatório de Ponte Coberta (Figura 2.36). No vale do ribeirão da Floresta, tributário do ribeirão da Lajes, se acumulou em sua planície aluvionar, cerca de 4 metros de lama (Figura 2.35) (JONES, 1973). Sabe-se também que o abastecimento de água foi suspenso, devido à grande quantidade de sedimento em suspensão presente no rio Guandu.

## **2.10 Intervenções hidráulicas**

Apesar da existência de europeus na região desde o séc. XVI, os registros históricos não apontam qualquer mudança antrópica direta no traçado original e no regime das águas do rio Guandu até a chegada dos jesuítas no séc. XVII (GAMA, 1875). As intervenções hidráulicas foram divididas conforme seu uso: controle de cheias, abastecimento da RMRJ, mineração, sistema hidroelétrico e sistema termoeelétrico.

### **2.10.1 Regularização de canais e vazão para controle de cheias**

As principais obras hidráulicas documentadas para o trecho baixo do rio Guandu, durante a colonização jesuítica, ocorreram entre 1729 e 1759 (GAMA, 1875; GÓES, 1942). Com o sequestro dos bens e propriedades dos jesuítas pela coroa portuguesa em 1759, este trecho do rio ficou abandonado até 1928, quando o rio passou por uma sequência de obras hidráulicas, realizadas por comissões de dragagem e pelo DNOS (GÓES, 1942).

Motivados pelos efeitos negativos das recorrentes e prolongadas inundações das suas melhores pastagens, os jesuítas enviaram dois padres para a Holanda, na década de 1730, a fim de se especializarem em obras hidráulicas fluviais (GAMA, 1875). O primeiro rio modificado foi ramo menor do rio Guandu, de mesmo nome. Este rio aceitava somente um pequeno volume de água e acabava sendo o primeiro a transbordar, nos eventos de chuvas torrenciais. Então, a partir da sua margem esquerda, foi construído um canal de mesma largura, que corria em paralelo até lançar-se diretamente na baía de Sepetiba (Figura 2.37). Chamada de vala do Itá, o canal tinha até 13,64 km de extensão, no caso, considerando os cerca de 2 km da vala de Santa Luzia, que em 1875, já se encontrava inutilizada (GAMA, 1875). Tratado o problema das cheias que cobriam as pastagens a esquerda do Guandu, os jesuítas se voltaram aos extensos campos entre o rio Itaguaí e Guandu. Nessa área, construíram uma estreita vala à direita do Guandu, que terminava na margem esquerda do rio Itaguaí, próximo de sua foz (Figura 2.39). Esta vala recebeu o nome de São Francisco e sua principal função era levar água fresca para os animais

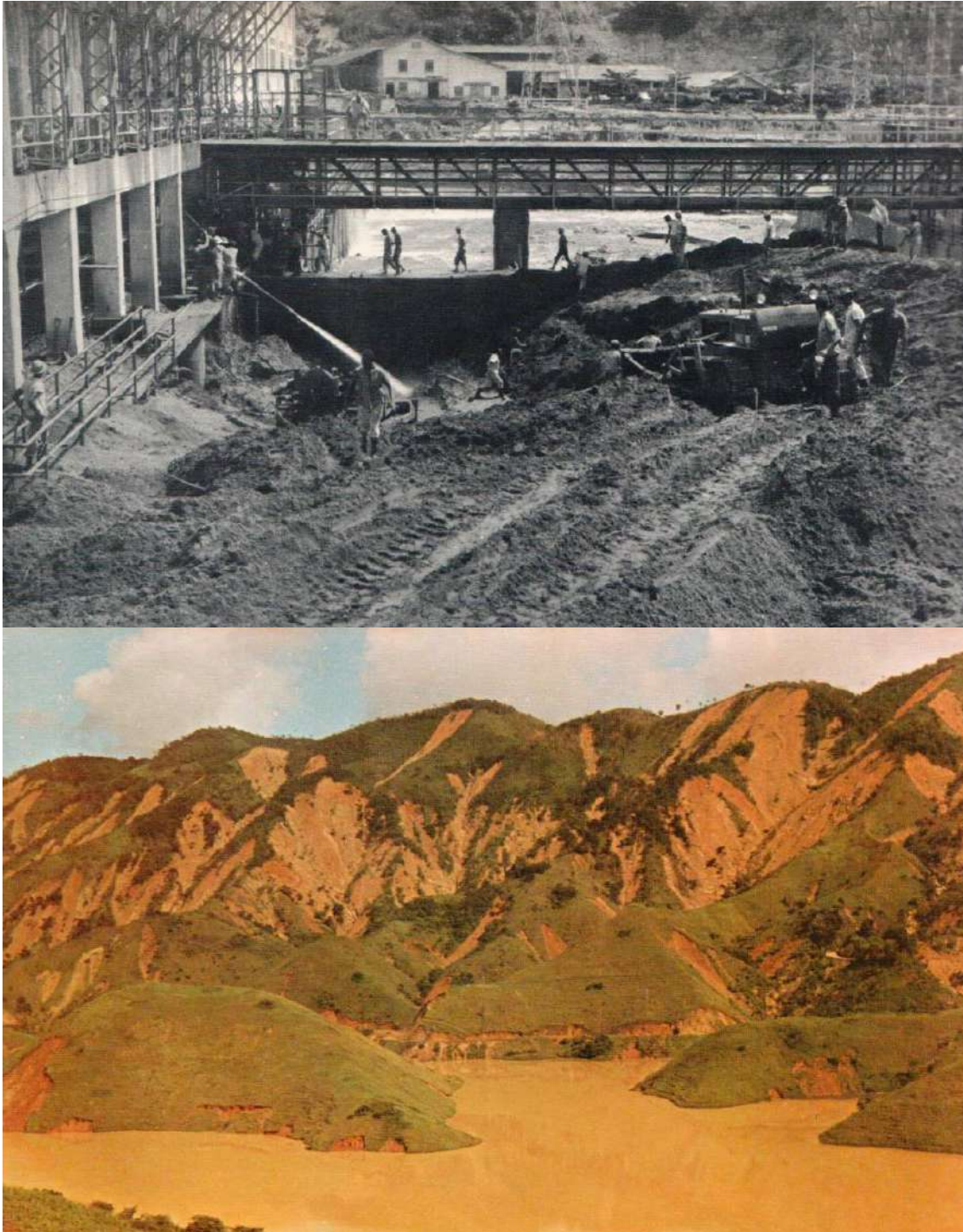


Figura 2.36: Saída da UHE Fontes Nova (foto superior) e reservatório de Ponte Coberta (foto abaixo) após a catástrofe natural da serra da Araras de 1967 (extraído de JONES (1973)).

que pastavam entre o rio Guandu e Itaguahy (GAMA, 1875). Como sugerem as marcas preservadas nos dias de hoje, a vala tinha aproximadamente 5 m de largura, enquanto que o Itá tinha cerca 10 m de largura (Figura 2.23).

Para regular o regime das águas neste complexo sistema de canais e valas, foi

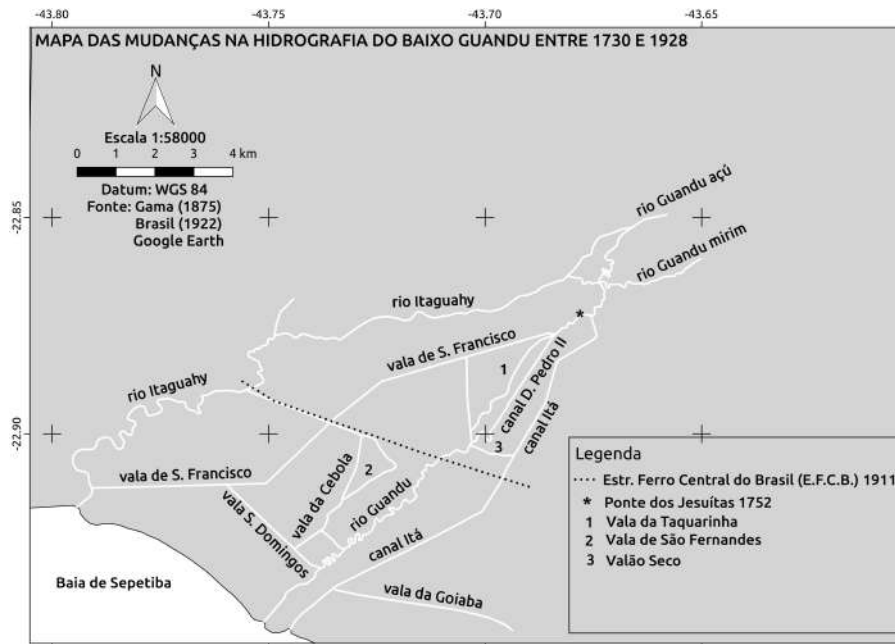


Figura 2.37: Hidrografia detalhando o sistema de regulação e drenagem jesuítica que existiu entre 1729 e 1928.

concluída em 1752 a ponte dos jesuítas sob o rio Guandu, ramo esquerdo do rio Guandu Açú (Figura 2.38). Concebida pelo padre Pero Fernandes, essa foi a primeira grande obra hidráulica do Brasil colonial. A obra consistiu de uma barragem com quatro arcos, que eram deixados em aberto para o escoamento natural do rio ou fechados para represá-lo. Durante a seca, se todas as comportas estivessem abertas, o volume de água a jusante da ponte seria suficiente para verter parte da água corrente para a vala do São Francisco, garantindo água fresca para o gado (GAMA, 1875). Se uma ou duas comportas fossem fechadas, o volume à jusante passava a ser insuficiente para verter para o S. Francisco, tornando-o um canal de água estagnada. Já durante as cheias, a maioria das comportas eram fechadas, a fim de que o excesso de água refluisse para a montante, indo vaziar tanto por um canal de derivação para o rio Itaguahy como para a vala do Itá, cujo desvio também ficava à montante da ponte (Figura 2.40). Como a vala de São Francisco só aceitava pequenos volumes de água, esta só ajudava no escoamento das cheias quando juntos, a vala do Itá e o canal de derivação, não conseguiam mais cumprir esta tarefa, obrigando os jesuítas a aumentar a defluência na ponte (GÓES, 1942). Além da ponte reguladora, os jesuítas também construíram extensos diques, dispostos nas margens mais vulneráveis ao transbordamento (GAMA, 1875).

Neste novo traçado, o trecho inferior do Guandu passou a contar com uma terceira foz para a baía de Sepetiba, pela vala do Itá (Figura 2.37). Outra mudança importante é o surgimento da complexa rede de valas, que passou a conectar permanentemente pontos da bacia que, até então, só se uniam durante as cheias. A regu-





Figura 2.38: Detalhe em escala (altura da pessoa = 1,65 m) dos arcos da ponte dos jesuítas do lado jusante e vista a montante da ponte ao lado do rio Guandu mirim. Fotos tiradas em 08/03/2016.

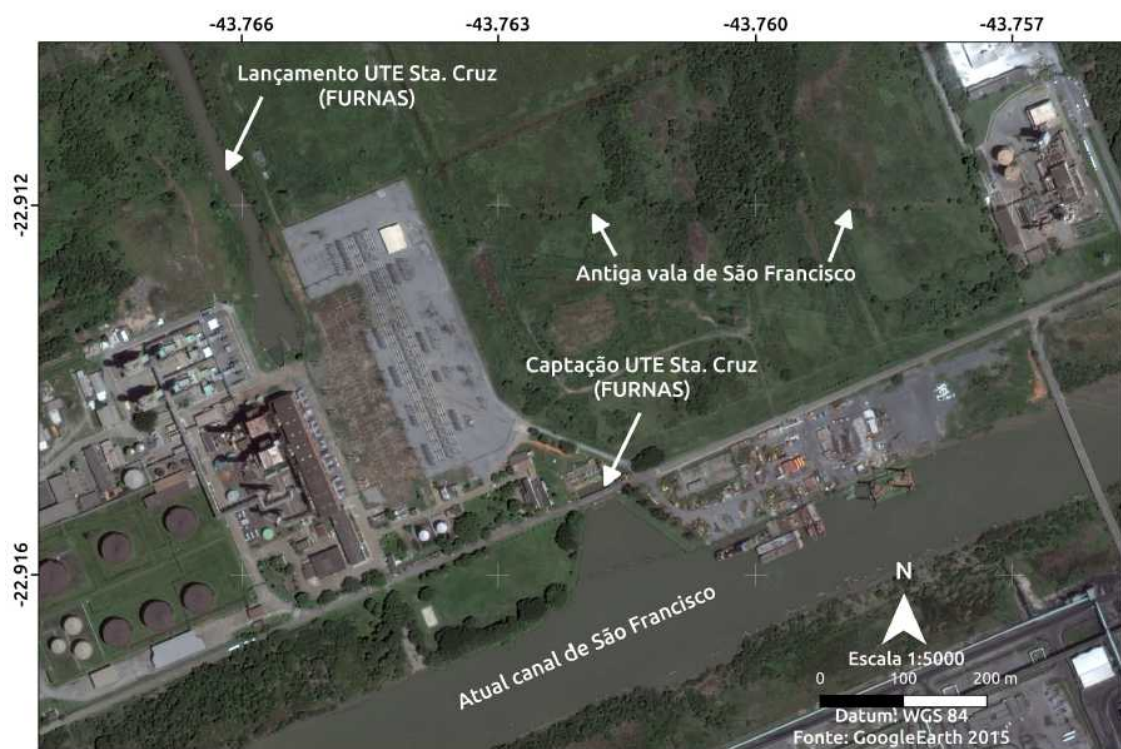


Figura 2.39: Imagem de satélite mostrando a antiga vala de S. Francisco (1729-1935) construída pelos jesuítas e o atual canal de S. Francisco (1935-2016).

larização pela ponte dos jesuítas, por sua vez, permitiu que as grandes inundações deixassem de ocorrer ou se tornassem raras. Entretanto, a solução hidráulica dependia de recorrentes obras de desobstrução após chuvas torrenciais. Com a expulsão dos jesuítas, as obras pararam de ser feitas, resultando no entupimento dos canais e no retorno das indesejadas inundações GÓES (1942).

As principais obras hidráulicas, executadas entre 1928 e 1942 encontram-se reunidas nos mapas e descrições de GÓES (1942). Entre 1921 - 1935, foram criadas uma série de comissões que prestaram serviços topográficos e de limpeza e dragagem

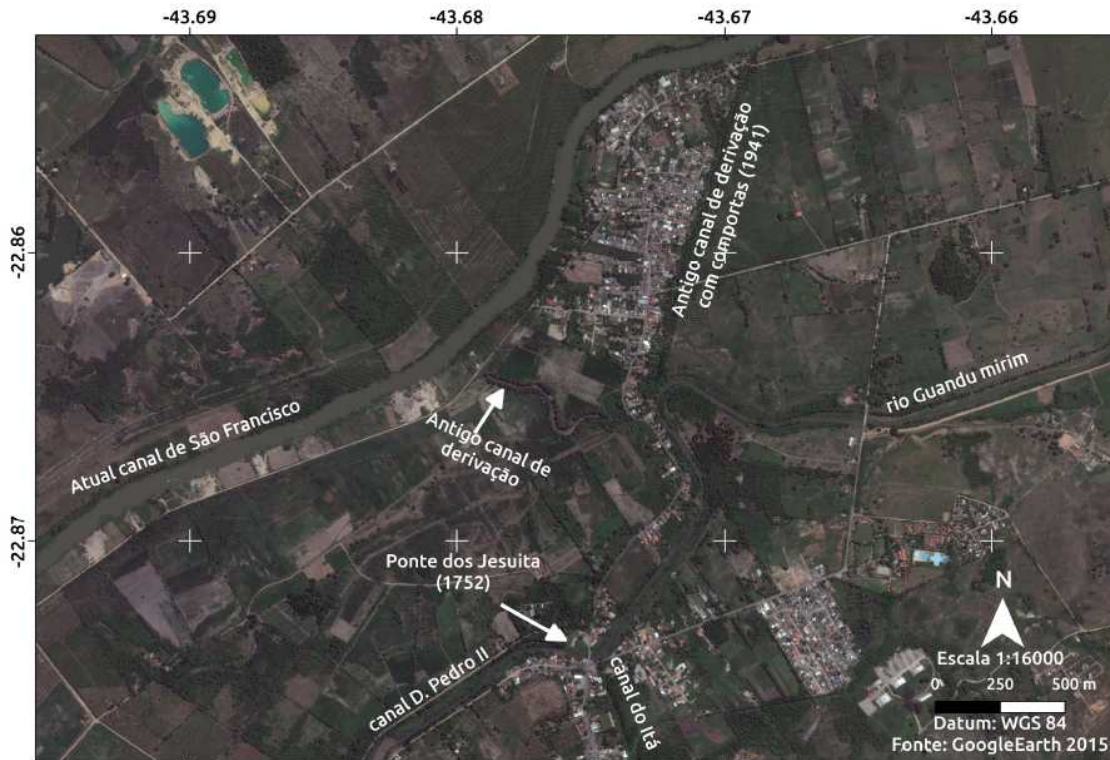


Figura 2.40: Detalhe dos canais logo à montante da ponte dos jesuítas. Imagem de 2009 do Google Earth<sup>®</sup>.

de valas e canais. Porém, duas comissões se envolveram em projetos maiores, com mudança de traçado e aumento de seção: a Comissão de Dragagem dos rios Itá e Guandu (CDIG) criada em 1928, e a Comissão de Dragagem de Santa Cruz, criada 1931 (CDSC). Ao ser extinta em 1930, a CDIG havia dragado e retificado o canal Itá e criado o canal do Guandu. O canal do Guandu passou a receber as águas do antigo rio Guandu, ramo menor do rio Guandu Açu, a partir da Estrada de Ferro Central do Brasil (E.F.C.B.), abandonando seu antigo leito meandrante e se lançando ao mar cerca de 2 km à direita da sua foz original (Figura 2.41 e Figura 2.43). A CDSC cuidou da vala de S. Francisco que, até então, era um participante modesto, transformando-a em um robusto canal, com capacidade de receber até 40 m<sup>3</sup>/s. Seu traçado também mudou, passando a receber água diretamente do rio Guandu Açu e seguindo retificado até a baía de Sepetiba.

Neste novo contexto, o rio da Guarda (antigo Itaguahy) deixou de ser o ramo principal do Guandu, mantendo-se fracamente ligado a ele por um pequeno canal de derivação chamado Valinha (Figura 2.41). O rio Guandu Mirim também foi dragado de forma a receder vazões de até 24 m<sup>3</sup>/s, mantendo sua foz no canal do Guandu e a montante, no desvio do Itá. Nesta fase, a ponte dos jesuítas já não cumpria mais sua função original, conservando-se, na margem direita do canal do Guandu, como patrimônio histórico (Figura 2.38). Os canais Guandu e Itá ficaram mais robustos,

com capacidade máxima de 75 m<sup>3</sup>/s cada e o canal de S. Francisco com 40 m<sup>3</sup>/s. Se considerarmos a potencial ligação com rio da Guarda, o trecho inferior do rio Guandu passou a ter quatro fozes para a baía de Sepetiba, sendo os canais Guandu e o Itá os mais importantes, em termos de volume.



Figura 2.41: Hidrografia detalhando os canais criado pelas comissões de saneamento entre 1928 e 1935, que ligavam os principais rios formadores do baixo Guandu.

Entretanto essas obras foram insuficientes. Já em 5 de janeiro de 1934 as descargas previstas foram ultrapassadas, com valores medidos de 90 m<sup>3</sup>/s, no canal do Guandu, 89 m<sup>3</sup>/s, no canal do Itá, 61,3 m<sup>3</sup>/s, no Guandu Mirim e 40 m<sup>3</sup>/s, no canal de S. Francisco (GÓES, 1942). Mais tarde, o projeto também foi incapaz de impedir a grande inundação, em 31 de março de 1936, onde a medição, na ponte Victor Konder, registrou uma vazão de 497 m<sup>3</sup>/s. Os rios, canais e valas, a jusante da ponte, transbordaram, mantendo toda a região alagada, por muitos dias (GÓES, 1942).

Diante deste quadro, a DNOS elaborou um novo projeto que, em linhas gerais, não modificava as condições de vazão dos canais do Itá e Guandu, mas desviava o volume excedente para o canal de S. Francisco (Figura 2.42) (GÓES, 1942). Para isso, construíram, ao longo da margem do canal de S. Francisco, diques longitudinais, transformando-o no principal canal a desaguar na baía de Sepetiba. A obra foi de grande envergadura, na qual se escavaram 4.358.501 m<sup>3</sup> em canais, com a extensão total de 163.846 m. Boa parte do material escavado foi usado na construção dos

diques, ao longo do canal de S. Francisco e rio Guandu, desde o mar até a antiga estrada de rodagem Rio - São Paulo. Espaçados em 300 metros, de eixo a eixo, os diques formaram, assim, um leito maior capaz de escoar as cheias do Guandu. Projetaram-se, para a margem direita, dois vertedores laterais, que, no caso de descargas maiores ( $> 600 \text{ m}^3/\text{s}$ ), conduziriam o excesso de água através de dois canais de derivação, a Valinha e outro, na altura da E.F.C.B., para o rio Itaguahy. No trecho atendido pela obra, a largura do rio Guandu e do canal de S. Francisco era de 20 m.

Na confluência do Guandu com o S. Francisco, uma barragem de concreto armado, munida de adufas, permitiu regular o volume das águas que passavam para os canais do Itá e Guandu. No ponto onde o canal Guandu defluía parte de suas águas para o canal Itá, uma nova comporta restringia a passagem das águas para o Itá, desviando, para o canal Guandu, toda a contribuição do Guandu Mirim. Nesse projeto, a bacia do Guandu foi fragmentada, sendo que as bacias do Itá, Guandu Mirim, Guarda e Mazomba passaram a só se conectar em condição de cheia extrema ( $> 600 \text{ m}^3/\text{s}$ ), através da operação de comportas nos canais de derivação (Tabela 2.4). Em condições normais, a bacia do Guandu passou a convergir toda sua vazão para uma única foz, o canal de S. Francisco. Mais tardiamente, entre as décadas 50 e 60, o rio Mazomba foi desconectado da bacia da Guarda e o trecho final do rio da Guarda foi retificado.

## 2.10.2 Barragens e transposições de bacias para uso hidroelétrico

A primeiro reservatório construído na bacia do rio Guandu, foi o reservatório de Lajes em 1908. Esse reservatório permitiu o aproveitamento hidroelétrico de  $5,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , pela Usina Hidroelétrica (UHE) Fontes (atual Fontes Velha) (Figura 2.44 e Figura 2.45). Concluída no mesmo ano, a usina gerava 24 MW, sendo considerada, na época, uma das maior potências instaladas no mundo e, certamente, a maior do Brasil (RITTA, 2009).

Em 1913, inaugura-se o reservatório de Tocos, no rio Piraí, e um túnel hidráulico, ligando Tocos ao reservatório de Lajes, formando a transposição de bacias rio Piraí-Guandu. O túnel desvia em médio de  $12,6 \text{ m}^3/\text{s}$ , ampliando, assim a vazão média defluente da UHE Fontes Velhas para o ribeirão das Lajes, que passou de  $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$  para  $18,2 \text{ m}^3/\text{s}$  (Figura 2.45, Figura 2.44 e Figura 2.46). Neste momento, o ribeirão das Lajes deixou de ser apenas um ribeirão e passou a ser o atual rio formador do Guandu. A vazão média do trecho inferior do Guandu passou a totalizar  $37,2 \text{ m}^3/\text{s}$ .

---

<sup>4</sup><http://laeti.photoshelter.com/image/I0000u5yNFzFh.wI>

<sup>5</sup><http://trilhosdorio.com.br/forum/viewtopic.php?f=90&t=119>

<sup>6</sup><http://espacoeconomia.revues.org/497>

Tabela 2.4: Resumo cronológico do balanço hídrico na foz do canal de S. Francisco.

Período	Balanço hídrico	Q (m <sup>3</sup> /s)
1942-1952	G-Gd-Gm-M+TPG-TGRJ1	34,5
1953-1954	G-Gd-Gm-M+TPPG-TGRJ1	168,5
1955-1963	G-Gd-Gm-M+TPPG-TGRJ1-TGRJ2	154,6
1964-1967	G-Gd-Gm-M+TPPG-TGRJ1-TGRJ3	144,5
1968-1982	G-Gd-Gm-M+TPPG-TGRJ1-TGRJ3-TGGd	118,5
1983-1993	G-Gd-Gm-M+TPPG-TGRJ1-TGRJ4-TGGd	102,5
1994-2008	G-Gd-Gm-M+TPPG-TGRJ1-TGRJ5-TGGd-OU	92,1
2009-2016	G-Gd-Gm-M+TPPG-TGRJ1-TGRJ5-TGGd-TGGm-OU	72,0

G: Bacia hidrográfica original do Guandu (35,9 m<sup>3</sup>/s).

Gd: Bacia hidrográfica atual do Guarda (5,5 m<sup>3</sup>/s).

Gm: Bacia hidrográfica atual do Guandu mirim (2,8 m<sup>3</sup>/s).

M: Bacia hidrográfica atual do Mazomba (3,0 m<sup>3</sup>/s) (SONDOTECNICA, 2006).

TPG: Transposição de bacias Pirai - Guandu (LIGHT) (12,6 m<sup>3</sup>/s).

TPPG: Transposição de bacias Paraíba do Sul - Pirai - Guandu (LIGHT) (149,4 m<sup>3</sup>/s).

TGRJ1: Transposições de bacias Guandu (res. de Lajes) - RMRJ (CEDAE)(5,5 m<sup>3</sup>/s).

TGRJ2,3,4,5: Transposições de bacias Guandu (ETA-Guandu) - RMRJ (CEDAE) (13,9, 24, 40 e 45 m<sup>3</sup>/s).

TGGd: Transposições de bacias Guandu (canal S. Francisco) - Guarda (UTE-Sta. Cruz) (26 m<sup>3</sup>/s) (SONDOTECNICA, 2006).

TGGm: Transposições de bacias Guandu (canal S. Francisco) - Guandu Mirim (UTE-TKCSA) (20,1 m<sup>3</sup>/s) (SONDOTECNICA, 2006).

OU: Outros usos (5,4 m<sup>3</sup>/s) (COELHO e ANTUNES, 2012).





Figura 2.42: Hidrografia detalhando os canais que ligavam os principais rios formadores do baixo Guandu entre 1936 e 1941 (GÓES, 1942).



Figura 2.43: Detalhe do antigo e meandrante rio Guandu e seu atual substituto, o canal do Guandu criado em 1930. Imagem de 2009 do Google Earth.



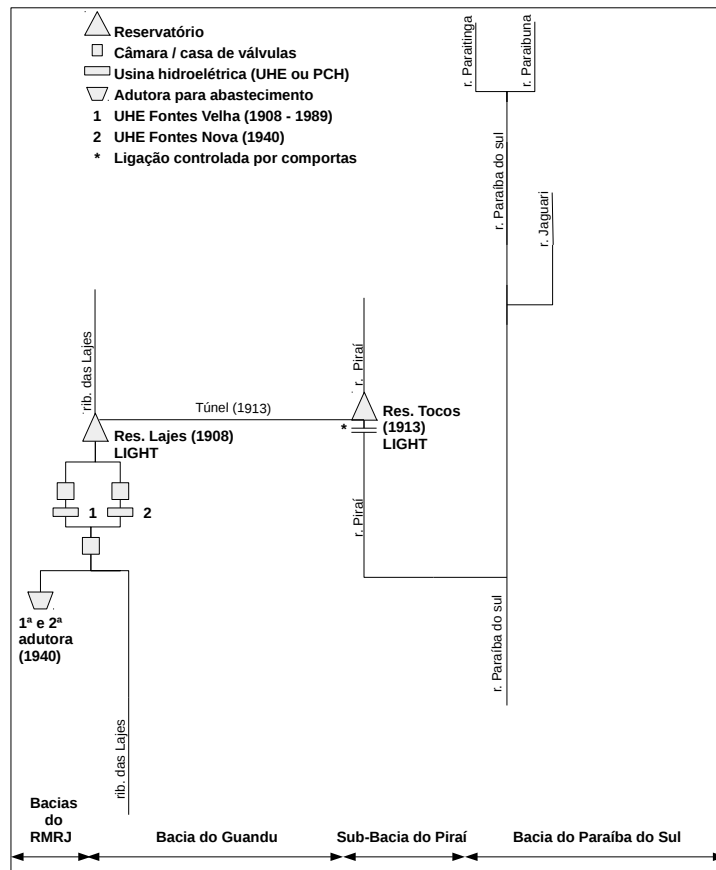


Figura 2.46: Diagrama unifilar do sistema hidroelétrico da transposição de bacias Piraí-Guandu entre 1913 e 1952

gura 2.46). Mais tarde, a UHE Fontes Nova teve sua capacidade de engolimento máximo ampliada, passando de  $77,4 \text{ m}^3/\text{s}$  em 1942, para  $96,4 \text{ m}^3/\text{s}$ , em 1947.

Em 1953, foi inaugurada a transposição das bacias Paraíba do Sul-Piraí-Guandu, ampliando significativamente o parque de geração hidroelétrica da região (Figura 2.48). Nesse sentido, a transposição de bacias Paraíba do Sul-Piraí-Guandu (TPPG) é a maior transposição implantada no Brasil e também o mais alto em termos de altura manométrica (KELMAN *et al.*, 2013). A transposição introduziu mais cinco reservatórios: Santa Cecília, Santana, Vigário e Ponte Coberta. A operação da transposição gerou um aumento drástico da vazão média afluente para o ribeirão das Lajes, com valores médios em torno de  $149,4 \text{ m}^3/\text{s}$  (Figura 2.45 e Figura 2.47) (SONDOTECNICA, 2006). A inauguração da UHE Pereira Passos, em 1963, complementou o projeto, permitindo a regularização horária da vazão, para atender horários de ponta, entre 18h e 22h. Nesta janela de tempo, a vazão máxima defluente poderia chegar a  $324,0 \text{ m}^3/\text{s}$  (FEEMA, 1985). Este modo de operação condicionou o rio Guandu a uma variabilidade horária abrupta da sua vazão. Mais que dobrando a sua vazão original, a DNOS precisou alargar o rio Guandu, passando de 20 m para 50 m de largura, chegando a 90 m próximo da foz (Figura 2.23

e Figura 2.49). A obra de alargamento de canal descartou grande quantidade de sedimento para o interior do canal. Na época, uma parte foi extraída pela mineração de cava, que ocorria diretamente no leito do rio Guandu.

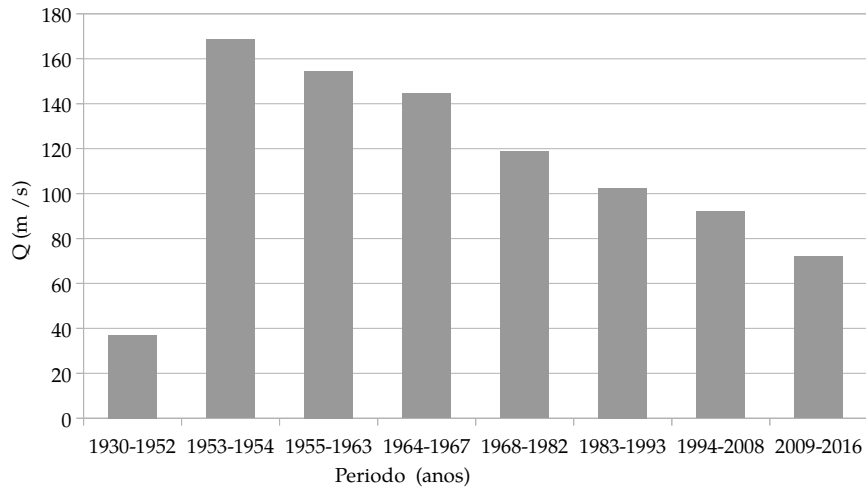


Figura 2.47: Descarga líquida do canal São Francisco ao longo do tempo.

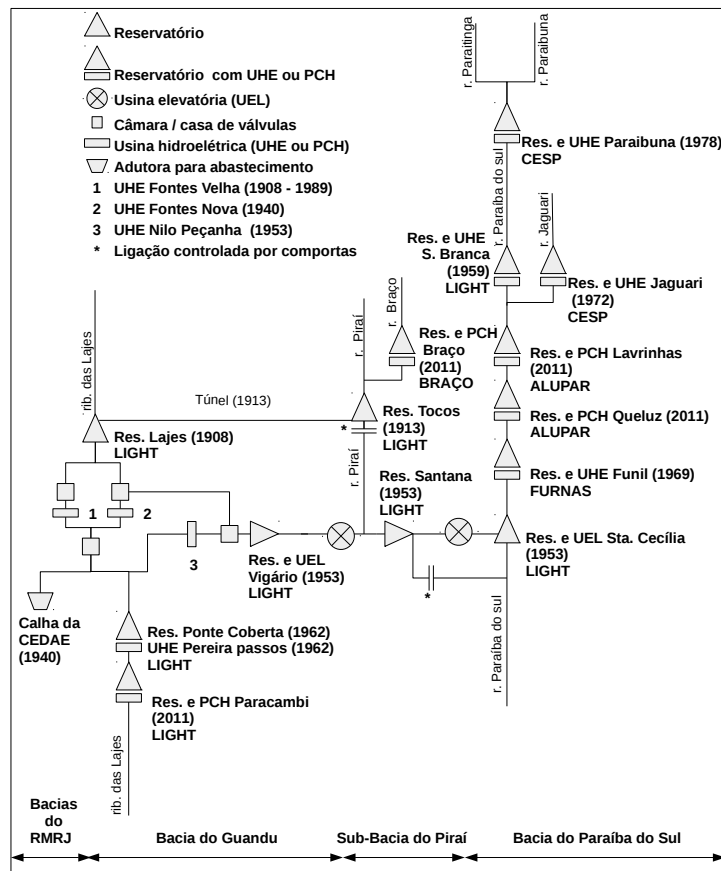


Figura 2.48: Diagrama unifilar do sistema hidroelétrico da transposição de bacias Paraíba do Sul-Piraí-Guandu entre 1953 e 2016.



Figura 2.49: Ponte da antiga Estrada de Ferro Central do Brasil (E.F.C.B.) que cruza o canal de S. Francisco. A foto, tirada em 1941 por Hildebrando de A. Goes, mostra o canal de S. Francisco confinado pelo vão da ponte, com aproximadamente 25 m de largura (GÓES, 1942). A segunda foto, tirada em 27/11/2014, mostra o atualmente canal de S. Francisco extravasando o vão da ponte, chegando a ter mais de 60 m de largura em condição típica.

### 2.10.3 Barragens e transposição de bacias para abastecimento público

O aumento contínuo da demanda hídrica da cidade do Rio de Janeiro no séc. XIX, quando era a então capital do Império, exigia captação e adução de água, em locais cada vez mais distantes de seu território (SONDOTECNICA, 2006). A captação de água, nas cabeceiras do rio São Pedro, iniciada em 1877(RITTA, 2009), foi a primeira a ser realizada fora do território do então Município Neutro e foi também a primeira obra de transposição da bacia do Guandu (Figura 2.50). Em seguida, foram inaugurados o reservatório e a adutora de rio D'Ouro e Santo Antônio, em 1880, também na bacia do Guandu (Figura 2.50)(RITTA, 2009). Estas duas adutoras de ferro fundido, com 800 mm de diâmetro, tinham capacidade de fornecer 8.000.000 l/dia e 11.500.000 l/dia, respectivamente, que eram direcionados para o reservatório de Pedregulho (1877), a cerca de 60 km (Tabela 2.5) (RITTA, 2009). Mais tarde, em 1932, a captação das águas do rio S. Pedro foi ampliada, com a instalação de eletrobombas, aumentando a vazão transposta para 1,5 m<sup>3</sup>/s (RITTA, 2009). Nesse mesmo período (1934), essas transposições foram incorporadas ao sistema Acari

(Figura 2.51).

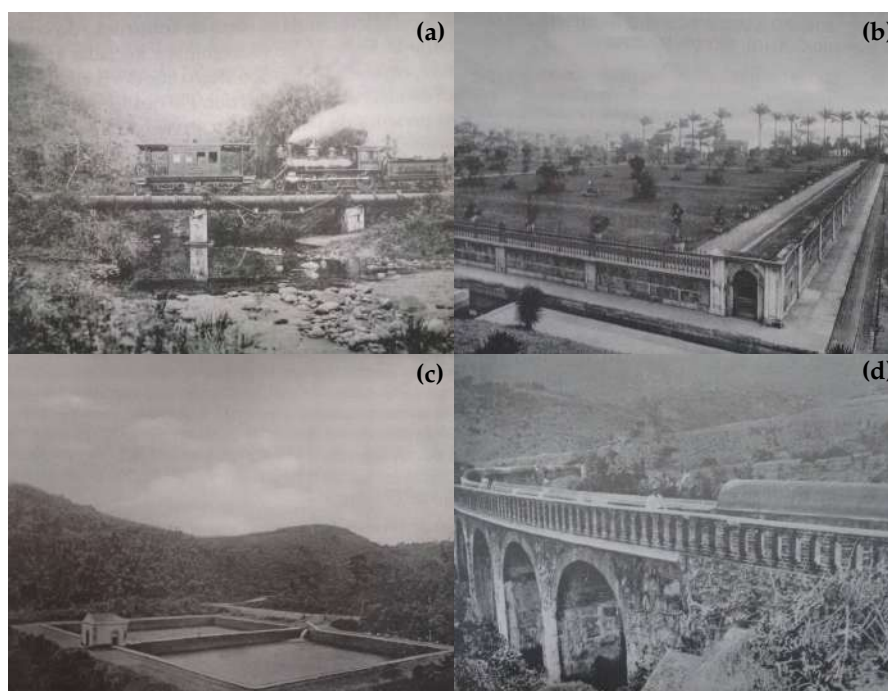


Figura 2.50: Fotografias das primeiras transposições da bacia do Guandu: (a) adutora de rio S. Pedro e estrada de ferro usada para construção da adutora do rio D'Ouro, (b) reservatório de Pedregulho, (c) reservatório do rio D'Ouro, (d) ponte aqueduto dos rios D'Ouro e Sto. Antônio. Fotos tirada por Marc Ferrez entre 1879 e 1889 (extraído de RITTA (2009)).

Nos anos 40, o alteamento da barragem de Ribeirão das Lajes, na transposição Piraí-Guandu passou a garantir afluência adicional constante de  $5,3 \text{ m}^3/\text{s}$  para duas adutoras de Ribeirão das Lajes. Estas adutoras foram construída para fins de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro (Tabela 2.4 e Figura 2.51) (RITTA, 2009).

O aumento da oferta hídrica no rio Guandu, a partir de 1953, permitiu a criação da estação de tratamento de água do Guandu (ETA- Guandu), que entrou em operação, em 1955, com uma captação inicial de  $13,9 \text{ m}^3/\text{s}$  (Figura 2.52)(RITTA, 2009). Entre 1963 e 1965, objetivando incrementar sua captação, construiu-se uma bifurcação no rio Guandu, interrompida por duas barragens, operadas por comportas, para controle do nível na tomada de água. Esse barramento gerou uma grande lagoa que afogou parte dos rios Queimados e Ipiranga (Figura 2.53). Com essas modificações e ampliações, a ETA passou a captar, a partir de 1965,  $24 \text{ m}^3/\text{s}$  (Figura 2.54)RITTA (2009) . Depois, uma nova ampliação permitiu a ETA captar  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ , em 1983, e  $45 \text{ m}^3/\text{s}$ , em 1994 (Figura 2.55)(RITTA, 2009).

Com a ETA-Guandu em operação, uma nova ligação se formou entre os rios Guandu e Guandu Mirim, através de uma vala, que deságua no rio Capenga, por onde os efluentes gerados no processo de tratamento da água são despejados (Figura 2.56). Apesar das Figura 2.52, Figura 2.54 e Figura 2.55, fornecidas pela





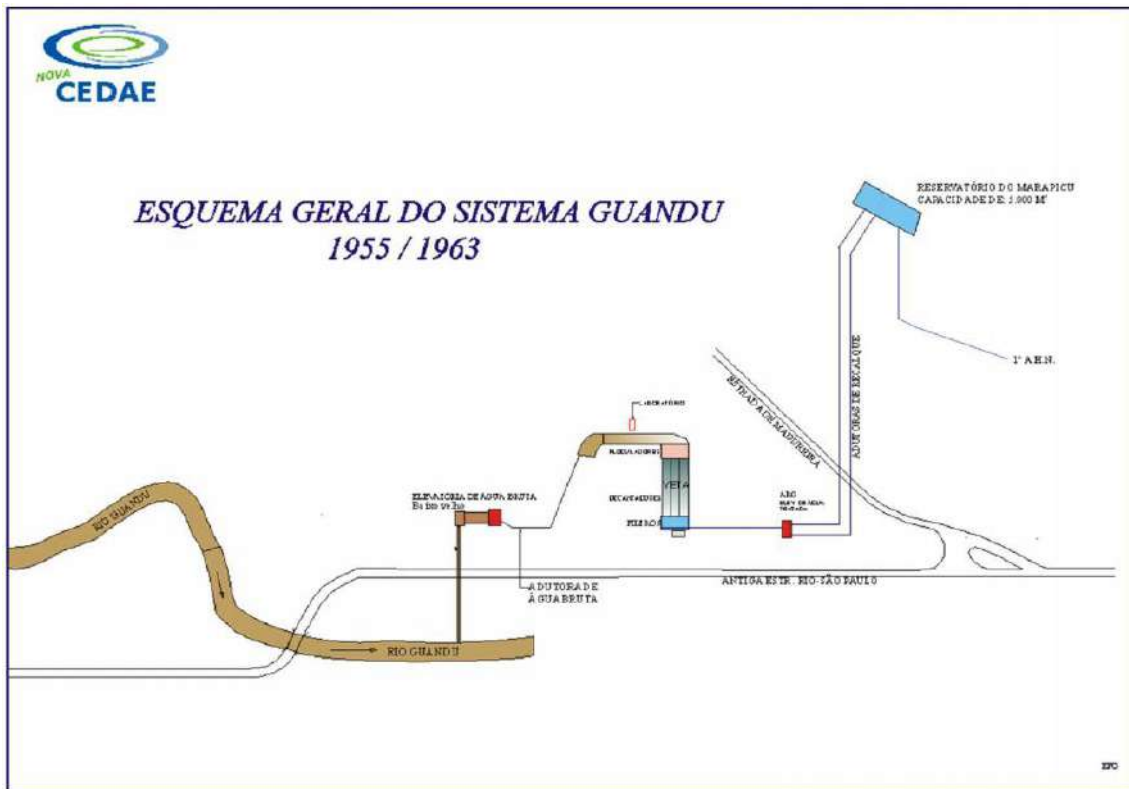


Figura 2.52: Esquema geral da ETA-Guandu entre os anos de 1955 e 1963.



Figura 2.53: Foto sem datação da construção da barragem para captação da ETA-Guandu, concluída em 1965. Foto extraído de RITTA (2009).

mente 3 m<sup>3</sup>/s.





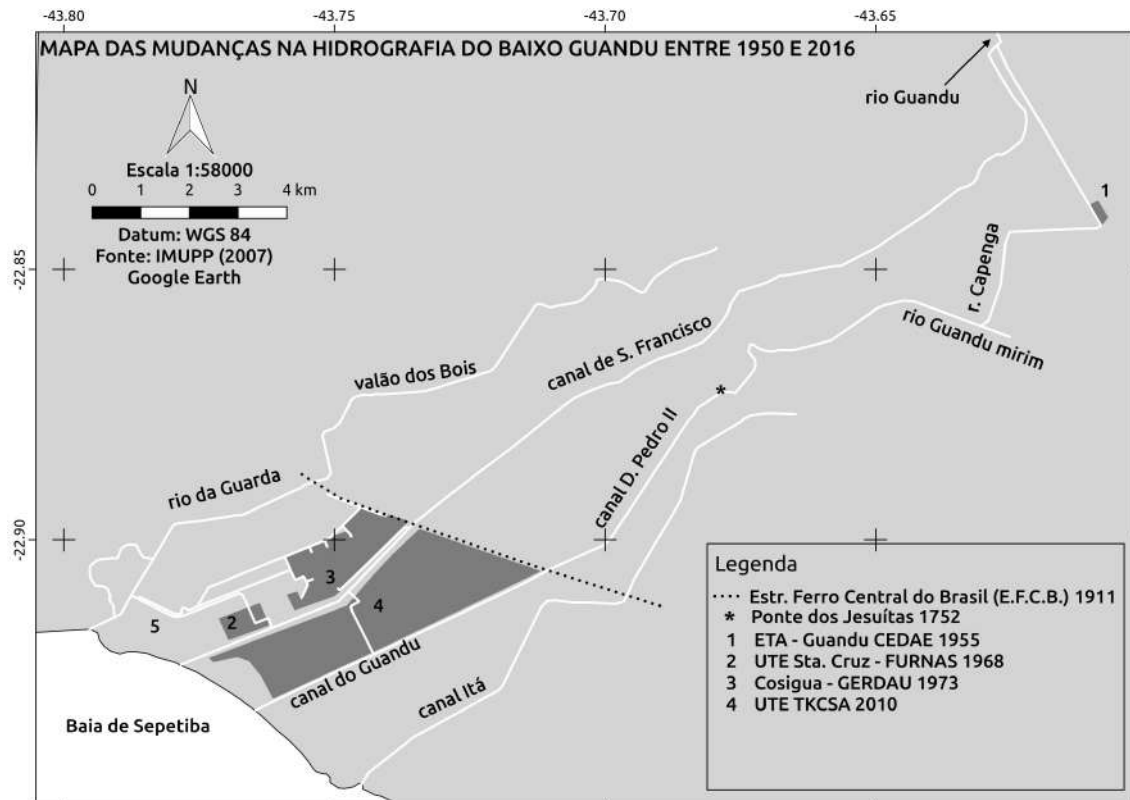


Figura 2.56: Hidrografia detalhando os canais que ligam os principais rios que formam o baixo Guandu entre 1950 e 2016 (IMUPP, 2007).

#### 2.10.4 Transposições para uso termelétrico

Em 1968, entra em operação a usina termelétrica de Santa Cruz, da Furnas S.A., que, através da descarga firme do canal efluente (canal de Santo Agostinho), reconecta o canal de S. Francisco ao rio da Guarda (Figura 2.56 e Figura 2.39). A UTE Sta. Cruz foi aumentando gradativamente sua captação até chegar a valores médios em torno de  $26 \text{ m}^3/\text{s}$ , em 1984 (FEEMA, 1985).

Em 2010, com a inauguração da siderurgia TKCSA, tem-se a mais recente modificação no traçado do trecho inferior do rio Guandu. A captação de  $18 \text{ m}^3/\text{s}$  para sua UTE, e  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  para siderurgia, resultaram, a partir de 2010, na transposição de  $20,1 \text{ m}^3/\text{s}$  do canal de S. Francisco para o canal do Guandu (Figura 2.56 e Figura 2.43) (SONDOTECNICA, 2006).

### 2.11 Entrada de sólidos em suspensão por efluentes doméstico

Conforme o cenário descrito pela SONDOTECNICA (2006), na qual 46,3% do esgoto doméstico, produzido diariamente, é lançado diretamente no corpo hídrico sem tratamento, aplicando Equação 2.6, a atual contribuição de sólidos suspensos totais

Tabela 2.6: Contribuição dos efluentes domésticos (t/ano) produzidos pela população residente (N° Hab.) na bacia do Guandu baseado na Equação 2.6 ao longo do tempo.

	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010
Pop.: $\times 10^3$ hab.	97	187	381	629	901	1.107	1.292	1.353
$Q_{ef}$ : $\times 10^3$ t/ano	1	2	5	8	11	13	16	16

do esgoto doméstico seria de  $16 \times 10^3$  t/ano. (Tabela 2.6).

## 2.12 Mineração do leito do canal para construção civil

A crescente urbanização da região metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) e uso generalizado do concreto, na construção civil, a partir dos anos 50, resultaram no surgimento de uma intensiva atividade de extração de areia na calha e nas margens do rio Guandu (SONDOTECNICA, 2006). Na déc. 70, essa atividade foi sendo, aos poucos, transferida para uma área de 40 km<sup>2</sup>, fora do rio, no município de Itaguaí, onde hoje são exploradas cerca de 80 cavas submersas (ROSSETE, 1996). Conhecida como Distrito Areeiro de Itaguaí-Seropédica, essa área produz cerca de 70 % da areia utilizada, na construção civil, no Estado do Rio de Janeiro. Rossete (1996) relatou que, em 1996, restavam apenas sete empresas operando na calha do rio (ROSSETE, 1996). Vinzon e Cassar (1998) observaram que, entre as que permaneceram, apenas algumas estavam em plena atividade (VINZON e CASSAR, 1998).

A passagem dessa atividade, no rio Guandu, deixou trechos completamente alterados, com seções que ultrapassam 100 metros de largura e depressões que ultrapassam 10 m de profundidade (Figura 2.57). O trecho mais degradado encontra-se 4 km a montante da tomada da ETA-Guandu. As imagens do *Google Earth*<sup>®</sup>, de 2015, mostraram que três dragas de sucção ainda exploram a calha do canal de S. Francisco. A ausência de um monitoramento sistemático, durante esse período impediu de fazer uma estimativa da contribuição dessa atividade, no desenvolvimento do complexo deltaico da bacia do Guandu.

## 2.13 Dragagens para operações portuárias

Inaugurado em 1982, o porto de Itaguaí (antigo porto de Sepetiba) está localizado parte no município de Itaguaí e parte no município de Mangaratiba. Ocupando uma área de 10,4 km<sup>2</sup>, o porto é administrado pela Companhia Docas do Rio de Janeiro. Possui terminais para cargas a granel (minério, carvão, enxofre, alumínio

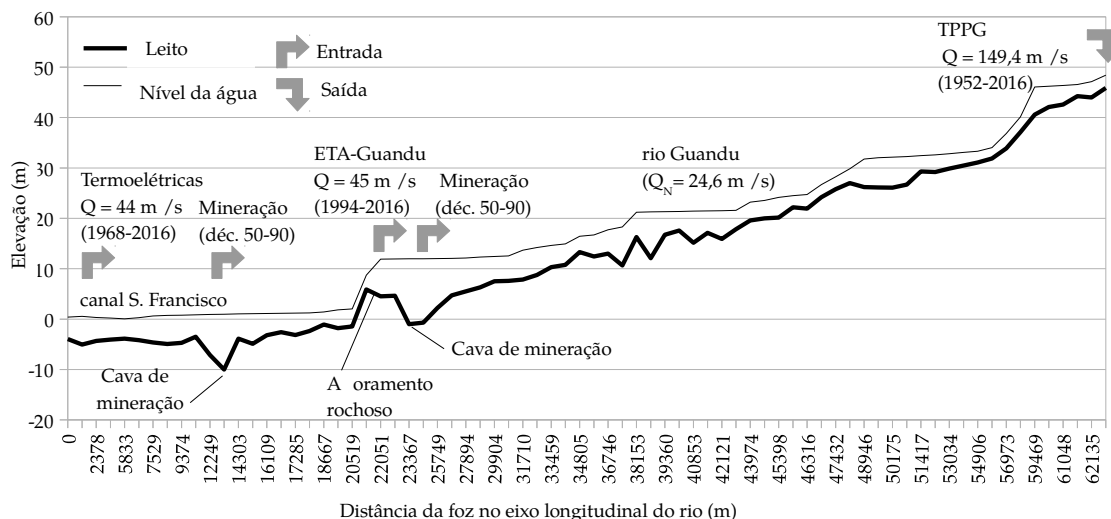


Figura 2.57: Perfil longitudinal da elevação do leito e do nível água do rio Guandu e a localização dos principais pontos antrópicos de entrada e saída de sedimento e água.

etc) e contêineres.

As obras de construção do píer foram iniciadas em 1976, seguidas, em 1977, pela dragagem, enrocamento e aterro. Mais tarde, em 1997, teve início a fase de ampliação do porto com o objetivo de transformá-lo no primeiro porto concentrador de carga do Atlântico Sul. Para tal, foi necessário criar um canal de acesso de 22 km para navios de até 150.000 t. O volume dragado foi de 17.266.000 m<sup>3</sup>, sendo a área do bota-fora dividida em 25x45=1.125 compartimentos de 100x100 m e os centros dos compartimentos externos ligados por um contorno retangular de 3.200x5.800 m (Figura 2.58) (MONTEZUMA, 2007). Boa parte da área dragada do canal de acesso era de textura arenosa (Figura 2.24). Entre 2008 e 2010, foi realizada outra dragagem de 6.400.000 m<sup>3</sup> no canal de acesso e na bacia de evolução, aumentando a profundidade de 17 m para 20 m.

Neste mesmo período, foi realizada a segunda obra portuária de relevância, na área de estudo, a construção do terminal marítimo da TKCSA, onde foram dragados 4.900.000 m<sup>3</sup>, relativos ao canal de acesso (Figura 2.61).

## 2.14 Variação do domínio da bacia do rio Guandu devido às intervenções antrópicas

A história das intervenções hidráulicas, na bacia do rio Guandu, foi marcada por uma sucessão de fragmentações e uniões de bacias hidrográficas. A separação e a união podiam ser integrais ou parciais. As fragmentações foram associadas às obras de controle de cheias. Na fragmentação parcial de bacias, o domínio original da bacia

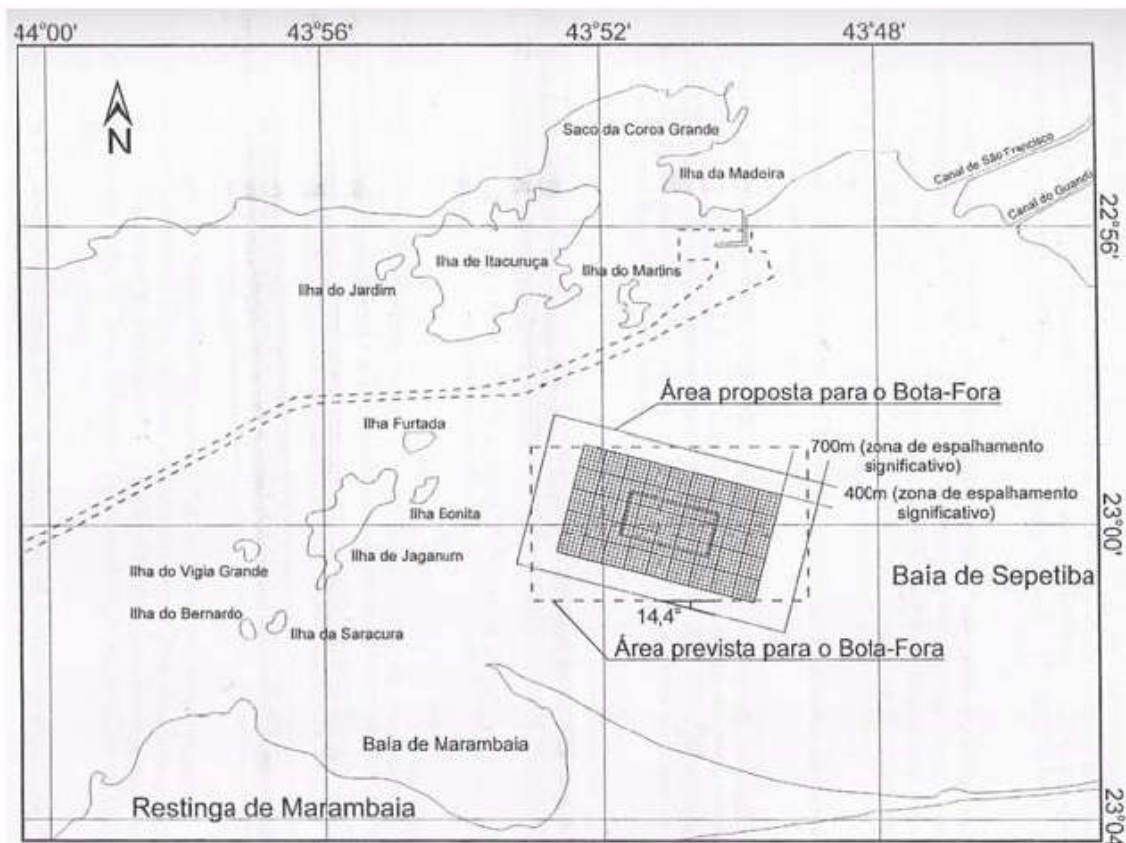


Figura 2.58: Região dragada do canal de acesso e bota-fora do porto de Itaguaí (EIA/RIMA n° 82, 1997 *apud* MONTEZUMA (2007))

era restaurado, em condição de cheia extrema, na qual os vertedores desviavam o excedente de água para a bacia vizinha, através de canais de derivação. Projetos desse tipo ocorreram no período jesuítico e, mais tarde, nas Comissões de Dragagem e da DNOS, na primeira metade do séc. XX. As uniões de bacias eram feitas através de obras de transposições de bacias, para a geração de energia hidro e termoelétrica e abastecimento público da cidade do Rio de Janeiro. Essas obras de transposições ocorreram por todo séc. XX.

Ao todo, a bacia do rio Guandu chegou a ter sete configurações diferentes, entre 1729 e 2010, variando sua área entre 2.002 km<sup>2</sup> e 18.659 km<sup>2</sup> (Figura 2.59). A primeira mudança refere-se às obras de controle de cheia e drenagem de brejais feitas pelos jesuítas. A segunda mudança refere-se à transposição parcial do rio Piraí, para aproveitamento hidroelétrico. A terceira mudança refere-se às obras de controle de cheias, feitas pelas Comissões de dragagem e pela DNOS. A quarta mudança refere-se à transposição total do rio Piraí e parcial do rio Paraíba do Sul. A quinta mudança refere-se à transposição parciais do rio Guandu para a bacia do rio Guandu Mirim, através da ETA-Guandu. A sexta mudança refere-se às transposições parciais do rio Guandu para a bacia dos rios da Guarda e Guandu Mirim, através das termoelétricas.

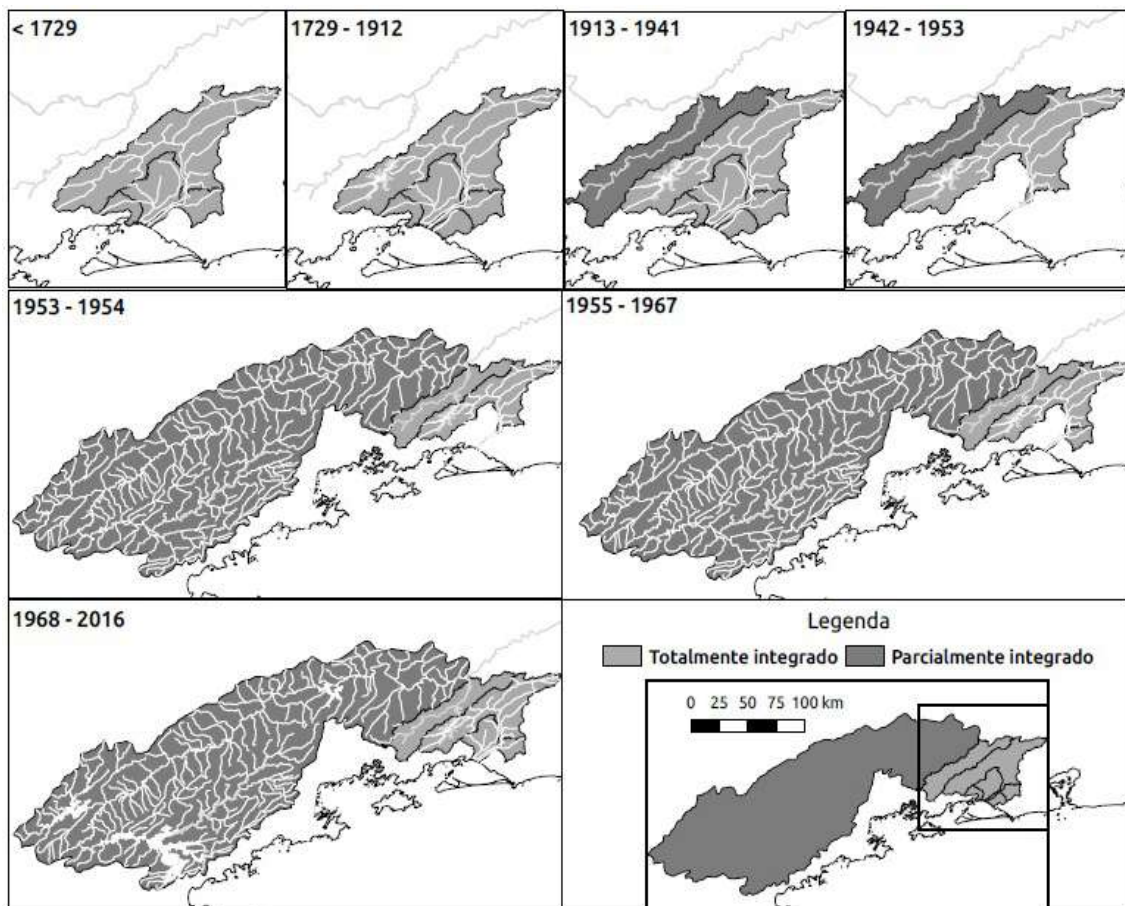


Figura 2.59: As diferentes configurações no domínio da bacia do rio Guandu.

## 2.15 Resposta morfológica do rio Guandu às intervenções antrópicas

As análises das cartas náuticas de 1868, 1935 e 1999 e do mapa geográfico de 1922 permitiram distinguir duas fases, durante a evolução morfológica do complexo deltaico da bacia do rio Guandu (Figura 2.60, Figura 2.61, Figura 2.62 e Figura 2.63). Essa divisão coincidiu com a principal intervenção antrópica na bacia do rio Guandu: a transposição das bacias dos rios Paraíba do Sul-Piraí-Guandu.

**Antes da TPPG** Nesse período, é possível distinguir dois cones deltaicos independentes: um na foz do rio Itaguaí, e outro, na foz do rio Guandu original, separados por uma distância de cerca de 3 km (Figura 2.25 e Figura 2.60). A isobatimétrica de -1 m se estende a menos de 1 km em ambas as fozes. Na foz do Itaguaí, os sedimentos se encontravam mais dispersos. Por outro lado, os sedimentos do delta do rio Guandu original estavam mais protegidos e concentrados em uma área menor, desenvolvendo uma feição mais cônica com o topo mais raso. Esse padrão morfológico do complexo deltaico foi observado tanto na carta batimétrica de 1868



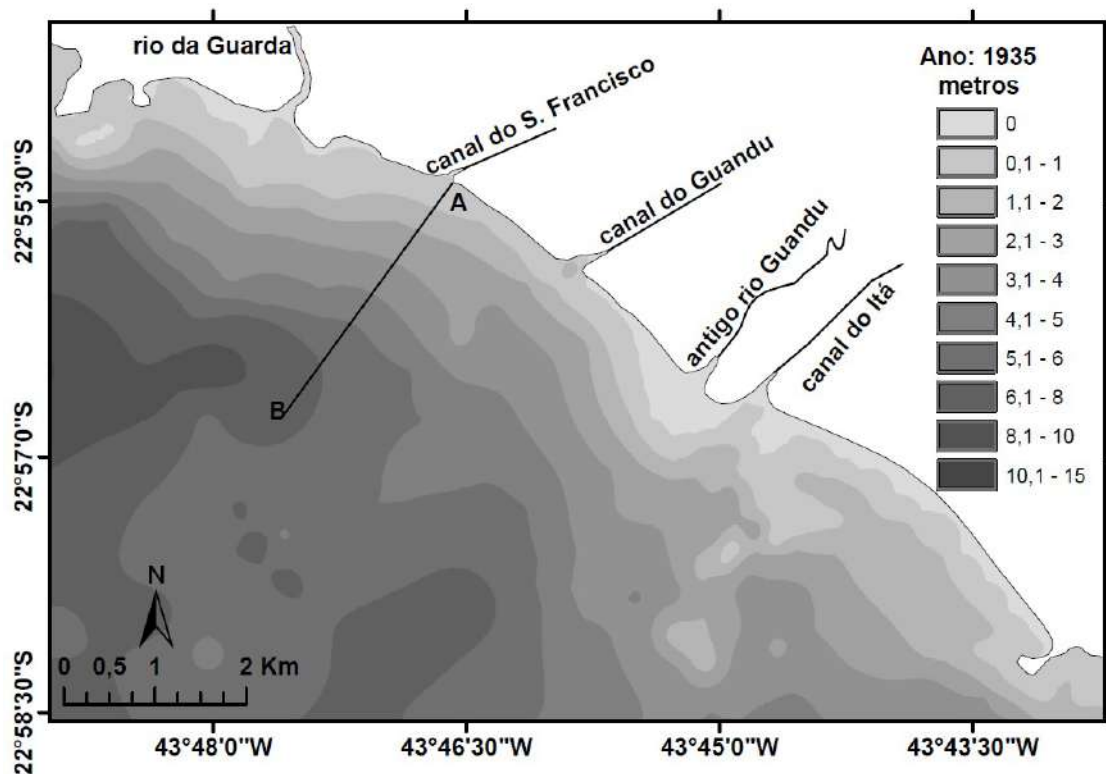


Figura 2.60: Mapa batimétrico da margem noroeste da baía de Sepetiba de 1935 (DHN, 1935), na qual a linha A-B representa o perfil vertical.

como na carta batimétrica de 1935, compreendendo um período de 67 anos.

Antes da TPPG, a declividade do leito do canal de São Francisco era de 0,000437, a profundidade média de 2 m e a descarga do leito foi da ordem de  $25$  a  $27 \times 10^3$  t/ano (Tabela 2.7, Figura 2.64 e Figura 2.65). Nessa fase a descarga de lavagem ( $72 \times 10^3$  t/ano) chegou a ser mais de duas vezes superior que a descarga de fundo (Tabela 2.7 e Figura 2.64). As obras hidráulicas da época, como a construção das fozes do canal do Itá (1752), do canal Guandu (1930) e do canal de São Francisco (1935), ajudaram a descentralizar a descarga fluvial nessa região, desacelerando a progradação dos deltas originais dos rios Itaguaí e Guandu original.

**Depois da TPPG** O aumento abrupto da descarga líquida, por causa da transposição resultou na degradação imediata do leito do rio a jusante (Figura 2.47 e Figura 2.65). Imediatamente após a transposição, a carga do leito considerando a mesma inclinação, foi da ordem de  $114$  a  $120 \times 10^3$  t/ano (Tabela 2.7). Esta alteração levou a um aumento abrupto da descarga de fundo de mais de quatro vezes (Tabela 2.7 e Figura 2.64). A carga de lavagem também aumentou, chegando à ordem de  $139 \times 10^3$  t/ano, praticamente dobrando, em relação ao período anterior à transposição (Tabela 2.7 e Figura 2.64). Em 1997, depois do ajustamento morfológico

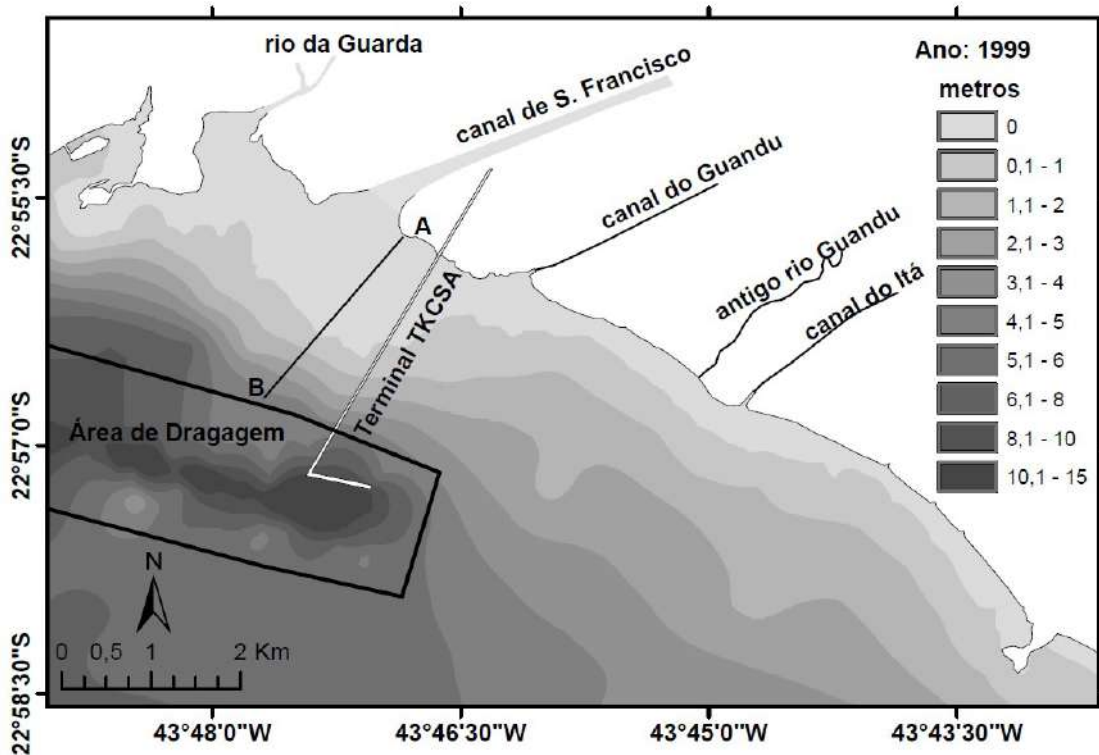


Figura 2.61: Mapa batimétrico da margem noroeste da baía de Sepetiba de 1999 (DHN, 1999) na qual a linha A-B representa o perfil vertical.

de longo termo, o canal de São Francisco foi artificialmente alargado, na qual profundidade média aumentou para 4,5 m e a declividade do leito foi para 0,000142 (Figura 2.65).

As mudanças na declividade e na profundidade médias, observadas em 1997, corroboram qualitativamente com o comportamento morfológico descrito pelas relações das Equação 2.1 e Equação 2.2, frente ao aumento expressivo da descarga líquida a montante. Pelas relações analíticas, o aumento da vazão a montante sem mudar o aporte de sedimento de fundo, resultou na incisão do leito, começando no fim da TPPG e se estendendo em direção à foz principal do Guandu, ao canal de S. Francisco (Figura 2.65). A erosão do leito conduziu, por sua vez, à redução da declividade do leito. Considerando, como tendência futura, o aumento da captação pelos usuários, a vazão voltará a valores próximos ao natural. Esse declínio vem ocorrendo gradativamente, desde a instalação da ETA-Guandu em 1955 (Tabela 2.7). A descarga de fundo tenderá a diminuir também, neste caso, tanto pelo declínio da vazão média como pela retenção de sedimentos pela barragem de comporta da Cedae (1965), pela barragem a fio d'água PCH Paracambi (2011) e pela barragem submersa do canal de S. Francisco (2015).

A extração de areia na calha e na margem do rio Guandu pode ter contribuído



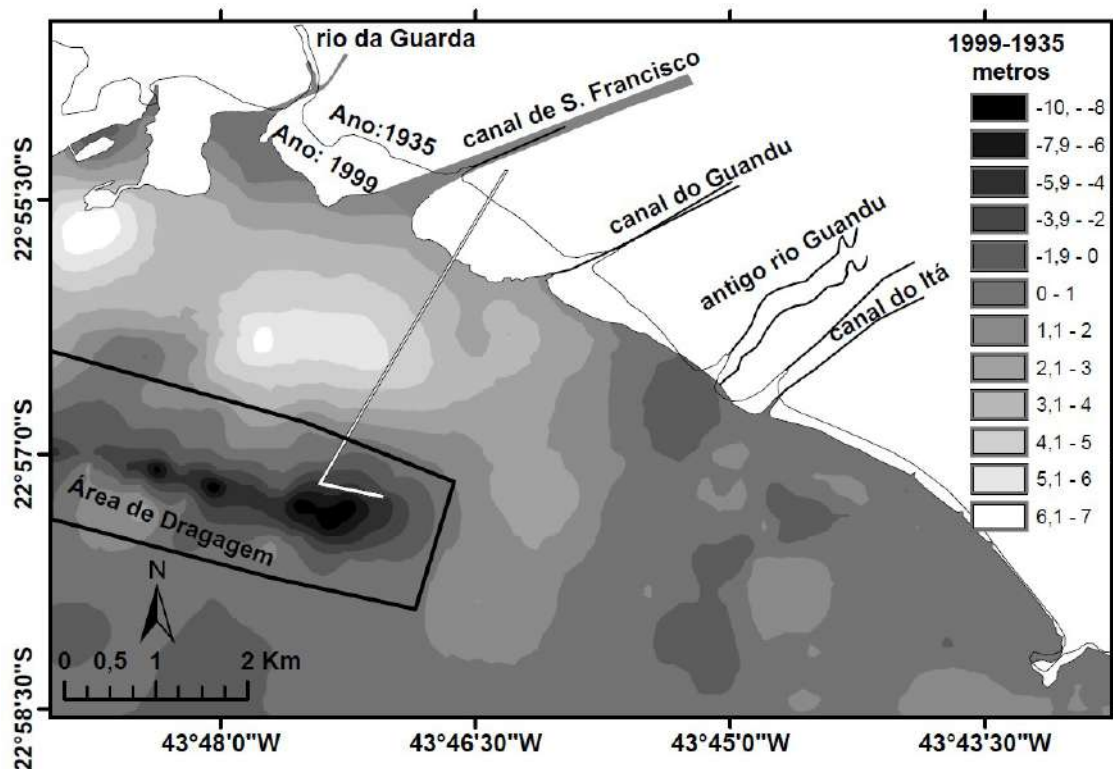


Figura 2.62: Mapa batimétrico da diferença entre as cartas náuticas da margem noroeste da baía de Sepetiba de 1935 e 1999 (DHN, 1935, 1999).

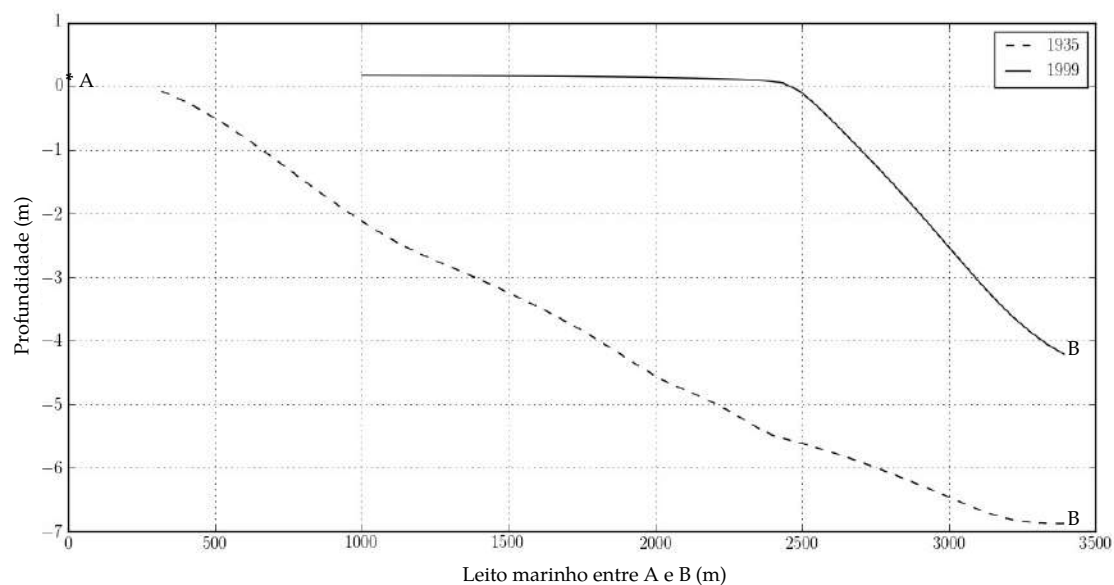


Figura 2.63: Perfil batimétrico do leito marinho entre os pontos A-B referentes as cartas náuticas de 1935 e 1999, onde o ponto A é a origem.

com a diminuição da declividade e com o aprofundamento do leito do rio Guandu. Entretanto, a ausência de dados sobre a taxa de extração, nesse período impede uma avaliação mais aprofundada. Eventos isolados, como o alargamento do canal

Tabela 2.7: Resultado cálculo da descarga de fundo (Equação 2.3, Equação 2.4 e Equação 2.5), lavagem e total no canal de Francisco para um cenário antes e imediatamente depois da conclusão da TPPG e um mais recentemente: D - declividade, L - largura do rio (m),  $d_{50}$  diâmetro mediano do grão,  $Q_{sf}$  - descarga de fundo,  $Q_{sl}$  - descarga de lavagem e  $Q_{st}$  - descarga sólida total.

	TPPG		
	Antes 1936-1942	Imediatamente depois 1953	Recentemente 1997
D	0,000437 <sup>(a)</sup>	0,000437 <sup>(a)</sup>	0,000142 <sup>(b)</sup>
L (m)	20 <sup>(a)</sup>	65 <sup>(b)</sup>	65 <sup>(b)</sup>
Q (m <sup>3</sup> /s)	37,2 <sup>(c)</sup>	168,5 <sup>(d)</sup>	92,1
$d_{50}^{(b)(e)}$ (m)	0,00025-0,001	0,00025-0,001	0,00025-0,001
$Q_{sf}$ ( $\times 10^3$ t/ano)	27-25	120-114	13-7
$Q_{sl}$ ( $\times 10^3$ t/ano)	72	139	76
$Q_{st}$ ( $\times 10^3$ t/ano)	99-97	259-253	89-83

(a): GÓES (1942).

(b): VINZON e CASSAR (1998).

(c): ETEP/ECOLOGUS/SM (1998).

(d): SONDOTECNICA (2006).

(e): GOES (1994).

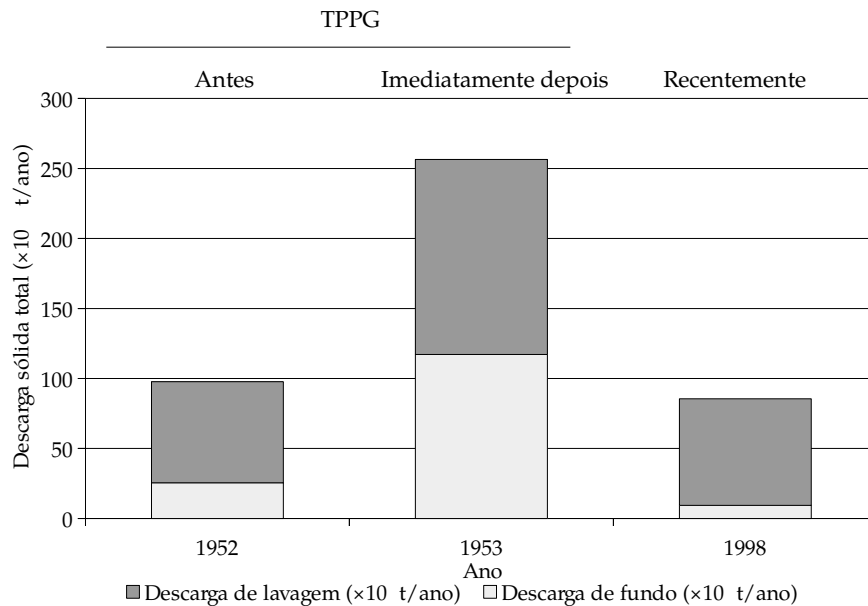


Figura 2.64: Descarga sólida de lavagem, de fundo e total no canal de São Francisco antes e imediatamente depois da transposição e mais recentemente.

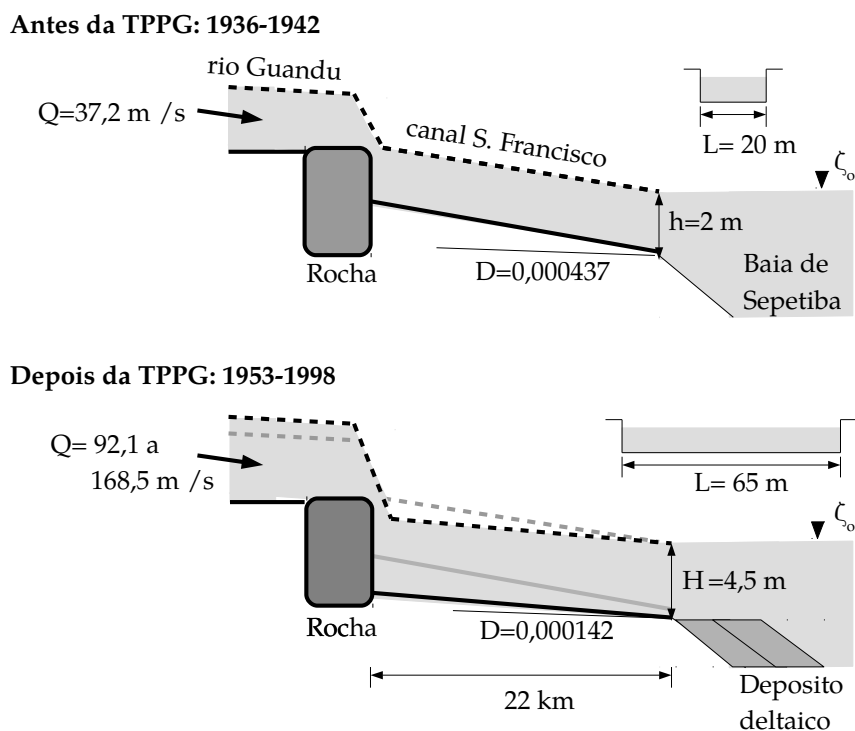


Figura 2.65: Resposta de longo termo do canal de São Francisco devido ao incremento da vazão média pela TPPG.

de São Francisco pela DNOS (déc. 50), o período de construção das barragens da ETA-Guandu (1963) e o desastre natural de 1967 também contribuíram com aportes significativos de sedimento para a calha do rio Guandu e, conseqüentemente para a foz do canal de São Francisco.

A feição deltaica nesse período cresceu rapidamente, devido ao aporte de sedimento oriundo da erosão do leito do rio Guandu. O delta do canal de S. Francisco fundiu-se ao delta do rio da Guarda e ao canal Guandu. Em 1999, o complexo deltaico já tinha cerca de 4 km de largura, com a isobatimétrica de -1 m avançando 3 km para dentro da baía em relação à margem de 1935. A diferença batimétrica, entre as cartas náuticas de 1935 e 1999, mostrou áreas próximas às fozes dos canais de S. Francisco e da Guarda com assoreamento de até 7 m (Figura 2.62 e Figura 2.63). A linha de costa perdeu sua forma côncava, formando lóbulos colonizados por mangues, que avançam para o interior da baía. Entre o canal de São Francisco e o canal do Guandu, o manguezal chegou a avançar, entre 1935 e 2016, cerca de 750 m, valor que também foi confirmado na comparação do mapa Brasil (1922) e imagem do *Google Earth* (2009) (Figura 2.63 e Figura 2.69). A ilha de manguezal, presente na foz do canal de S. Francisco, também não existia na época do levantamento da carta náutica de 1935 (Figura 2.60) (DHN, 1935). As imagens oriundas de aerofotogramas mostram que o assoreamento em algumas partes, foi ainda mais recente, posterior a 1975, especialmente na foz do canal do Guandu (Figura 2.69).

O rápido crescimento do delta do canal Guandu começou após a ampliação da captação da ETA-Guandu para 45,0 m<sup>3</sup>/s, em 1994. Como consequência, também foi ampliada a vazão do seu efluente, na bacia do Guandu-Mirim, dobrando sua vazão. Desde então, a bacia do Guandu Mirim passou a receber da ETA-Guandu cerca de 37×10<sup>3</sup> t/ano de sedimento em suspensão e 58×10<sup>3</sup> t/ano de flocculantes, desaguardando em alta concentrações na baía, pela foz do canal do Guandu. Os flocculantes alteram o comportamento do material suspenso, aumentando sua velocidade de sedimentação. Uma vez que esse sedimento contaminado e em alta concentração chega à baía, sua tendência é flocular e sedimentar mais rapidamente, diminuindo a dispersão da pluma e concentrando o depósito na proximidade da sua foz. De fato, essa é a região onde o manguezal avançou mais para o interior da bacia (Figura 2.69). Em 2010, o canal Guandu sofreu ainda um incremento de 20,1 m<sup>3</sup>/s, devido à transposição das águas pela UTE TKCSA, promovendo a mobilização dos sedimentos do leito e o incremento de 15×10<sup>3</sup> t/ano de sólidos suspensos, oriundos do canal de S. Francisco (Tabela 2.5).

Além dos manguezais adjacentes, as orlas das praias de Sepetiba e de Santa Luzia registraram mudanças na composição do sedimento praiial, a partir da déc. 70. De fato, as fotografias históricas, desse período, ainda retratavam ambas as praias como atraentes orlas de areia branca, divergindo radicalmente da paisagem atual, constituída por uma composição sedimentar escura, enriquecida por sedimento fino e matéria orgânica (Figura 2.66 e Figura 2.67). Na Figura 2.66 é possível perceber que a declividade da praia era maior. À medida que o assoreamento avança, a declividade passa a diminuir, a faixa do estirâncio se alarga e a participação de material coesivo, na composição do sedimento, aumenta.

Em 2012, o Instituto Estadual do Meio Ambiente (Inea) concluiu o projeto de reabilitação ambiental da praia de Sepetiba, executado pela empreiteira Odebrecht. Para tal, foi realizado o remanejamento do mangue invasor e, em seguida, cobriu-se a lama com geotêxtil (tipo de manta que permite o fluxo de água e gases). Por cima da manta, foi distribuída uma camada nova de areia, extraída de uma jazida submarina, na própria baía (Figura 2.67). A obra custou mais de 46 milhões de reais e foi financiada pelo Fundo Estadual de Conservação Ambiental e Desenvolvimento Urbano (FECAM)(VÉLEZ, 2012; INEA, 2012). Mais tarde, investimentos na ordem de 9,5 milhões de reais também foram aplicados no saneamento da região SEA (2014). Esse recurso foi oriundo de um Termo de Ajuste de Conduta (TAC), firmado pelo INEA e pela Companhia Docas, que administra o porto, devido aos impactos ambientais ocorridos durante a dragagem do porto VÉLEZ (2012). Todavia, as condições de balneabilidade continuam ruins e a lama volta a ameaçar a praia de Sepetiba (LOPES, 2014), sugerindo que o processo de assoreamento permanece em curso (Figura 2.67 e Figura 2.68).

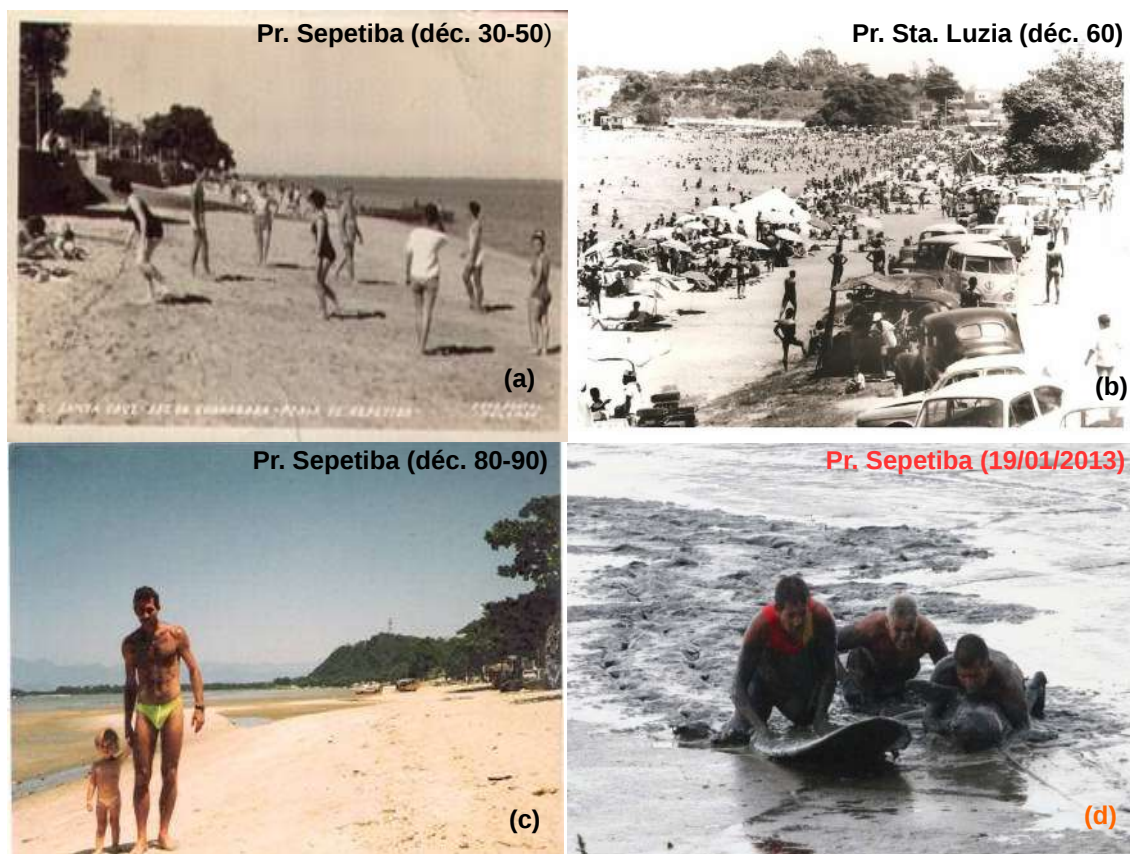


Figura 2.66: Mudança na composição do sedimento das praias adjacentes ao longo do tempo: (a) Foto da praia de Sepetiba, que pelas roupas de praia, estima-se ser da déc. 30 a 50; (b) Foto da praia de Sta. Luzia, que pelos modelos de carros, estima-se ser da déc. 60; (c) Foto da praia de Sepetiba, que pela roupa de praia, estima-se ter ser da déc. 80 a 90; (d) Foto da praia de Sepetiba onde três salva-vidas resgatam um leão marinho encalhado no dia 19/01/2013.

O rápido escurecimento e recolonização da praia de Sepetiba demonstrou que a fonte de sedimentos finos deve ser contínua. Logo não poderia ser resultante das operações de dragagem do passado. Montezuma (2007), em um estudo de modelagem lagrangiana da dispersão da pluma de sedimento fino do bota-fora da dragagem e das fozes dos rios adjacentes também corrobora com essa interpretação ao concluir que a fonte mais provável dos sedimentos finos viria das descargas fluviais e não do bota-fora da dragagem (MONTEZUMA, 2007, 2012). A falta de monitoramento e estudo sedimentológico, nos rios e na baía, foram agravantes que contribuíram para a negligência dos gestores a respeito dos mecanismos sedimentológicos, que resultaram nos efeitos indesejados observados após a conclusão da obra de reabilitação ambiental.

No caso da foz do rio da Guarda, a partir de 1968, o rio passou a receber  $26 \text{ m}^3/\text{s}$ , pela transposição do canal de São Francisco, trazendo consigo  $22 \times 10^3 \text{ t/ano}$  de sólidos suspensos do canal captado (Tabela 2.5). Esse incremento na descarga líquida e sólida recebeu também contribuições de eventuais rompimentos de diques





Figura 2.67: Imagens do *Google Earth* mostrando as mudanças na composição do sedimento da praia e depois da obra de reabilitação ambiental: (a) localização da praia de Sepetiba (1) e Sta. Luzia (2) em relação às fozes do canal de Itá (3), Guandu (4), S. Francisco (5) e rio da Guarda (6); (b) Praia de Sepetiba antes da obra; (c) Praia de Sepetiba com a obra recém concluída; (d) Praia de Sepetiba três anos depois da conclusão da obra.



Figura 2.68: Fotos da visita de campo à praia de Sepetiba em 30/10/13: (a) Foto mostrando a aparência da areia original utilizada na reabilitação ambiental; (b) Foto mostrando a composição arenosa escurecida pela mistura com sedimento fino e início de recolonização por mangue.

das cavas de mineração do Distrito Areiro de Itaguaí.

Estudos com datação do  $^{210}\text{Pb}$  também mostraram um aumento expressivo da taxa de acumulação, a partir da metade do séc. XX (FORTE, 1996; DE CARVALHO GOMES *et al.*, 2009). Segundo Fortes (1996), antes das mudanças do séc. XX,

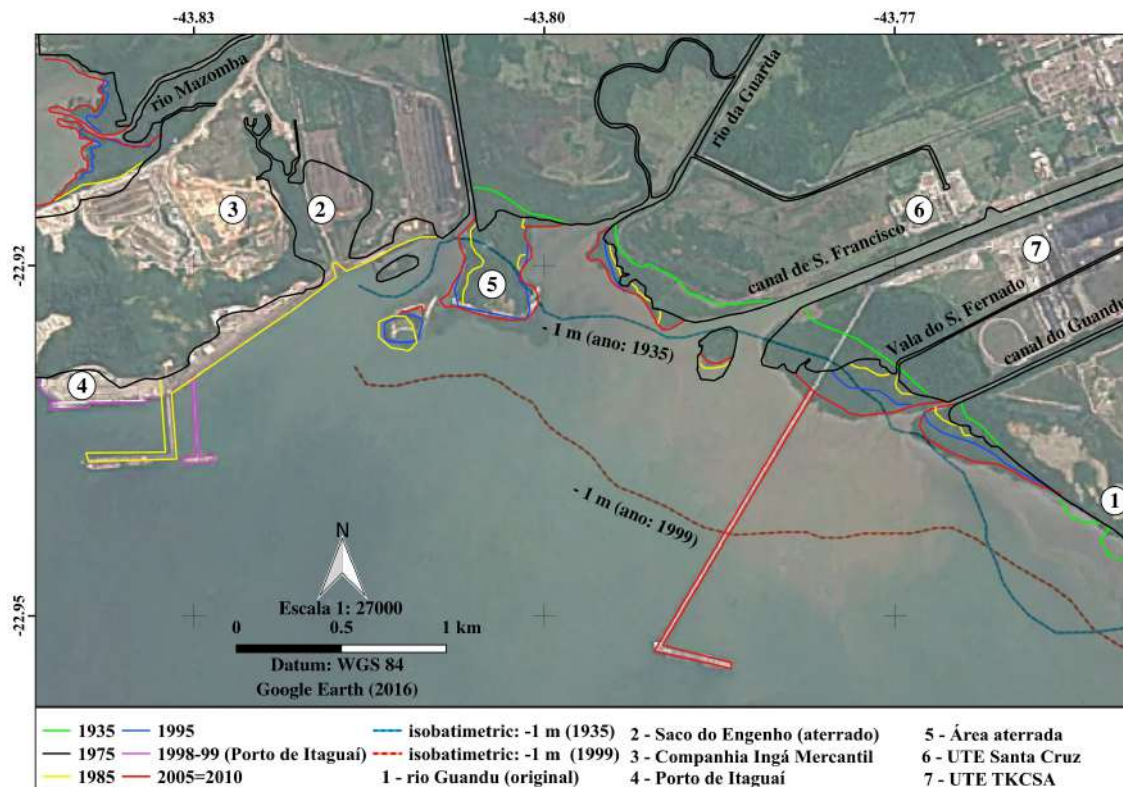


Figura 2.69: Mapa sobrepondo diferentes linhas de costa de 1935 (DHN, 1935), 1975 (Aerofotograma da FUNDREM 1975 (1:40000)) e imagens do landsat entre 1985 e 2016 (Google Earth Engine) e as isóbatas de -1 m de 1935 (DHN, 1935) e 1999 (DHN, 1999).

a taxa de acumulação era, em média, de  $0,03 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{ano}$ , próximo à atual foz do canal S. Francisco e  $0,05 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{ano}$  próximo à antiga foz do rio Guandu (FORTE, 1996). Na primeira metade do século XX, este valor dobrou para  $0,10 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{ano}$  em ambos os pontos. Por fim, na segunda metade do séc. XX (1950 - 1996), o valor dobra novamente, passando para  $0,25 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{ano}$  e  $0,20 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{ano}$ , respectivamente. Em estudo mais recente, realizado por Gomes *et al.* (2009), foi verificado que este padrão permaneceu inalterado na primeira década do séc. XXI. O testemunho coletado entre o canal de S. Francisco e o antigo rio Guandu, apresentou uma taxa de acumulação de  $0,31 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{ano}$ , entre as déc. 20 e 40, passando para  $0,50 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{ano}$ , a partir da déc. 50.

As mudanças morfológicas devido à obra de transposição, não se limitaram ao rio Guandu e seu delta, modificando também a morfologia da foz do rio Paraíba do Sul, que se encontra em Atafona, São João da Barra (RJ) (Figura 2.70). Segundo Ribeiro *et al.* (2004), desde a déc. 50, a área urbana de Atafona vem sofrendo com os efeitos indesejados da retroprogradação da linha de costa, onde mais de 183 construções em 14 quadras foram destruídas (Figura 2.71). A análise espaço-temporal de imagens georreferenciadas apontaram uma taxa estimada de  $7,8 \text{ m/ano}$ , para o período de

1954-2004 (RIBEIRO *et al.*, 2004).

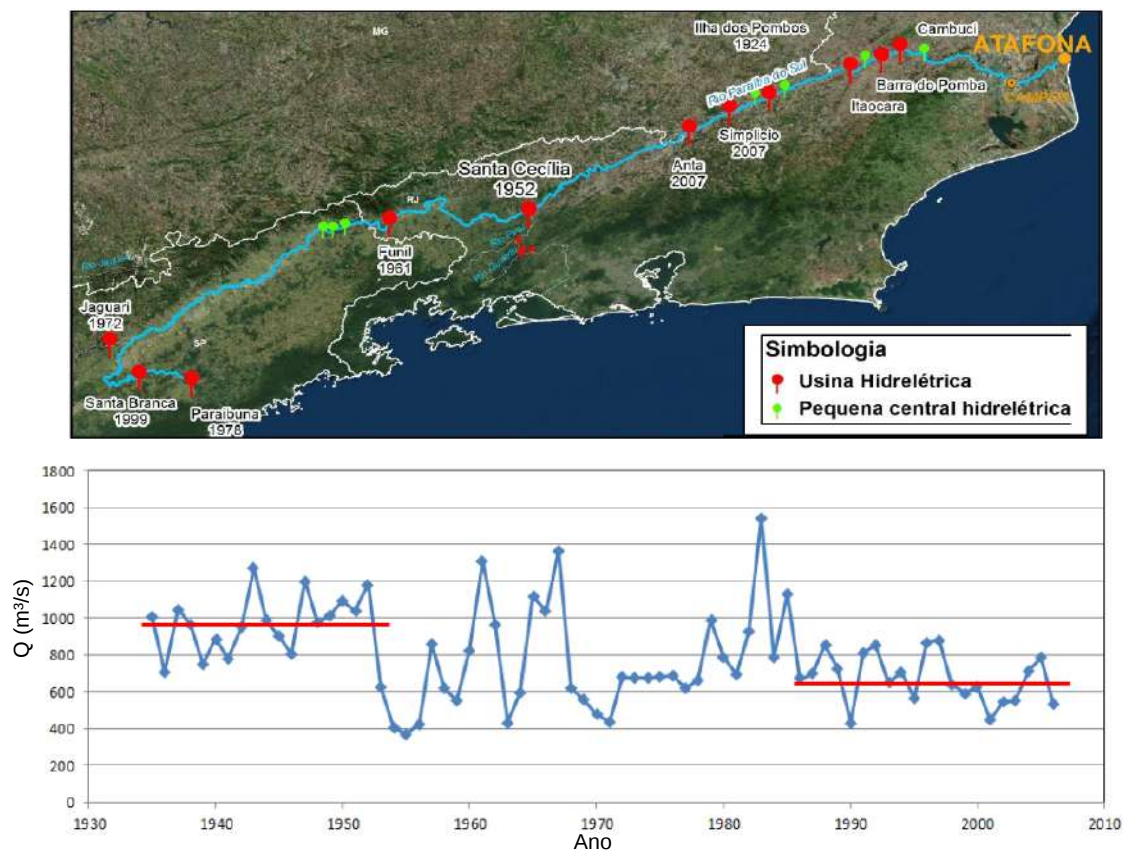


Figura 2.70: Localização da foz do rio Paraíba do Sul, os reservatórios e o hidrograma de vazão média anual da estação fluviométrica de Campos (extraído de LEME *et al.* (2015))

Diversos estudos buscaram explicar o processo de erosão costeira na foz do Paraíba do Sul. Os primeiros estudos descreveram, em termos qualitativos a relação de desequilíbrio do balanço entre o aporte de sedimento e a deriva litorânea (ARGENTO, 1989). Mais tarde, o estudo de COSTA (1994) mostrou que eventos de cheias excepcionais no rio Paraíba do Sul teriam efeito de induzir processos erosivos junto à foz, nos meses de verão, e posterior recuperação, nos meses de inverno, devido à maior participação de ondas do quadrante sul e menor atividade hidráulica do rio.

A conclusão da obra de TPPG, em 1953, resultou na queda brusca da vazão média anual, junto a foz do Paraíba do Sul (Figura 2.70). Mais tarde, com a regularização das cheias, nos meados da déc. 80, a variância do hidrograma também foi atenuada, extinguindo as cheias excepcionais na foz e, conseqüentemente, atenuando seus impactos na morfologia costeira (Figura 2.70).



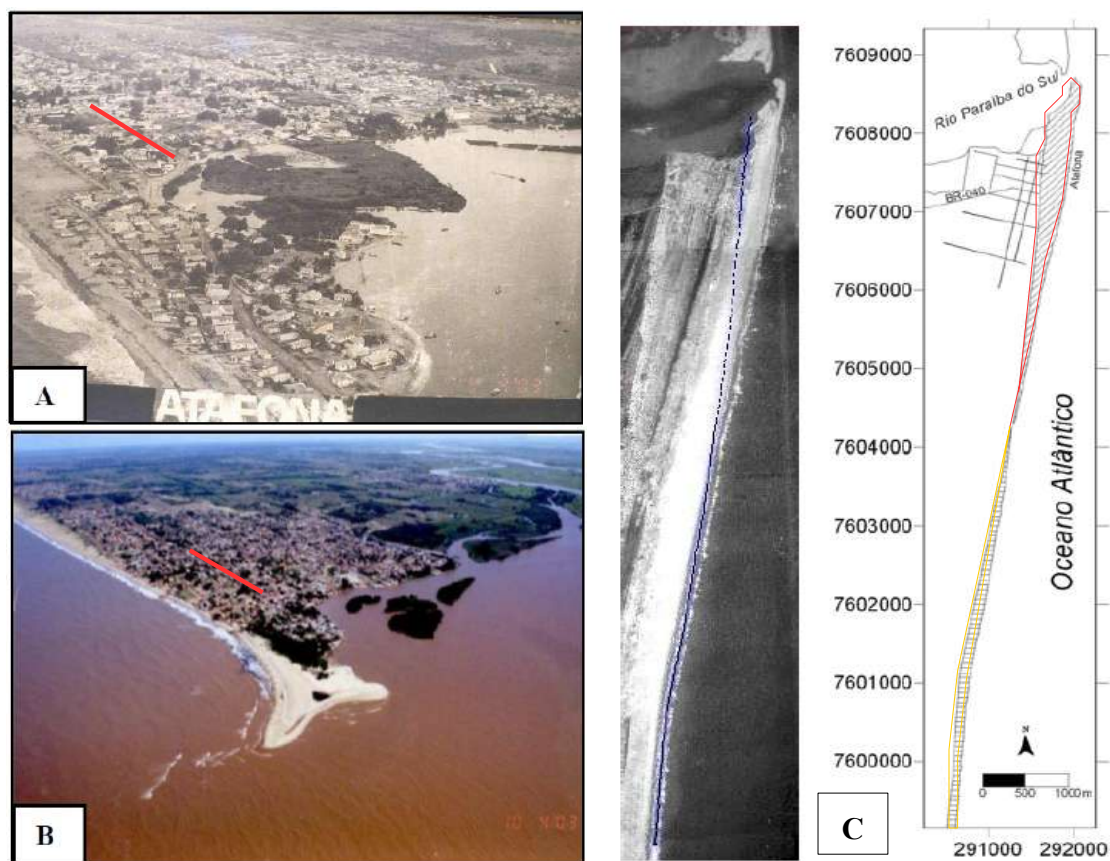


Figura 2.71: Mudanças na morfologia da foz do rio Paraíba do Sul em Atafona, São João da Barra (RJ): A - foto da cidade de Atafona de 1961 (fonte: DNOS); B - foto de Atafona em 2003 (fonte: IBAMA) com partes da cidade já destruída pela erosão costeira; C - comparação de mapas de 1954 e 2004, onde a área contornada de vermelho representa a retroprogradação da linha de costa e em laranja a progradação (extraído de RIBEIRO *et al.* (2004))

## 2.16 Conclusões

A bacia do Guandu chegou a ter sete configurações diferentes entre 1729 e 2010, variando sua área entre 2.002 km<sup>2</sup> e 18.659 km<sup>2</sup>.

O aumento abrupto da vazão, devido à transposição de bacias Paraíba do Sul-Piraí-Guandu, resultou na erosão do trecho a jusante, redução da declividade do leito e aumento da profundidade média. Logo, a transposição de bacias Paraíba do Sul-Piraí-Guandu foi responsável pela transferência de uma grande quantidade de sedimento do leito do rio Guandu para a foz do canal de S. Francisco.

A descarga anual de sólidos para a baía, pelo canal de S. Francisco chegou à ordem de  $259 \times 10^3$  t/ano, cerca de 3 vezes mais do que antes da transposição. O aumento da capacidade de transporte implicou na transferência de maiores quantidades de sedimentos do leito e das margens para a desembocadura, com descarga sólida de fundo chegando a  $120 \times 10^3$  t/ano. A descarga de lavagem, por sua vez,

dobrou, chegando a  $139 \times 10^3$  t/ano.

A bacia do Guandu não formou um delta de única foz, mas um complexo deltaico, envolvendo as fozes do rio do Guarda, canal de S. Francisco e canal do Guandu. A comparação das cartas náuticas mostrou que, em apenas 64 anos, formou-se uma camada de 7 m de espessura. O manguezal, na foz do canal de S. Francisco, avançou cerca de 750 m e a isobatimétrica de -1 m avançou cerca de 2 km.

A quantidade de água, que escoo pelo trecho inferior do rio Guandu, vem diminuindo desde a déc. 70, em resposta ao crescimento das captações por usuários, tendendo a retornar a valores próximos ao natural, na próxima década. Nessa perspectiva, o delta diminuirá seu crescimento e começará a ser remodelado pelas forças hidrodinâmicas locais.

A falta de monitoramento e estudos sedimentológicos nos rios próximos e na baía, foram agravantes que contribuíram para o retorno da lama e do mangue, após a conclusão da obra reabilitação ambiental da praia de Sepetiba.

## Capítulo 3

# Operação dos múltiplos usuários e a crise hídrica

### 3.1 Introdução

A variabilidade da descarga de sólidos suspensos é fortemente dependente do regime de chuva. A chuva é o mecanismo responsável por promover tanto a desagregação das partículas como o seu transporte, através do escoamento superficial, para os rios. Uma vez no rio, a maior parte do material fino chegará, por suspensão, aos oceanos. Entretanto, intervenções hidráulicas, como reservatórios e transposições, podem retê-lo ou desviá-lo do seu destino natural. Logo, as regras operativas dessas obras podem impactar diretamente na variabilidade da descarga de sólidos suspensos de uma seção de controle.

Neste capítulo foram descritas as regras operativas que governam os reservatórios a montante da UEL Sta. Cecília, os reservatórios da transposição Paraíba do Sul-Piraí-Guandu e os reservatórios a jusante da UHE Pereira Passos. Aqui também foram descritas as mudanças operativas devido às duas crises hídricas que se abateu sobre a bacia (2003-2004 e 2014-2014).

### 3.2 Sistema hidroenergético a montante da UEL Sta. Cecília

A continuidade do desenvolvimento hidroenergético da região iniciada no séc. XX levou à inauguração, em 1953, da transposição de bacias Paraíba do Sul-Piraí-Guandu (TPPG) (Figura 2.48 e Tabela 3.1). Com o Decreto-lei nº 7542, de 1945, ficou autorizada a derivação das águas aproveitáveis do ribeirão do Vigário e do rio Piraí e, até o máximo de  $160 \text{ m}^3/\text{s}$ , das águas do rio Paraíba do Sul, para aproveitamento hidroelétrico da TPPG (ONS, 2015). O valor máximo de bombeamento da usina

elevatória estava autorizado apenas se fosse possível garantir defluência mínima de 40 m<sup>3</sup>/s a jusante de Sta. Cecília.

Logo no início da operação da TPPG, constatou-se a necessidade de regularizar a vazão do rio Paraíba do Sul, de modo a garantir uma vazão mínima afluindo para o reservatório de Sta. Cecília. Isso levou à construção do reservatório de Santa Branca a montante, que entrou em operação em dezembro de 1959 (Figura 2.48 e Tabela 3.1).

Em 1961, foi outorgada à Companhia Hidrelétrica do Vale do Paraíba (CHE-VAP) concessão para implantação da UHE Funil, que entrou em operação em 1969 (Figura 2.48 e Tabela 3.1) (ONS, 2015).

Em 1970, foi outorgada a Centrais Elétricas de São Paulo (CESP) concessão para implantação da Usina Hidroelétrica de Jaguari, no rio Jaguari, afluente do Paraíba do Sul, que entrou em operação em 1972 (Figura 2.48 e Tabela 3.1) (ONS, 2015).

Em 14 de fevereiro de 1977, através da Portaria n° 22, o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) publicou as regras para a operação dos reservatórios do rio Paraíba do Sul, na sua configuração final, a qual passou a vigorar, efetivamente, a partir de 28 de fevereiro de 1980. Nesta portaria, passa valer, já em 1978, a regra operativa que permite reduzir, em condições adversas, a descarga mínima a jusante da UEL Sta Cecília de 90 para 71 m<sup>3</sup>/s (Figura 2.48 e Tabela 3.1) (ONS, 2015). Além da Portaria DNAEE n° 022, as regras de operação da cascata de reservatórios até a UEL Santa Cecília foram complementadas com as resoluções GCOI, no RS-SE-791/81 e no RS-G-545/85 (KELMAN *et al.*, 2013). Deste modo, o objetivo da operação hidráulica dos reservatórios de Paraibuna, Santa Branca, Jaguari, Funil e Santa Cecília seria assegurar uma afluência que atenda à derivação para a TPPG e a uma restrição de defluência mínima a jusante.

Em 1978, entrou em operação a UHE Paraibuna, na confluência dos rios Piratininga e Paraibuna, formadores do rio Paraíba do sul (Figura 2.48 e Tabela 3.1) (ONS, 2015).

O plano de regularização estabeleceu também a regra que, a partir de 1980, passou a regularizar a vazão afluente à UEL Sta. Cecília, de 250 m<sup>3</sup>/s em condições hidrológica normais em 190 m<sup>3</sup>/s em condições desfavoráveis (ONS, 2015).

Por sua vez, a vazão bombeada  $Q_{bomb}$ , em Santa Cecília, passou a ser fixada em função da resolução ANA n° 211, de 26/03/03 (Figura 3.1), onde:

$$\text{Se vazão natural}(Q_N) < 190 \text{ m}^3/\text{s}: Q_{bomb} = (119/190)Q_n;$$

$$\text{Se } 190 < Q_N < 209 \text{ m}^3/\text{s}: Q_{bomb} = 119;$$

$$\text{Se } 209 < Q_N < 250 \text{ m}^3/\text{s}: Q_{bomb} = Q_n - 90;$$

$$\text{Se } Q_N > 250 \text{ m}^3/\text{s}: Q_{bomb} = 160;$$

Tabela 3.1: Sumário dos reservatórios e aproveitamentos hidroelétricos na bacia do Paraíba do Sul a jusante da UEL Sta. Cecília. A é a área do espelho d'água do reservatório (km<sup>2</sup>) e Q<sub>d</sub> é a vazão defluente do reservatório (m<sup>3</sup>/s) (extraído do ONS (2012)).

Reservatórios e usinas	A km <sup>2</sup>	Vol. útil hm <sup>3</sup>	Q <sub>d</sub> mín. m <sup>3</sup> /s	Q <sub>d</sub> máx. m <sup>3</sup> /s	Potência MW	Ano início	Empresa
UHE Paraibuna	177	2636,1	30	120 <sup>(a)</sup>	85	1978	CESP
UHE Sta. Branca	19	308,0	40	300 <sup>(b)</sup>	58	1959	LIGHT
UHE Jaguari	56	792,5	10	60 <sup>(a)</sup>	28	1972	CESP
PCH Lavrinhas <sup>(c)</sup>	-	0,0	-	-	30	2011	Alupar
PCH Queluz <sup>(c)</sup>	-	0,0	-	-	30	2011	Alupar
UHE Funil	40	605,3	80	700 <sup>(d)</sup>	222	1969	FURNAS
UEL Sta. Cecília <sup>(e)</sup>	2,7	0,0	71	-	-32	1953	LIGHT

<sup>(a)</sup> Defluência limite do circuito hidráulico: turbina + válvula dispersora.

<sup>(b)</sup> Valor máximo condicionado à incremental devido à restrição de 340 m<sup>3</sup>/s na cidade de Jacareí. Para cálculo de volume de espera utiliza-se 300 m<sup>3</sup>/s como restrição condicionada em Guararema.

<sup>(c)</sup> Operação a fio d'água.

<sup>(d)</sup> Valor condicionado às restrições nas cidades de Resende, Barra Mansa, Volta Redonda e Barra do Piraí (850, 800, 880 e 1.100 m<sup>3</sup>/s, respectivamente).

<sup>(e)</sup> Usina elevatória e defluência a fio d'água.

Em agosto de 2011, entraram em operação as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) Queluz e Lavrinhas, localizadas nos municípios de Queluz-SP e Lavrinhas-SP, respectivamente (Figura 2.48 e Tabela 3.1).

### 3.3 Sistema de transposição de bacias Paraíba do Sul - Piraí - Guandu

A TPPG entrou em operação em 1952, entretanto, sua configuração atual só foi concluída com o início da operação da UHE Pereira Passos, em 1962. Para fins de aproveitamento hidroelétrico, o sistema de transposição é autorizado pelo Decreto-lei n<sup>o</sup> 7542, de 1945, a derivar as águas aproveitáveis do ribeirão do Vigário, do rio Piraí e, até o máximo de 160 m<sup>3</sup>/s, das águas do rio Paraíba do Sul (ONS, 2015). A TPPG é constituída por cinco reservatórios: Lajes (1905), Tocos (1913), Santana (1953), Vigário (1953) e Ponte Coberta (1962) (Tabela 3.2).

Os reservatórios estão interligados por desvios, vertedouros, usinas elevatórias e hidroelétricas. O reservatório de Tocos é o primeiro estágio do sistema e se localiza no rio Piraí, no município de Rio Claro (RJ) (Figura 3.2). Neste ponto, a barragem interrompe completamente o curso do rio Piraí, desviando pelo chamado túnel de

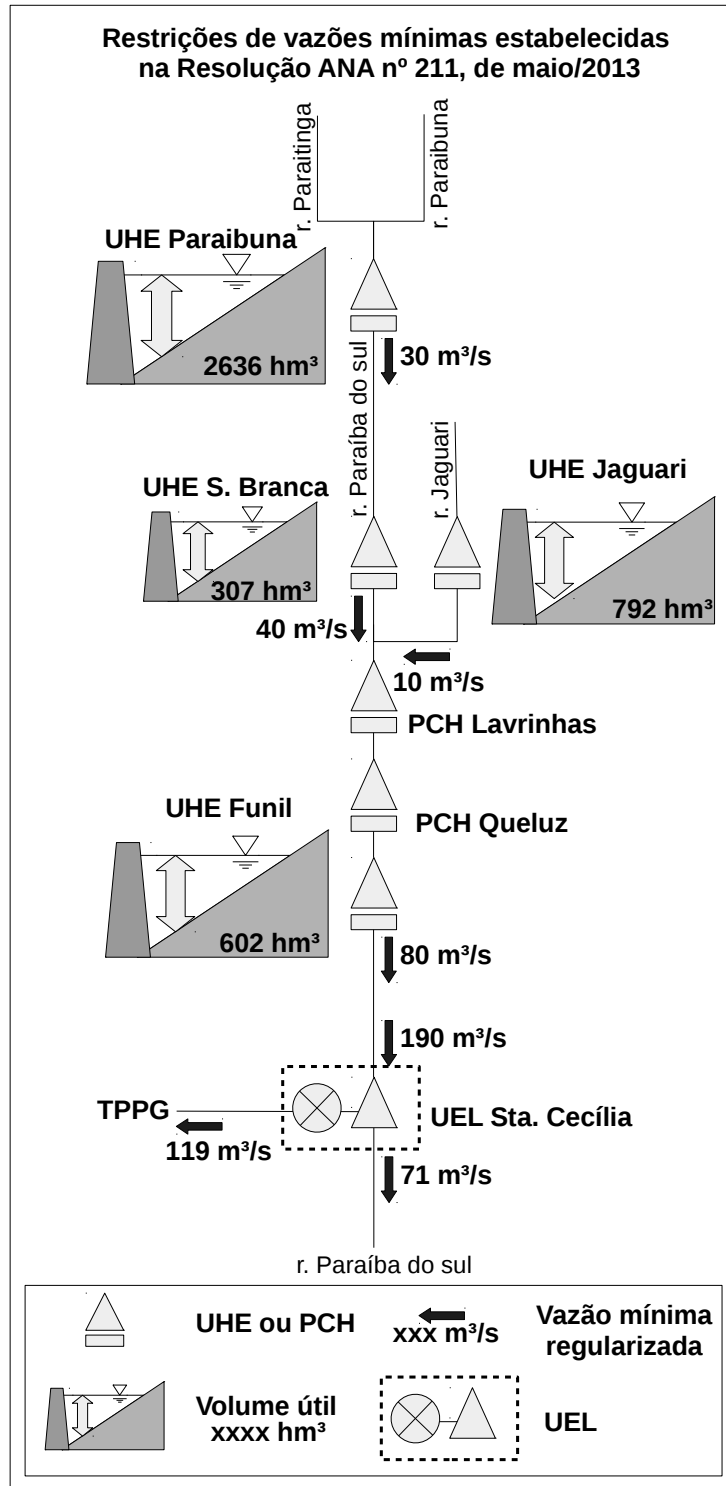


Figura 3.1: Diagrama unifilar do sistema hidroelétrico do rio Paraíba do sul a montante da UEL Sta. Cecília ilustrando a resolução ANA nº 211.

Tocos, vazões de até  $25 \text{ m}^3/\text{s}$ , para o reservatório de Lajes. O início do túnel de Tocos dispõe de estruturas de barragem com quatro comportas e grades de contenção de sólidos grosseiros (Figura 3.4). Na época (1914), com 8,4 km de extensão, o túnel de Tocos foi considerado o maior túnel hidráulico do mundo (RITTA, 2009). A

Tabela 3.2: Sumário dos reservatórios da transposição. A é a área inundada do reservatório correspondente ao nível máximo (km<sup>2</sup>).

Reservatórios	idade anos	A <sup>(a)</sup> km <sup>2</sup>	Vol. útil <sup>(b)</sup> ×10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Cota máx. <sup>(a)</sup> m
Lajes	111	30,73	450,4	415
Tocos	103	1,20	1,9	452
Santana	64	5,95	4,35	363,6
Vigário	64	3,85	6,1	398,6
Ponte Coberta	54	1,21	4,5	85,5

<sup>(a)</sup> LABHID (1999)

<sup>(b)</sup> <http://www.light.com.br/grupo-light/Empresas-do-Grupo/light-energia.aspx>

barragem de Tocos possui 25 m de altura, com uma comporta lateral para descarga de fundo (Figura 3.4). Apenas quando a vazão afluente ao reservatório de Tocos supera os 25 m<sup>3</sup>/s é que o excedente verteria por cima da barragem reconectando-o novamente ao rio Pirai ou, em caso excepcionais, como limpeza, pela operação da comporta lateral.

Em condições médias de longo termo, o reservatório de Tocos desvia 12,6 m<sup>3</sup>/s para o reservatório de Lajes e 1,2 m<sup>3</sup>/s verte no próprio rio Pirai (FEEMA, 1985). Além do reservatório de Tocos, existe ainda a PCH Braço (2011) situada no Rio do Braço, afluente pela margem esquerda do rio Pirai, na divisa dos municípios de Rio Claro (RJ) e de Bananal (SP). Operada a fio d'água, essa PCH tem prevista uma potência instalada de 11,5 MW.

A UEL Sta. Cecília está equipada com quatro unidades de bombeamento, com capacidade de 40±2 m<sup>3</sup>/s cada (FEEMA, 1985). Entretanto, em condição de cheia simultânea, nos rios Pirai e Paraíba do Sul, o que é comum, o bombeamento é suspenso e toda vazão afluente é vertida para a jusante (ONS, 2013). A suspensão do bombeamento é decorrente do fato de que as condições de cheia no rio Pirai são sempre mais críticas que as do rio Paraíba do Sul. Ao acionar as quatro bombas, a usina adquire capacidade máxima de 160±8 m<sup>3</sup>/s.

O reservatório de Santana é o mais crítico do sistema de transposição, quanto à capacidade de responder a eventos de cheias. Em condições normais, o reservatório de Santana recebe afluência média de longo termo de 8,1 m<sup>3</sup>/s, do rio Pirai, e 152,9 m<sup>3</sup>/s, da UEL Santa Cecília, que são desviado para o reservatório de Vigário, por uma usina elevatória de mesmo nome (Tabela 3.3) (FEEMA, 1985). A principal restrição da operação do reservatório de Santana encontra-se na defluência máxima permitida pela barragem de Santana. A LIGHT libera, nesta barragem – conforme

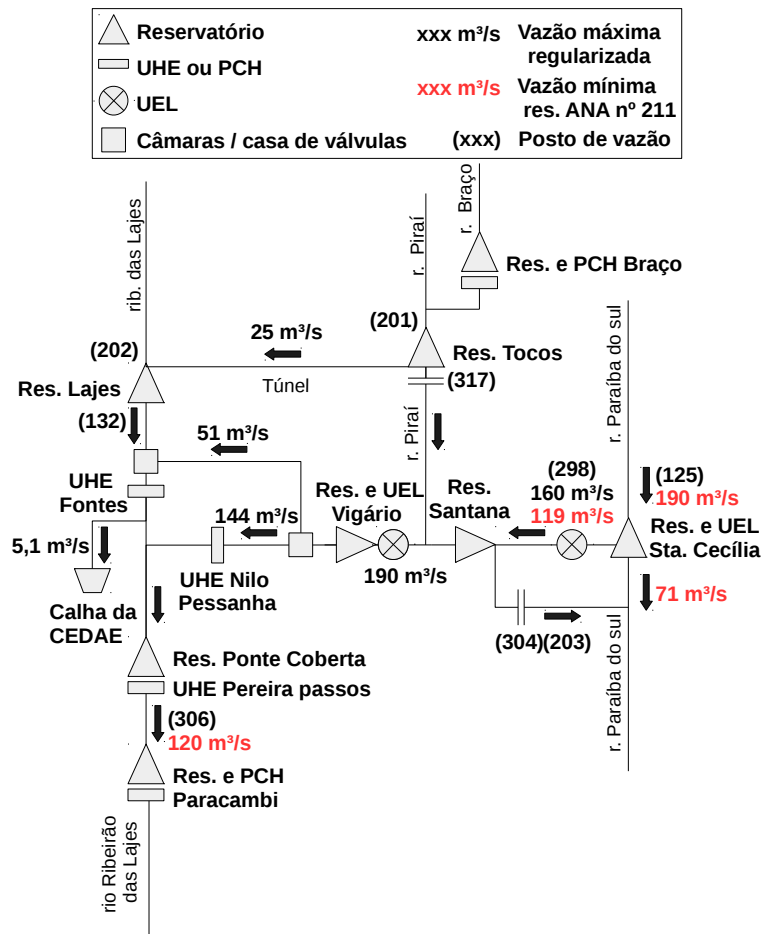


Figura 3.2: Diagrama unifilar do sistema de transposição de bacias Paraíba do Sul-Piraí-Guandu.

acordo com a Prefeitura Municipal de Barra do Piraí, através dos Ofícios 627-GP de 16/09/1953 e 661-GP de 25/10/1953 –, uma descarga de  $32\text{m}^3/\text{s}$  durante 15 minutos, a cada dois dias, com a finalidade de limpeza da calha do rio Piraí (ONS, 2016). Em situações de cheia no rio Piraí, a LIGHT adota a restrição de defluência máxima pela barragem, que é de até  $10\text{m}^3/\text{s}$  (ONS, 2014). Esta restrição decorre do risco de inundação de áreas urbanas no município de Barra do Piraí. Considerando que o bombeamento máximo da UEL Vigário é de  $190\text{m}^3/\text{s}$ , quando a descarga do rio Piraí supera esse valor, o bombeamento na UEL Santa Cecília pode ser reduzido, interrompido ou mesmo invertido (ONS, 2014). Este procedimento de controle de cheia visa minimizar a descarga pela barragem e garantir que o nível máximo do reservatório (363,6 m) não seja ultrapassado (Figura 3.3) (ONS, 2014).

O reservatório de Lajes é o maior de todos (Tabela 3.2), porém sua participação é a mais modesta, por se tratar de uma reserva estratégica, voltada ao abastecimento, no caso de se interromper a captação da ETA-Guandu. Em condições operacionais típicas, o reservatório recebe afluições média de longo de termo de  $5,6\text{m}^3/\text{s}$ , do ribeirão das Lajes, e  $12,6\text{m}^3/\text{s}$ , do túnel de Tocos (FEEMA, 1985). Deste reser-



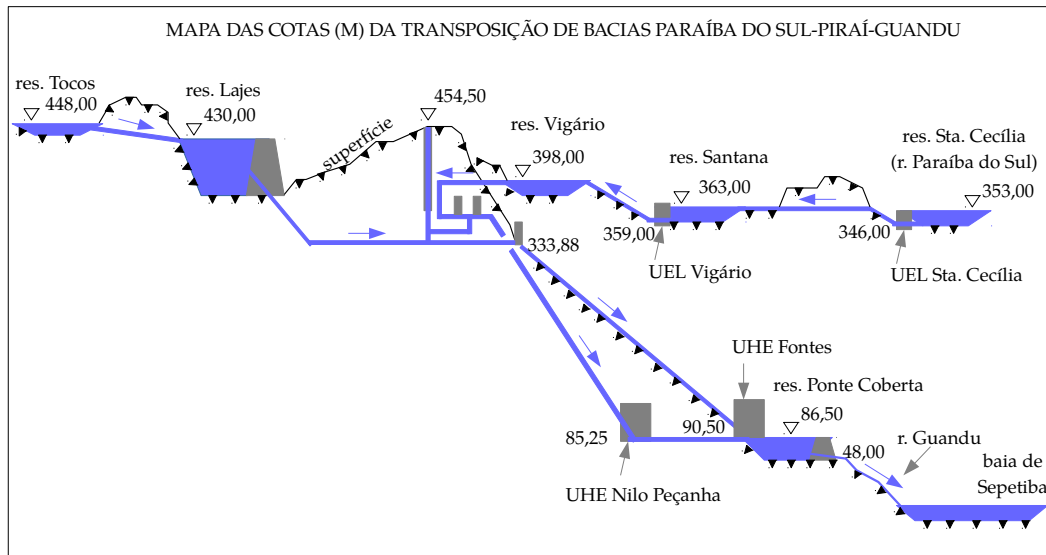


Figura 3.3: Mapa esquemático das cotas (m) do sistema de transposição de bacias Paraíba do Sul-Piraí-Guandu.

vatório, são destinados, via casa de válvulas,  $18,2 \text{ m}^3/\text{s}$  para UHE Fontes Novas para fins de geração hidrelétrica (FEEMA, 1985). Parte desta descarga desviada ( $5,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) é destinada diretamente para o abastecimento por adutoras, chamadas de calha da CEDAE.



Figura 3.4: (a) Barragem de Tocos, foto tirada em 1914 (extraído de CBDB (2011)). (b) Entrada do túnel de Tocos, foto tirada em 2011 (extraído de SEA-PROJECTS (2011)). (c) Detalhe das 4 comportadas da entrada do túnel de Tocos, foto tirada em 2011 (extraído de SEA-PROJECTS (2011)). (d) Desembocadura do túnel de Tocos, foto tirada em 1914 (extraído de CBDB (2011)).

Tabela 3.3: Definição dos postos (xxx) de vazão natural e artificial e suas respectivas formulações (extraído do ONS (2015)).

Nome do Posto	Posto	Formulação
Santa Cecília	(125)	vazão natural
Tocos	(201)	vazão natural
Lajes	(202)	vazão natural
Santana	(203)	vazão natural
UEL Sta. Cecília	(298)	$[(125)*119]/190$ , se $(125) \leq 190 \text{ m}^3/\text{s}$ $119 \text{ m}^3/\text{s}$ , se $190 \text{ m}^3/\text{s} \leq (125) \leq 209 \text{ m}^3/\text{s}$ $(125)-90 \text{ m}^3/\text{s}$ , se $209 \text{ m}^3/\text{s} \leq (125) \leq 250 \text{ m}^3/\text{s}$ $160 \text{ m}^3/\text{s}$ , se $(125) \geq 250 \text{ m}^3/\text{s}$
Vert. Tocos	(317)	Máx.[0; (201)-25 m <sup>3</sup> /s]
Santana	(315)	$((203)-(201))+(317)+(298)$
Vert. Santana	(304)	$(315)-(316)$
Vigário	(316)	Mín.[(315); 90 m <sup>3</sup> /s]
Nilo Peçanha	(131)	Mín.[(316); 144 m <sup>3</sup> /s]
Lajes	(132)	$(202) + \text{Mín.}[(201); 25 \text{ m}^3/\text{s}]$
Fontes	(303)	$[(132)+\text{Mín.}[(316)-(131); 34 \text{ m}^3/\text{s}]]$ , se $(132) < 17 \text{ m}^3/\text{s}$ $[17 \text{ m}^3/\text{s}+\text{Mín.}[(316)-(131); 34 \text{ m}^3/\text{s}]]$ , se $(132) \geq 17 \text{ m}^3/\text{s}$
Pereira Passos	(306)	$(303)+(131)$



Figura 3.5: Barragem de Santana em 1953 e em 2014, esta última já visivelmente assoreado (extraído de FERREIRA e R.O. (2014))

O reservatório de Vigário é o último estágio, antes da queda de 312 m onde ocorre o aproveitamento hidroelétrico das UHEs Nilo Peçanha (380 MW) e Fontes Nova (132 MW), gerando nesta etapa, um total de 512 MW. Este reservatório recebe as águas do reservatório de Santana, via bombeamento elevatório de 35 m de recalque pelo UEL Vigário (FEEMA, 1985).

O reservatório Ponte Coberta é o último reservatório do sistema de transposição, localizado na bacia do Guandu. Este reservatório recebe as águas oriundas do aproveitamento hidroelétrico das UHEs Nilo Peçanha e Fontes Nova, que são armazenadas para o atendimento de demanda de ponta (horária), através da UHE Pereira Passos, gerando até 100 MW. A usina é composta por duas turbinas, com capaci-

Tabela 3.4: Empreendimentos instalados na bacia responsáveis pela captação superficial de pelo menos 1 m<sup>3</sup>/s (extraído de COELHO e ANTUNES (2012)).

Usuários	Uso	Outorga (m <sup>3</sup> /s)
Sistema Acari (Cedae)	Abastecimento público	1,7
ETA-Guandu (Cedae)	Abastecimento público	45
UTE TKCSA (ThyssenKrupp AG)	Geração de energia	18 <sup>(a)</sup>
UTE Sta. Cruz (Furnas SA)	Geração de energia	26 <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> vazão captada, porém não outorgado, por se tratar de água salobra.

dade máxima individual de 162 m<sup>3</sup>/s e engolimento global de 324 m<sup>3</sup>/s (FEEMA, 1985). Em condições normais, a descarga defluente média de longo termo é de 173,5 m<sup>3</sup>/s (série de vazões médias, de 1931 a 1980) com restrição mínima de 120 m<sup>3</sup>/s determinada pela resolução ANA n° 211, de 26 de maio de 2003 (FEEMA, 1985). Tecnicamente, o ciclo horário da operação da UHE Pereira Passos deveria ser dividido em carga leve de 120 m<sup>3</sup>/s, (das 22 às 7 h), carga média de 159 m<sup>3</sup>/s (das 7 às 17 h) e carga pesada de 324 m<sup>3</sup>/s (das 17 às 22 h) (FEEMA, 1985; SONDOTECNICA, 2006). O próprio vertedouro da UHE Pereira Passos, dimensionado para uma vazão de 350 m<sup>3</sup>/s, nunca foi acionado, exceto em períodos de manutenção das unidades geradoras (Comunicado em visita técnica ao reservatório).

### 3.4 Usuários a jusante da UHE Pereira Passos

A parte da bacia do Guandu a jusante da UHE P. Passos é caracterizada por múltiplos usos da água. No sistema de cobrança pelo uso da água da Região Hidrográfica do Guandu (RH II) constavam 102 empreendimentos no início de 2013 (INEA, 2013). Em termos de número de empreendimentos, 42% deles corresponderam a usos urbanos diversos (posto de gasolina, clubes, condomínios, etc.), 40% à indústria, 9% ao saneamento, 4% à mineração, 3% às termoeletricas e 2% à irrigação (INEA, 2013).

Em termos de vazão outorgada, COELHO e ANTUNES (2012) avaliando 45 empreendimentos, apontaram o abastecimento público como a principal forma de uso da água na bacia do Guandu, seguido pelas termoeletricas, quando considerada suas captações não outorgadas. A Tabela 3.4 mostra que seis usuários do rio Guandu têm captação superficial de pelo menos 1 m<sup>3</sup>/s, na qual dois são de abastecimento público, três são de termoeletricas e refrigeração e apenas um é para consumo industrial.

Tabela 3.5: Unidades geradoras instaladas na bacia do Guandu a jusante da UHE Pereira Passos.

Empreendimento	Empresa	Inauguração (ano)	Potência instalada (MW)
PCH Paracambi	LightGer SA	2011	25
UTE Paracambi	Usina Termelétrica Paracambi Ltda	2003	500
UTE Barbosa Lima Sobrinho <sup>(a)</sup>	Petrobrás SA	2001	386
UTE Baixada Fluminense	Petrobrás SA	2014	530
UTE Queimados	GenPower Energy Part. Ltda	2015 <sup>(b)</sup>	450
UTE TKCSA	ThyssenKrupp AG	2010	490
UTE Santa Cruz	Furnas SA	1968	932

<sup>(a)</sup> Antiga UTE Eletrobolt, adquirida pela Petrobrás em 2005.

<sup>(b)</sup> Ano previsto para inauguração (não confirmado).

### 3.4.1 Setor hidroenergético

A parte da bacia do Guandu a jusante da UHE Pereira Passos possui em operação uma pequena central hidroelétrica (PCH) e cinco termoelétricas (UTE), reunindo uma potência instalada de 3.313 MW (Tabela 3.5). Sua proximidade com a região industrializada mais dinâmica do país, torna esse parque um gerador estratégico. Em termos de impacto hidrossedimentológico, três empreendimentos se destacam dos demais: a PCH Paracambi, UTE Santa Cruz e UTE TKCSA. A UTE Paracambi, UTE Baixada Fluminense e UTE Barbosa Lima Sobrinho operam em ciclo fechado, logo, suas captações, no rio Guandu, são desprezíveis.

A PCH Paracambi é uma pequena central hidroelétrica que opera a fio d'água, inaugurada em 2011 pela LightGer (Light e Cemig). Localizada logo a jusante da UHE Pereira Passos, o remanso, gerado por esse reservatório condiciona a retenção parcial de sólidos suspensos, não só da transposição como também dos rios Cacarias, Onça, Macacos e Ribeirão da Floresta.

A UTE Santa Cruz foi inaugurada em 1968 e, atualmente, é operada pela Furnas SA. A usina tem capacidade instalada de 932 MW, distribuídos por quatro unidades geradoras a vapor e duas unidades geradoras a gás. A água utilizada no resfriamento dos trocadores de calor é captada no canal de São Francisco, cerca de 26 m<sup>3</sup>/s, e, após a sua utilização, lançada no canal de Santo Agostinho, apenas com um pequeno acréscimo de temperatura, de acordo com normas e padrões estabelecidos pela legislação vigente. Em dezembro de 2014, foi instalado um totalizador de vazão na tubulação de sucção, para exercer um controle mais efetivo da captação de água





3,50 x 8 m (RITTA, 2009). A eliminação de sedimento é feita por uma comporta de purga (RITTA, 2009). Essas barragens, que visam, originalmente, garantir o nível adequado para captação, terminaram por criar uma lagoa lateral próxima à captação, chamada de lagoa da Cedae. Antiga depressão, produzida durante a construção das barragens, hoje essa lagoa atua como uma lagoa de estabilização, depurando parte da carga de esgoto oriunda dos rios Poços e Ipiranga.

O processo de potabilização da água começa antes da captação de água com um gradeamento, onde os materiais grosseiros contidos na água são retidos. Depois, a água segue para a desarenação, onde a fração arenosa é retida na caixa de tranquilização. Em seguida, na etapa de coagulação química são adicionados os produtos químicos, sulfato de alumínio e cloreto férrico, responsáveis pela aglutinação das partículas finas (Figura 3.7). O processo de floculação é acelerado com a introdução de agitação controlada, que facilita a colisão e aglutinação da partículas em flocos mais pesados. A sedimentação dos flocos ocorre nos decantadores, formando uma camada de lodo, que é retirado periodicamente com raspadores de fundo e descargas hidráulicas. A fase líquida da decantação é direcionada para os filtros de areia e/ou carvão antracitoso, com objetivo de remover os particulados que ainda persistam na fase líquida. Em seguida, a água filtrada é submetida a desinfecção com cloro, para eliminar bactérias, e depois fluoretação com sal de flúor para combate à cárie dentária. Por último, o pH da água é corrigido para neutro (pH=7,0) com cal hidratada ou cal virgem. Para garantir que a água distribuída esteja em conformidade com os padrões de potabilidade exigidos pela Port. 518/2004 do Ministério da Saúde, a ETA-Guandu conta ainda com um sistema de plantão 24 h por dia.



Figura 3.7: Detalhamento da parte de tratamento da água da ETA-Guandu

Segundo o *site* da Cedae, o tratamento da água consome diariamente 150 t de sulfato de alumínio, 30 t de cloreto férrico, 15 t cloro gás, 25 t de cal virgem e 10 t de fluossilícico. Para atender a esse consumo diário de produtos químicos, chegam diariamente, na ETA-Guandu, 20 carretas com capacidade de 20 t de produtos químicos. O custo mensal, apenas com a insumos químicos é da ordem de 3,5 milhões de reais.

O rejeito da ETA-Guandu é formado pela descarga hidráulica do lodo dos decantadores e a pela lavagem dos filtros, representando entre 0,2 e 5,0 % do volume total de água tratada. Esse rejeito é composto por materiais inertes, matéria orgânica e precipitados químicos, incluindo compostos coagulantes de alumínio e ferro em grandes quantidades. Os rejeitos das estações de tratamento de água são classificados como resíduos sólidos e deveriam ser tratados e dispostos corretamente segundo a norma brasileira ABNT 10.004:2004. Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos, entende-se, como disposição final ambientalmente adequada a distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e assim minimizando seus impactos ambientais adversos.

Entretanto, desde muito tempo, a maior parte dos lodos das estações de tratamento de água brasileiras tem sido lançada nos cursos de água próximos ou na própria fonte de água, que a estação processa. Na ETA-Guandu, não é diferente. Apesar de omitido nas plantas esquemáticas divulgadas ao público, seu rejeito retorna à bacia do Guandu, através do lançamento em um canal, que deságua na rio Capenga, na sub-bacia do Guandu Mirim. A Cedae disponibiliza escassas informações a respeito dessa etapa do processo de tratamento da água. A partir de uma apresentação da Cedae feita na 26<sup>o</sup> Feira Nacional de Saneamento e Meio Ambiente (Fenasan - 2015)<sup>1</sup>, sabe-se que esse efluente tem vazão média de 3 m<sup>3</sup>/s.

Estudo sobre a caracterização física e química do rejeito produzido pela ETA-Guandu foi conduzidos por DELGADO (2016) e encontra-se descrita na Tabela 3.6 e Tabela 3.7. Nota-se na Tabela 3.7 a expressiva presença de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, revelando a contaminação do rejeito por floculantes. Em termos de caracterização ambiental, Delgado (2016) classificou o rejeito como resíduo não perigoso classe II A - Não Inerte, segundo os critérios da norma brasileira ABNT 10.004:2004. O aspecto não inerte da classificação se referiu aos valores de ferro e manganês totais, que ultrapassaram os limites máximos permitidos pela norma Tabela 3.8.

---

<sup>1</sup>[http://www.fenasan.com.br/arquivos/2015/11h00\\_2\\_b.edes\\_oliveria\\_06-08\\_sant3.pdf](http://www.fenasan.com.br/arquivos/2015/11h00_2_b.edes_oliveria_06-08_sant3.pdf)

Tabela 3.6: Caracterização física do rejeito da ETA-Guandu (extraído de DELGADO (2016)).

Parâmetro	média
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,092
Areia fina (%)	8
Silte (%)	84
Argila (%)	8
Limites de Atterberg	Não Plástico
pH	6,1

Tabela 3.7: Caracterização química do rejeito da ETA-Guandu (extraído de DELGADO (2016)).

Parâmetro	média
Teor de matéria orgânica (%)	15,6
Análise química (%)	
SiO <sub>2</sub>	12,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,0
SO <sub>3</sub>	1,3
CaO	0,13
TiO <sub>2</sub>	0,31
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,83
Na <sub>2</sub> O	<0,1
MgO	0,32
K <sub>2</sub> O	0,29
F	0,21
Perda ao fogo	47,0



Tabela 3.8: Caracterização ambiental do rejeito da ETA-Guandu (extraído de DELGADO (2016)).

Parâmetro	valor mg/l	ABNT NBR 10004: 2004
Ensaio de lixiviação		Anexo F
Bário total	0,65671	70,0
Cádmio total	0,000091	0,5
Chumbo total	0,001545	1,0
Cromo total	0,027805	5,0
Ensaio de solubilização		Anexo G
Alumínio total	<0,002757	0,20
Bário total	0,461803	0,70
Cádmio total	<0,00001	0,005
Chumbo total	<0,000207	0,01
Cobre total	0,007116	2,00
Cromo total	<0,000062	0,05
<b>Ferro total</b>	<b>0,631939</b>	<b>0,30</b>
<b>Manganês total</b>	<b>6,498353</b>	<b>0,10</b>
Sódio total	39,004312	200,0
Zinco total	0,006983	5,00
Cloreto	29,19	250,0

### 3.5 Mudanças operativas devido à crise hídrica

Períodos de escassez hídrica se destacam por modificarem, temporariamente, as regras de operação dos reservatórios. No presente estudo, o período de monitoramento (15/04/2014 a 14/04/2016) abarcou, quase integralmente, o período de escassez hídrica que se abateu nas bacias hidrográficas do sudeste brasileiro. As chuvas do verão 2014-2015 foram mais escassas, nas regiões sudeste e centro-oeste, devido, entre outros fatores, à ausência de episódios bem configurados da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)(CAVALCANTI, 2014). A Figura 3.8 mostrou o mês de janeiro de 2015 com visível escassez de chuva na bacia do Paraíba do Sul e Guandu, por outro lado excesso de chuva na bacia do rio Madeira.

Dentre os anos mais secos registrados, dois eventos de escassez hídrica se destacaram, por modificarem temporariamente as regras de operação do sistema hidroelétrico do rio Paraíba do Sul a montante da UEL Santa Cecília. O primeiro evento ocorreu entre 2003 e 2004, resultando em uma série de cinco resoluções, emitidas pela ANA<sup>2</sup>, das quais quatro alteraram as vazões mínimas, durante seu tempo de vigência (Tabela 3.9). Mais uma vez, esse procedimento se repetiria em 2014-2015, quando uma escassez ainda mais severa se abateu no sistema, resultando em

<sup>2</sup><http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/outorgaefiscalizacao/RioParaibadoSul.aspx>

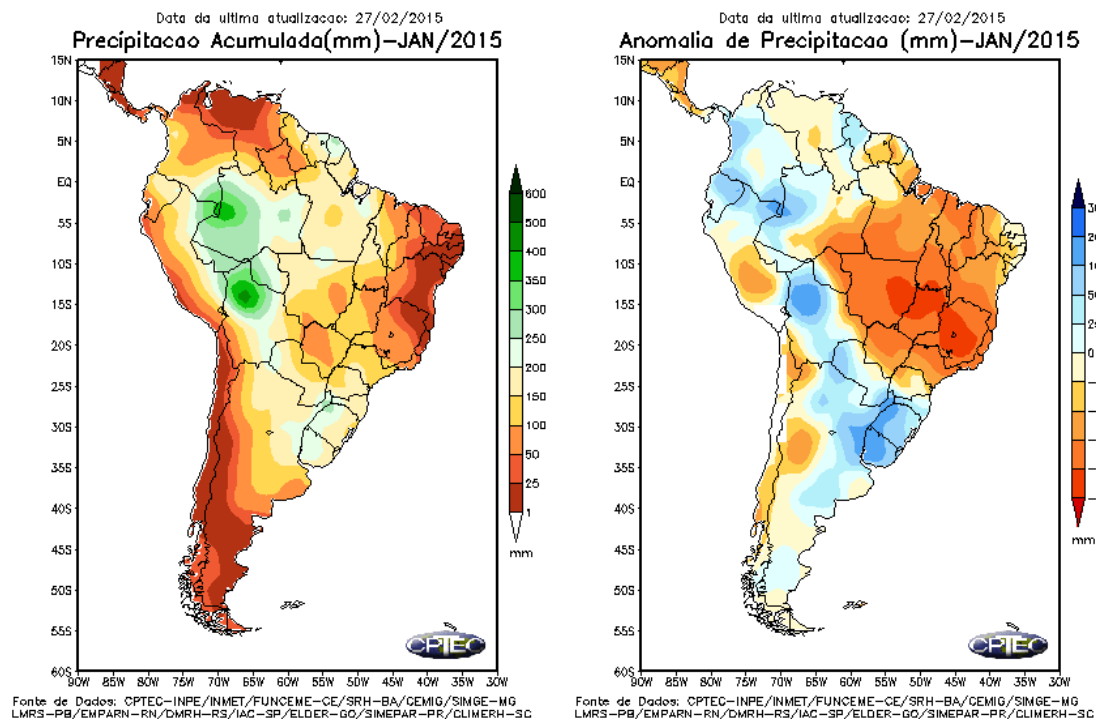


Figura 3.8: Precipitação mensal (mm) e anomalia de precipitação (mm) para janeiro 2015. As anomalias são desvios das médias mensais em relação à climatologia do INMET (1961 a 1990) (fonte: CPTEC/INPE).

oito resoluções que modificaram as vazões mínimas, durante seu tempo de vigência (Tabela 3.9).

Os baixos valores de precipitação contribuíram para que, as vazões médias mensais ocorressem abaixo da média de longo termo nas bacias do Paraíba do Sul, São Francisco e Paraná (Figura 3.9).

Nos anos de escassez hídrica, o volume dos reservatórios também se altera, afetando a capacidade de retenção de sedimento fino (Figura 3.11 e Figura 3.12). Na estiagem de 2014 - 2015, alguns reservatórios, como Paraibuna e Santa Branca, chegaram no volume morto, na primeira metade do ano de 2015 (Figura 3.10). O reservatório de Funil, estratégico para garantir a vazão mínima, para transposição em Santa Cecília, teve seu volume útil preservado às custas do sacrifício dos reservatórios de Sta. Branca e Paraibuna. Quando o volume útil atinge valores muito baixos, ou é totalmente consumido, a operação de geração de energia é diminuída ou interrompida, necessitando usar outras formas de vertimento, como válvulas difusoras.

Como a cascata dos reservatórios da TPPG possuem pequena capacidade de armazenamento de água, exceto Lajes, eles operam a fio d'água. Logo, seu volume não foi alterado significativamente, mas apenas a vazão transposta. Durante a estiagem de 2014-2015, os valores de vazão defluente mínima da UHE Pereira Passos

Tabela 3.9: Resoluções emitidas pela ANA que alteraram as regras da vazão mínima durante os eventos de escassez hídrica de 2003/04 e 2014/15.

ANA Res. n <sup>o</sup>	Vigência		SC			F	J	SB	P
	início data	fim data	mont. m <sup>3</sup> /s	jus. m <sup>3</sup> /s	bomb. m <sup>3</sup> /s	jus. m <sup>3</sup> /s	jus. m <sup>3</sup> /s	jus. m <sup>3</sup> /s	jus. m <sup>3</sup> /s
211	26/03/03	hoje	190	71	119	80	10	40	30
282	04/08/03	20/09/04	160	71	119	80	10	40	30
408	04/08/03	20/09/04	160	71	119	80	10	40	30
418	26/09/05	08/10/05	190	71	119	80	10	40	30
700	27/05/14	15/07/14	173	59	114	80	10	40	30
1038	16/07/14	28/08/14	165	55	105	80	10	40	30
1309	29/08/14	22/12/14	160	52	108	80	10	40	30
2051	23/12/14	29/01/15	140	42	98	80	10	40	30
86	30/01/15	26/02/15	140	40	100	80	7	34	30
145	27/02/15	22/03/15	110	35	75	70	4	34	30
205	23/03/15	28/06/15	110	35	75	70	4	30	30
714	29/06/15	31/10/15	110	35	75	70	4	30	25
1204	26/10/15	31/01/16	110	35	75	60	4	10	7
65	28/01/16	31/03/16	110	35	75	60	4	10	7
288	28/03/16	31/05/16	110	35	75	60	4	10	7

SC: UEL Santa Cecília.

F: UHE Funil.

J: UHE Jaguari.

SB: UHE Santa Branca.

P: UHE Paraibuna.

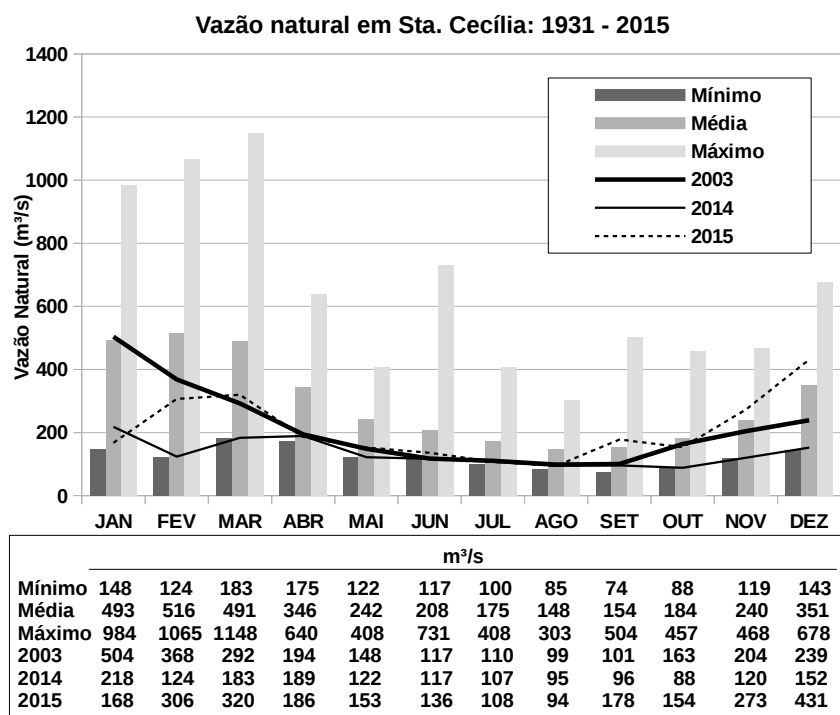


Figura 3.9: Descrição estatística da vazão natural que passou em UEL Sta. Cecília entre 1931 e 2015. Comparação com os eventos de escassez hídrica dos anos de 2003, 2014 e 2015. Fonte: ONS (2015)



Figura 3.10: Reservatório de Paraibuna durante a estiagem de 2014/15. Faixa sem vegetação delimitando a área originalmente inundada em condições normais. Foto tirada em 04 de agosto de 2015 por José Gabriel (*Greenpeace*).

foram frequentemente menores que  $120 \text{ m}^3/\text{s}$ , chegando a valores mínimos de  $88 \text{ m}^3/\text{s}$  (Tabela 3.9).

À medida que a duração do regime de vazões baixas foi se prolongando no rio

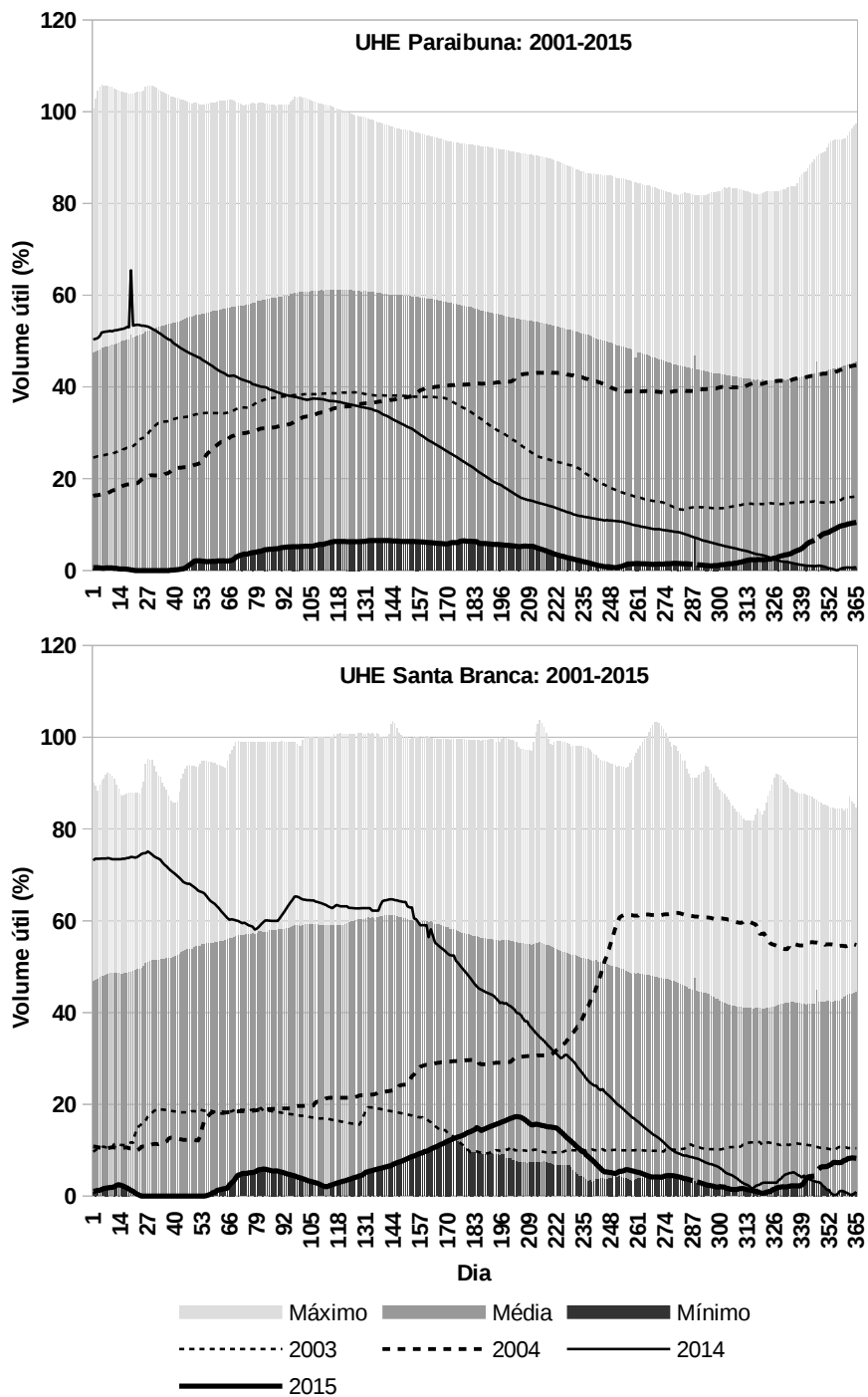


Figura 3.11: Descrição estatística do volume útil dos reservatórios de Paraibuna e Santa Branca entre 2001 e 2015. Comparação com os eventos de escassez hídrica dos anos de 2003-2004 e 2014-2015. Fonte: ONS-IPDO

Guandu, a ETA-Guandu começou a ter dificuldade de manter o nível mínimo, no ponto de tomada de água. A solução encontrada pela empresa foi altear em 0,5 m a barragem, fixando tábuas junto às comportas.

O ano de escassez hídrica foi especialmente prejudicial para os empreendimentos instalados ao longo do canal de São Francisco. Com a diminuição da vazão afluente

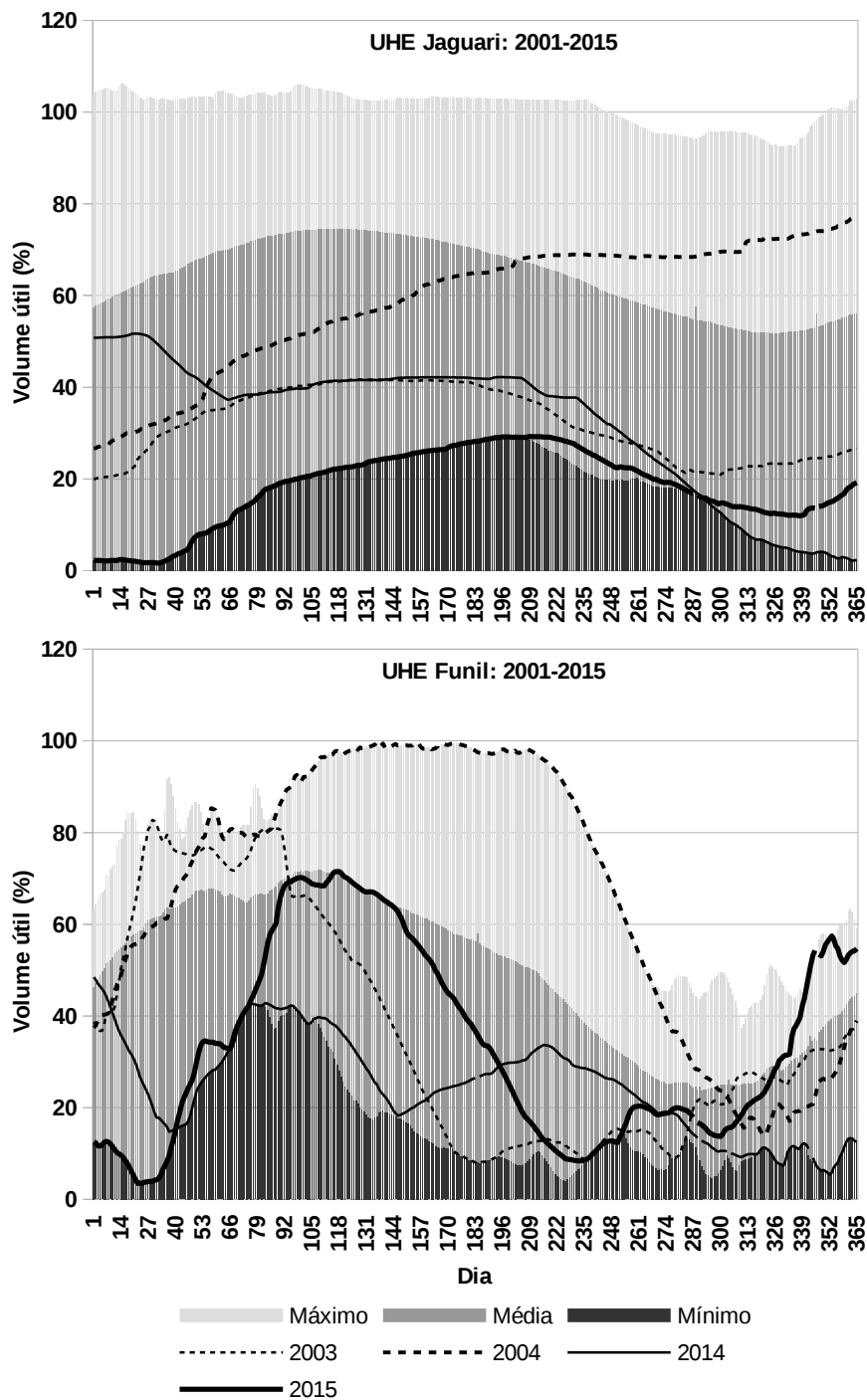


Figura 3.12: Descrição estatística do volume útil dos reservatórios de Jaguari e Funil entre 2001 e 2015. Comparação com os eventos de escassez hídrica dos anos de 2003-2004 e 2014-2015. Fonte: ONS-IPDO

ao canal a patamares inferiores à vazão ambiental ( $60 \text{ m}^3/\text{s}$ ), a frequência, duração e intensidade da penetração da intrusão salina aumentaram. A captação, para fins de abastecimento da TKCSA, por diversas vezes, precisou ser interrompida, paralisando a produção.

Para corrigir esse problema, primeiramente, tentou-se regular a defluência na

UHE Pereira Passos, de modo que, nos períodos de maré cheia, sobretudo na sizígia, a vazão afluyente ao canal de São Francisco fosse capaz de garantir a captação da TKCSA. Posteriormente, entre meados de 2014 e junho de 2015, foi construída, a jusante da captação uma soleira, no próprio canal, para conter a intrusão salina (Figura 3.13).

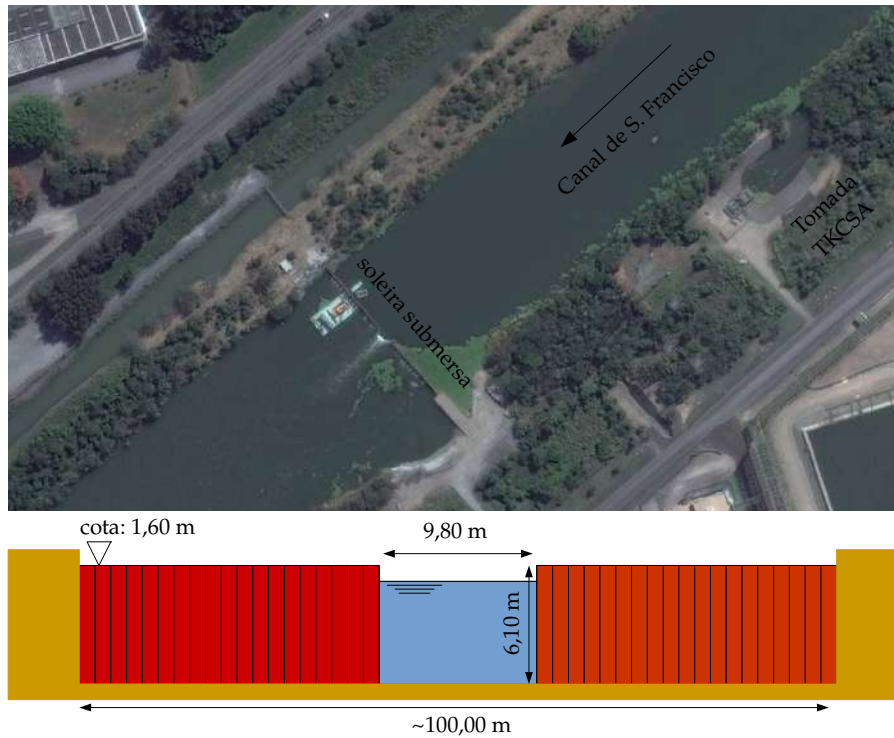


Figura 3.13: Detalhamento da soleira submersa construída no canal de S. Francisco.

O padrão de precipitação acumulada anual só começou a retornar a valores típicos no verão de 2015-2016, com o mês de janeiro de 2016 marcando excesso de chuva (Figura 3.14). Entretanto, como os reservatórios ainda se encontravam criticamente deplecionados, no verão de 2015-2016, as regras operativas continuaram em regime de excepcionalidade, de modo a priorizar a recuperação do volume útil dos reservatórios (Tabela 3.9).

### 3.5.1 Nova regra operativa pós crise hídrica

Diante da resposta da bacia e dos usuários à crise hídrica de 2014-2015, a Agência Nacional de Águas (ANA), o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) e Instituto Estadual do Meio Ambiente (INEA) assinaram a Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA nº 1.382/2015, que revoga a antiga Resolução nº 211/2003. Essa nova Resolução entrou em vigor no dia 30 de novembro de 2016.

A nova resolução reforçou a função prioritária dos reservatórios da bacia do



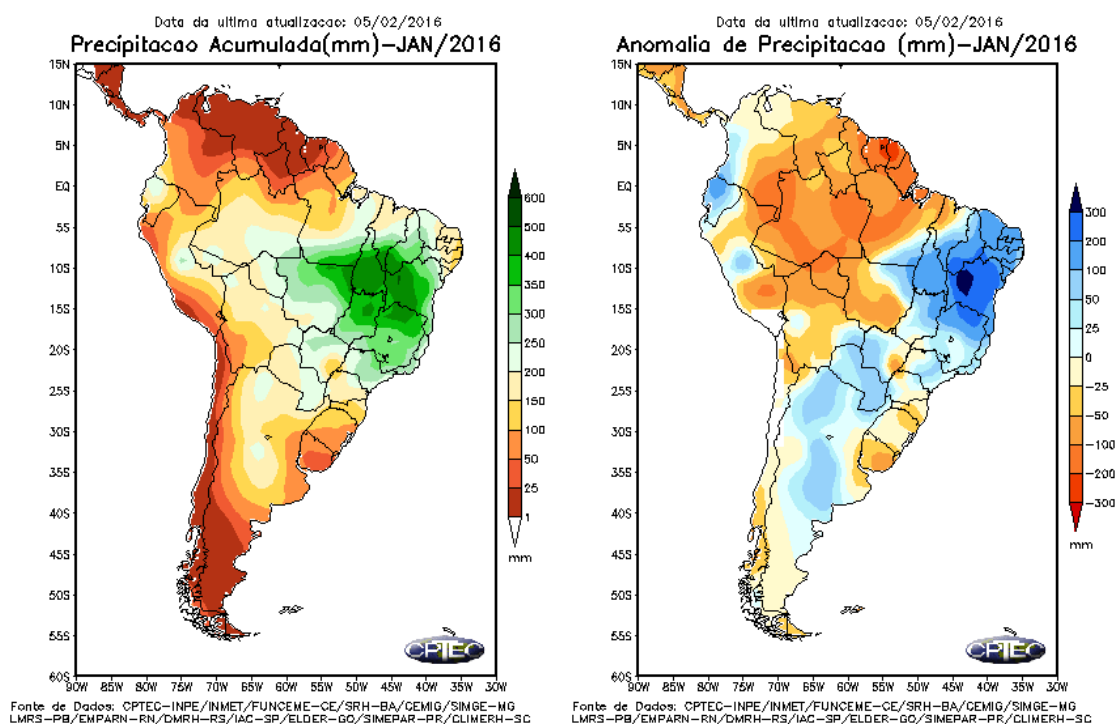


Figura 3.14: Precipitação mensal (mm) e anomalia de precipitação (mm) para janeiro 2016. As anomalias são desvios das médias mensais em relação à climatologia do INMET (1961 a 1990) (fonte: CPTEC/INPE).

Paraíba do Sul em garantir a segurança hídrica, para fins de abastecimento humano. Como consequência, algumas brechas operativas do setor elétrico foram revistas. Na resolução antiga, a ONS tinha a liberdade de escolher o destino da vazão excedente afluente ao reservatório de Santa Cecília. Ali, a ONS poderia defluir para jusante ou bombear para TPPG. Na prática, a ONS acabava favorecendo a geração de energia elétrica, bombeando o excedente para TPPG, nos limites definidos pela Resolução nº 211/2003 (Tabela 3.3). Durante a crise hídrica, ficou claro que uma parte expressiva de água aproveitada para geração de energia na TPPG, estava sendo descartada na baía de Sepetiba, prejudicando os múltiplos usuários a jusante da UEL Sta. Cecília. Depois, com as aplicações das resoluções restritivas durante a crise, também foi possível perceber que a defluência mínima  $120 \text{ m}^3/\text{s}$ , em Pereira Passos, poderia ser convertida em defluência média, sem prejuízos para captação da ETA-Guandu e para os usuários ameaçados pela intrusão salina. Apenas a Light é que perderia a possibilidade de atender a demanda de pico com a mesma liberdade, já que podia defluir, na época, descargas de até  $324 \text{ m}^3/\text{s}$ .

A nova regra mantém os valores de vazão mínima, definidos na Resolução nº 211/2003 (Figura 3.1). Entretanto, complementa a regra, considerando a sazonalidade hidrológica, sendo que as vazões mínimas devem ser adotadas durante os meses de chuvosos de novembro a abril, priorizando, assim, o enchimento dos reservatórios

responsáveis por manterem a vazão mínima do rio Paraíba do Sul, durante o inverno.

As mudanças ocorrem na operação dita normal, onde foram adotadas as vazões médias diárias de 71 m<sup>3</sup>/s (com até 5% de variação acima deste valor), a jusante de Santa Cecília, e de 120 m<sup>3</sup>/s (com até 2% de variação acima deste valor), a jusante de Pereira Passos. Nessa nova regra, a vazão mínima instantânea defluente em Pereira Passos, passou a ser também a vazão média diária.

Assim, rio Guandu somente poderia receber descargas acima do limite médio diário de 120 m<sup>3</sup>/s (com variação de até 2% acima deste valor), até o limite de 160 m<sup>3</sup>/s, a jusante de Pereira Passos, quando o reservatório de Funil estiver liberando sua descarga mínima estabelecida ou estiver operando para atender às regras de controle de cheia. Logo, o uso da descarga máxima de 324 m<sup>3</sup>/s passou a ser mais restritivo do que antes.

Em Santa Cecília, o aumento das descargas acima do limite médio diário de 71 m<sup>3</sup>/s (com variação de até 5% acima deste valor), a jusante, só foi permitido quando ocorressem vazões incrementais não controladas, no trecho entre Funil e Santa Cecília. Tal medida reforçou o princípio de conservação e recuperação do volume dos reservatórios.

O reservatórios a montante de Sta. Cecília passaram a operar de forma mais restritiva. Ao reservatório de Paraíbuna foi permitido uma vazão máxima de 40 m<sup>3</sup>/s e, ao reservatório de Jaguari, a vazão máxima de 20 m<sup>3</sup>/s, até que estes reservatórios atingissem seus volumes úteis de 80%, ou até que o reservatório Funil estivesse operando com volume útil abaixo de 20%, podendo o ONS solicitar à ANA uma operação especial, quando as condições hidrológicas do sistema assim permitirem. E mais: a operação do sistema hidráulico do rio Paraíba do Sul, pelo ONS, deve procurar manter os limites mínimos de volume útil dos reservatórios a montante de Sta. Cecília acima de 10%. O deplecionamento dos reservatórios deveria seguir a seguinte ordem: Funil, Santa Branca, Paraíbuna e Jaguari.

Em caso de uma nova crise hídrica, a nova resolução permitiria ainda operar o reservatório de Paraíbuna em níveis inferiores ao mínimo normal (cota 694,60m), até o limite da cota que equivale à disponibilização de um volume adicional ao Sistema Hidráulico do rio Paraíba do Sul, de 263 milhões de m<sup>3</sup>, numa primeira etapa, e de até 425 milhões de m<sup>3</sup>, numa segunda etapa.

### **3.5.2 Futura transposição para o Sistema Cantareira**

Entre as principais novidades pós crise hídrica, está a proposta do Governo de São Paulo de interligar a bacia do Paraíba do Sul ao sistema Cantareira (Bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá), de forma a aumentar a segurança hídrica da região metropolitana de São Paulo.

Em 16 de janeiro de 2015, o grupo técnico formado por técnicos da ANA, do Instituto Estadual do Meio Ambiente – RJ (Inea), do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE), do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam) e da Agência da Bacia do Rio Paraíba do Sul (AGEVAP) aprovou a viabilidade hidrológica da interligação, no estado de São Paulo, entre o reservatório de aproveitamento hidrelétrico Jaguari (UHE), que fica no rio Jaguari, na bacia do rio Paraíba do Sul, ao reservatório do rio Atibainha, que integra o Sistema Cantareira. Essa interligação poderá garantir aportes adicionais de até 5,3 m<sup>3</sup>/s de água da Bacia do Paraíba do Sul ao Sistema Cantareira, quando necessário.

# Capítulo 4

## Coleta de dados e calibragem

### 4.1 Introdução

A transposição de bacias Paraíba do Sul-Piraí-Guandu (TPPG) foi responsável por importantes mudanças morfológicas, no rio Guandu e seu delta (ver Capítulo 2). Entre os importantes mecanismos sedimentológicos envolvidos nessa mudança está o abrupto incremento na descarga anual de lavagem do rio Guandu. A transposição desse material fino intensificou a progradação dos manguezais adjacentes e descaracterizou as orlas arenosas das praias de Sepetiba e Santa Luzia.

O transporte de sedimento pode ser classificado de acordo com a origem e o mecanismo. Em termos de fonte ou origem, a descarga sólida pode ser classificada como descarga de material do leito (*bed material transport*), quando a fonte é o próprio leito, e descarga de lavagem (*wash load*), quando a fonte é a porção terrestre da bacia hidrográfica (JANSEN *et al.*, 1979). Em termos de mecanismos, a descarga sólida pode ser classificada como descarga de sólidos de fundo, quando o mecanismo de transporte dos grãos é por arrasto e/ou saltação, e descarga de sólidos suspensos, quando o mecanismo de transporte dos sedimentos é por suspensão (JANSEN *et al.*, 1979). No presente estudo foi considerado que a composição granulométrica da descarga de sólidos suspensos era formada de silte e argila e que o leito não seria fonte expressiva de sedimentos finos para a coluna d'água, ou seja, os finos viriam da bacia. Logo, a descarga de lavagem seria igual à descarga de sólidos suspensos.

Os impactos, na estimação da descarga anual de sólido suspensos, devido às atividades operativas nas escalas diária e horária da transposição e de outras obras hidráulicas, foram pouco estudados. Os capítulos 5, 6 e 7 visaram descrever, nas escalas horária, diária e anual, o comportamento da descarga de sólidos suspensos, na bacia do Paraíba do Sul até UEL Sta. Cecília, na transposição e no rio Guandu, respectivamente, durante dois ciclos hidrológicos (15/04/14 a 14/04/15 e 15/04/15 a 14/04/16).

O presente estudo utilizou as seguintes variáveis meteorológicas, hidrológicas e sedimentológicas: a precipitação acumulada, vazão e concentração de sólidos suspensos, em diferentes resoluções temporais. Diante da escassez de dados, esta pesquisa executou o monitoramento em alta resolução temporal de sólidos em suspensão, turbidez e vazão, em pontos específicos ao longo da transposição e do rio Guandu, durante os dois ciclos hidrológicos.

Neste capítulo, foram descritas as metodologias empregadas nas calibrações dos sensores nível e turbidez, nas medições de campo, nas análises laboratoriais e nas curvas chave de vazão. Assim, de forma resumida, o problema da estimação da descarga anual de sólidos suspensos foi abordado conforme a Figura 4.1.

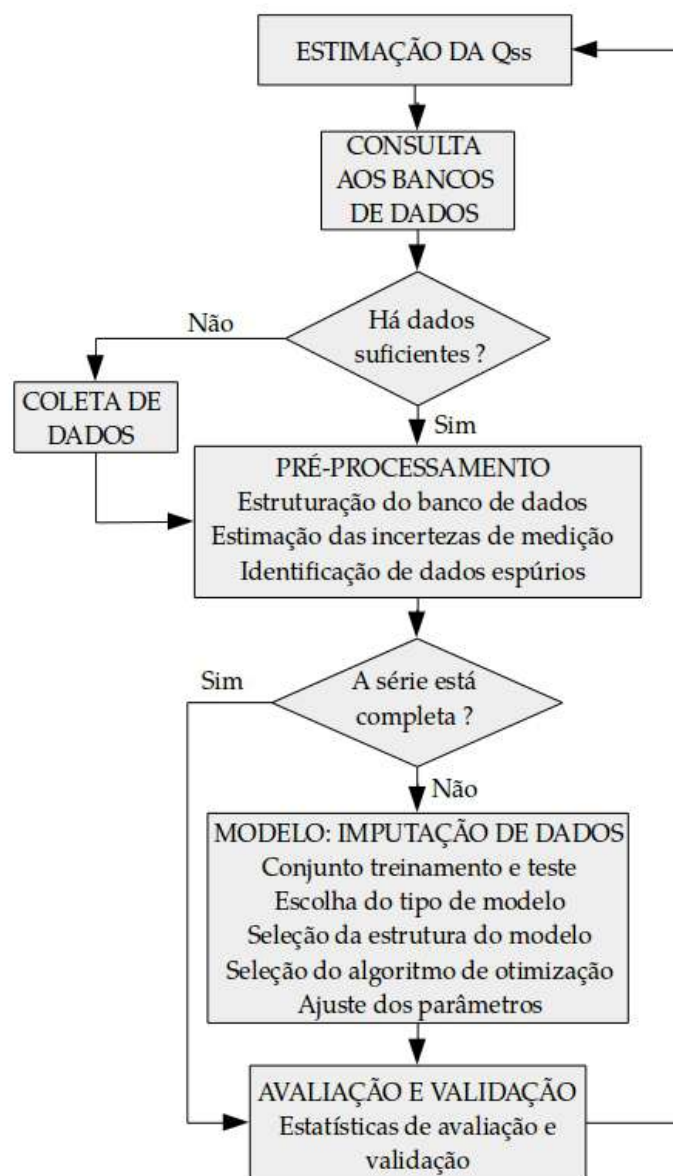


Figura 4.1: Fluxograma geral das etapas necessárias para estimar a descarga de sólidos suspensos ( $Q_{ss}$ ).

## 4.2 Materiais e métodos

A organização da coleta de dados encontra-se resumida na Figura 4.2.

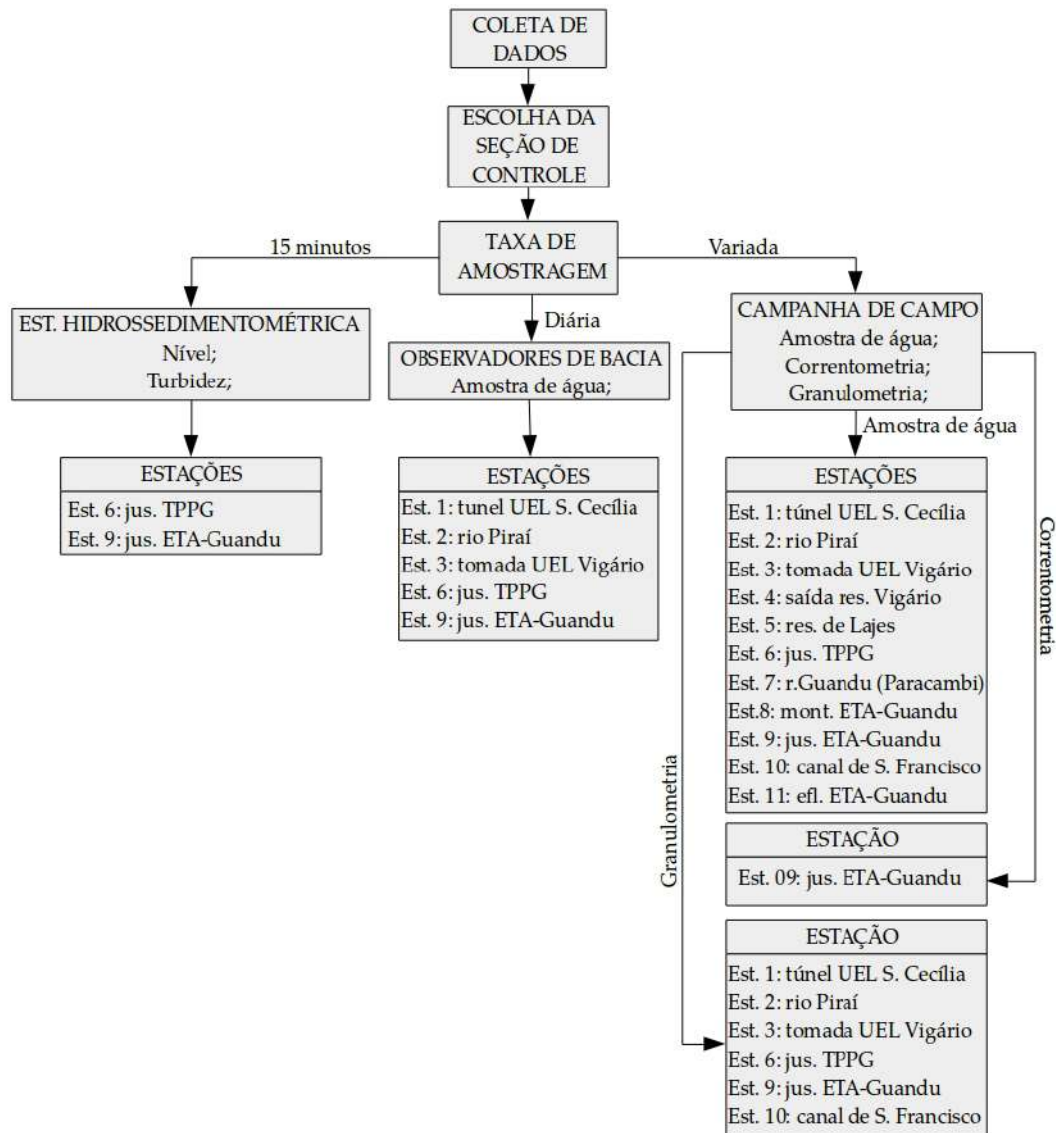


Figura 4.2: Fluxograma geral da coleta de dados.

## 4.3 Classificação dos dois anos hidrológicos monitorados

A variabilidade da descarga de sólidos suspensos é fortemente dependente do regime de chuva. O escoamento superficial, resultante de um evento de chuva intensa, distribuída por toda bacia, transporta grande quantidade de sedimento fino para rio, incrementando a concentração de sólidos suspensos. Por outro lado, anos com pouca chuva trazem pouca ocorrência de picos de alta concentração de sólidos suspensos.

Tabela 4.1: Precipitação acumulada média anual (mm/ano) no ano seco (15/04/2014 a 14/04/2015) e típico (15/04/2015 a 14/04/2016) para as estações Volta Redonda - RJ (PVR), Taubaté - SP (PTA) e São Luis Paraitinga - SP (PSL).

	$Q_N$ m <sup>3</sup> /s	PVR mm/ano	PTA mm/ano	PSL mm/ano
Histórico (1980-2013)				
Média:	294	1.414,97	1.295,0	1.700,4
Desv. padrão:	±201	±312,2	±246,31	±409,48
Mínimo:	52 <sup>(a)</sup>	839,1 <sup>(b)</sup>	768,1 <sup>(c)</sup>	720,7 <sup>(d)</sup>
Máximo:	2.110	2.043,1	1.799,3	2.973,8
Ano seco				
Média:	145	1.209,9	851,3	1.100,4
Ano típico				
Média:	231	1.343,5	1.282,4	1.358,4

(<sup>a</sup>) Ano: 2015; (<sup>b</sup>) Ano: 2011; (<sup>c</sup>) Ano: 1980; (<sup>d</sup>) Ano: 2006

Na Tabela 4.1, é possível notar, a partir da precipitação acumulada média anual de três estações, localizada na bacia do Paraíba do Sul (ver em Capítulo 5), a diferença entre os dois anos hidrológicos em relação à média histórica (1980-2013). O ano compreendido entre 15/04/2014 e 14/04/2015 coincidiu com a crise hídrica. Apesar de não corresponder a um mínimo histórico, os valores encontrados foram mais baixos do que a média histórica (Tabela 4.1). Por outro lado, o ano compreendido entre 15/04/2015 a 14/04/2016 foi mais próximo à média histórica, principalmente nas estações de Volta Redonda (PVR) e Taubaté (PTA) (Tabela 4.1).

Para fins práticos, os dois anos hidrológicos monitorados no presente estudo, foram classificados como seco e típico. O ano seco (15/04/2014 a 14/04/2015) representaria o ano mais crítico em termos de escassez de chuva (ver Capítulo 3). O ano típico (15/04/2015 a 14/04/2016) representaria um ano em que a precipitação acumulada anual média seria próxima da média histórica (ver Capítulo 3).

Apesar do ano típico apresentar valores de precipitação acumulada anual próximos da média histórica, os reservatórios ainda se encontravam criticamente deplecionados, no verão de 2015-2016 e as regras operativas continuaram em regime de excepcionalidade, de modo a priorizar a recuperação do volume útil dos reservatórios. Isto significa dizer que apesar do regime de chuvas e, conseqüentemente, da produção de sedimento fino terem voltado a valores típicos, as vazões e os volumes dos reservatórios ainda permaneceram baixos, ou seja, atípicos. Essa combinação afetaria tanto o valor da concentração de sólidos suspensos, devido ao menor volume da fase líquida disponível para diluição, como também as quantidades

transportadas, devido às mudanças no volume transposto e na eficiência de retenção dos reservatórios.

### 4.3.1 Estimativa da incerteza

Como um resultado de medição nada mais é do que, meramente, uma estimativa do valor verdadeiro do mensurado, o valor da sua incerteza torna-se necessário para expressar o grau de dúvida associado ao resultado da medição (RM68, 2013). O método adotado, para expressão da incerteza de medição, foi baseado no Guia para a Expressão da Incerteza (GUM, 2003).

#### Cálculo do intervalo de confiança (IC)

Se o modelo de estimativa ou de calibração representa adequadamente a relação desejada, uma estimativa da variância dos resíduos pode ser calculada:

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{N - n} \sum_{t=1}^N e^2(t), \quad (4.1)$$

onde  $n$  é o número de coeficientes de regressão do modelo.

O intervalo que contém o valor esperado  $y_r$ , com intervalo de confiança (IC) de  $\alpha$  % é calculado como:

$$\hat{y}_0 - t_{\alpha,d}\sigma_e \leq y_r \leq \hat{y}_0 + t_{\alpha,d}\sigma_e, \quad (4.2)$$

onde  $d = N - n$  é o número de graus de liberdade e  $t_{\alpha,d}$  é o valor da distribuição *t* de *Student*. A estimativa do erro do modelo ( $\varepsilon$ ) é  $\pm t_{\alpha,d}\sigma_e$ .

### 4.3.2 Critérios para escolha das estações hidrossedimentométricas

Essa etapa envolveu diversas visitas exploratórias para reconhecimento de campo dos trechos de interesse, desde a foz do canal de S. Francisco até a tomada da UEL Sta. Cecília, no rio Paraíba do Sul.

A definição do local do monitoramento foi determinada por uma sequência hierarquizada de critérios:

(i) O local deveria controlar uma entrada ou saída relevante em termos de descarga de sólidos suspensos, ao longo da transposição e do rio Guandu, como por exemplo: a entrada pela UEL Sta. Cecília, a entrada pelo rio Piraí, a saída da



transposição e a saída para o canal de S. Francisco.

(ii) Escolheu-se um trecho reto do rio, com margens altas, uso do solo semelhante em ambas as margens, declividade do leito moderada, escoamento quase uniforme, leito arenoso ou rochoso e ausência de fontes de sedimento fino próximas (mineração, efluentes domésticos ou industriais, tributários).

(iii) Em termos de descarga de sólidos suspensos, o trecho deveria encontrar-se em equilíbrio sedimentológico para a fração fina. A suspensão a partir do leito deveria ser mínima e que o sedimento fino deveria homogeneamente distribuído na seção. Trechos a jusante de bombas de recalque, turbinas hidroelétricas e corredeiras foram considerados como indicativos de que a fração fina pudesse estar o mais desagregada possível.

(iv) Segurança e acesso fácil pela estrada.

(v) Presença de moradores (potenciais observadores) próximos às margens.

### **4.3.3 Observadores(as) de bacias**

A amostragem diária, durante a estação chuvosa só foi possível graças ao trabalho dos(as) observadores(as) de bacias. A seleção do(a) observador(a) de bacia foi baseada na proximidade da estação de coleta no rio ou reservatório e na disponibilidade de tempo para coletar e armazenar uma amostra diária de água, além de registrar eventos hidrossedimentológicos relevantes para o estudo. Quinzenalmente ou mensalmente era recolhida a caixa com as garrafas cheias, que era substituída por outra caixa com um mês de garrafas vazias. Houve a participação de observadores(as) de bacias nas estações 1, 2, 3, 6 e 9.

### **4.3.4 Coleta e extração da concentração de sólidos suspensos, fixos e voláteis**

#### **Resolução espaço-temporal da amostragem**

A definição da resolução espaço-temporal da amostragem de sólidos suspensos deve considerar a distribuição vertical e transversal dessa variável na seção. Primeiramente, em cada estação foi avaliada, a partir das características hidráulicas e morfológicas da seção, a validade da hipótese de que a descarga de sólidos suspensos seria igual à descarga de lavagem. Nesse caso, a composição granulométrica da descarga de lavagem ou suspensão seria formada essencialmente por silte e argila, que, em geral, apresenta uma distribuição aproximadamente uniforme na vertical. Esta simplificação permitiria reduzir o esforço amostral em apenas um ponto na vertical. Por isso foi dada preferência às seções onde o leito não era fonte de sedimento

em suspensão. Entre as estações mais estratégicas (1, 2, 6 e 9), a estação 9 era a mais crítica nesse requisito. Assim, nesta seção, foram realizadas duas perfilagens (margem e meio), com turbidímetro. Estas perfilagens foram conduzidas durante a campanha de vazão do dia 17 de dezembro de 2014, de modo a verificar a distribuição vertical dos sedimentos finos.

A distribuição da concentração de sólidos suspensos, através de uma seção transversal também pode ser variável, especialmente para casos onde exista uma grande diferença no uso de solo de uma margem para outra. Efeitos de margem podem gerar diferenças em relação ao meio do canal. Como a maioria das estações encontrava-se em canais relativamente estreitos e misturados pelas bombas de recalque, turbinas hidroelétricas e corredeiras foi razoável admitir que a diferença entre margens e o meio. Com essa segunda simplificação, cada estação poderia ter sua seção representada por apenas uma amostra superficial, coletada, de preferência, no meio da calha principal. Mesmo assim, entre as estações mais críticas para o estudos (1, 2, 6 e 9), foram realizadas coletas superficiais na margem e no meio nas estações 6 e 9.

### Coleta de água

Feita essas considerações, em cada estação foi coletado 1,0 l de água superficial no meio da calha principal, com ajuda de um balde amarrado a uma corda (Figura 4.3). Nos locais onde a amostragem foi feita pela margem, o balde era arremessado a cerca de 3 m da margem. Como não existe ponte nas estações 6 e 9, o acesso ao ponto de coleta era feito pela água, com ajuda de nadadeiras e colete salva-vidas (Figura 4.3). Nessas duas estações eram coletadas duas amostras: uma, a cerca de três metros da margem, e a outra, no meio da calha principal.



Figura 4.3: Formas de coleta das amostras de água. Coleta no meio do rio com ajuda de nadadeiras e colete salva-vidas (foto a esquerda), rio Guandu - estação 6. Coleta direta no meio do rio pelas pedras (foto do centro), rio Piraí - estação 2. Coleta no meio do canal com balde e corda pela ponte (foto a direita), tomada do UEL Vigário - estação 3.

Nas estações mais estratégicas (1, 2, 3, 6 e 9) ocorreram campanhas de amostragem quase diárias na estação chuvosa (novembro-abril), e variadas, na seca (maio-

outubro) entre os anos de 2014 a 2016. Nas demais estações a amostragem foi quase quinzenal. Nestas mesmas estações estratégicas, também foram realizadas amostras adicionais de 10 l, para análise granulométrica.

Amostras adicionais de 5, 10 e 20 l foram feitas, nas estações 6 e 9, em dias que ocorreram altas concentrações de sólidos suspensos. Estas amostras foram reservadas para construção da curva de calibração dos turbidímetros.

### **Extração da concentração de sólidos suspensos, voláteis e fixos**

As análises das amostras de água foram feitas no Laboratório de Dinâmica de Sedimentos Coesivos (LDSC-UFRJ). A metodologia adotada seguiu as regras da ABNT-NBR 10664, com pequenas modificações (Figura 4.4). As amostras, assim que chegavam ao laboratório eram filtradas em filtros de fibra de vidro, com diâmetro de poro de  $0,7 \mu\text{m}$ , previamente pesados (Figura 4.5).

Em seguida, os filtros com amostra eram submetidos à estufa a  $60-80^\circ \text{C}$  para secar por no mínimo 48 horas. Depois, eles eram novamente pesados para se obter, pela diferença, o peso dos sólidos suspensos (PSS) (Figura 4.4). A mesma amostra retornava à estufa por mais 24h, e se depois não houvesse diferença superior a 0,4 mg, em relação à primeira pesagem, a amostra seguia para a mufla a  $(550 \pm 10)^\circ \text{C}$ , por no mínimo 1 hora, para queimar a matéria orgânica. Depois da mufla, a amostra era pesada novamente para se obter, pela diferença, o peso dos sólidos voláteis (PSV) e fixos (PSF) .

Por fim, estes pesos são multiplicados pelo volume da respectiva amostra original, obtendo como resultado a concentração de sólidos suspensos ( $\text{CSS}_i$ ), fixos ( $\text{CSF}_i$ ) e voláteis ( $\text{CSV}_i$ ). No caso das amostras coletadas pelos(as) observadores(as) de bacias, o procedimento era encurtado. Depois de filtrados, os filtros seguiam diretamente para a mufla, onde era extraída, unicamente, a informação da concentração de sólidos fixos.

### **Turbidez**

Além de dispor de coletas de água pontuais, pelas campanhas de campo e diária, durante a estação chuvosa, pelos observadores de bacias, os postos hidrossedimentométricos das estações 6 e 9 contaram também com dados de CSS, CSV, CSF, em alta resolução temporal, através do monitoramento automático da turbidez por um turbidímetro do fabricante *Seapoint Sensor Inc.*, integrado à sonda RBR *Duo*.

O turbidímetro é um instrumento óptico que mede o retroespalhamento em um volume de água submetido à incidência de uma fonte de luz de 880 nm. Segundo o fabricante, o sensor tem acurácia de menos que 2% para valores até 1.250 NTU. A leitura é feita a 5 cm da fonte. Antes de ir para o campo, uma bateria de testes

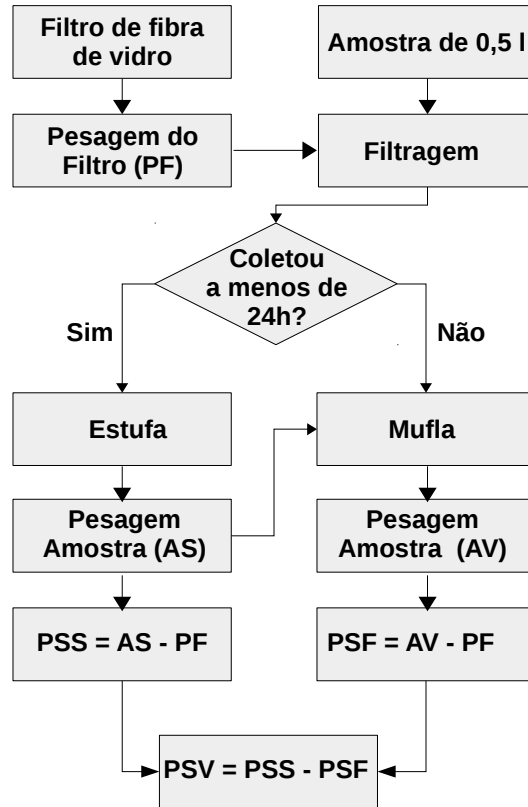


Figura 4.4: Metodologia para análise das amostras de água. PF: peso do filtro, AS: peso da amostra seco, AV: peso da amostra calcinada. PSS: peso dos sólidos suspensos, PSF: peso dos sólidos fixos e PSV: peso dos sólidos voláteis.

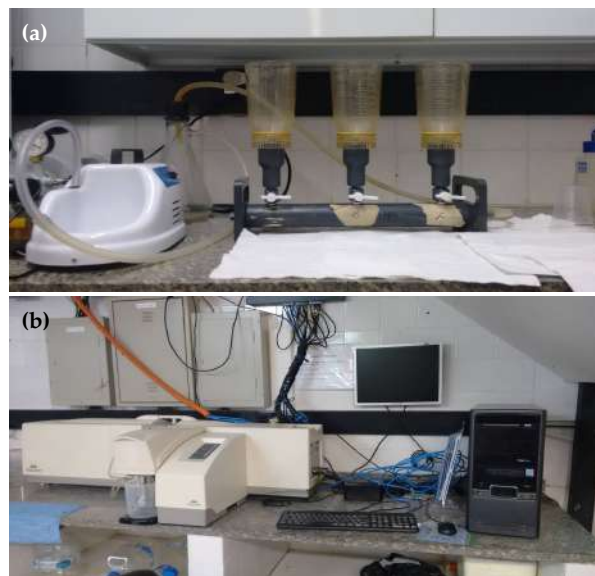


Figura 4.5: Aparato para filtragem (a) e analisador de partículas Malvern (b) presentes no LDSC-UFRJ.

com amostras com diferentes concentrações, foram conduzidas no laboratório, com intuito de avaliar a coerência dos dados de turbidez do sensor da *Seapoint* em relação

a um outro turbidímetro, no caso, o modelo OBS-3A. No campo, o turbidímetro foi configurado para registrar, a cada 15 minutos, a média de 10 medições instantâneas, feitas a cada 3 segundos. Os registros de turbidez, depois foram convertidos em concentração de sólidos suspensos, a partir da curva de calibração.

### Experimento para ajuste da curva de calibração para turbidez - sedimento

Amostras adicionais de 5 e 20 litros foram concentradas para 1 litro, após decantação quase total em 7 dias. As amostras concentradas permitiram construir uma curva de calibração, que abrangiu valores superiores aos observados durante a campanha no rio Guandu. O experimento consistiu em introduzir o sensor em becker, com 1 l de amostra concentrada (Figura 4.6). A uniformidade e invariância da suspensão, durante a mediação, foi garantida pela turbulência gerada por uma pequena bomba de aquário. Finalizada a medição, uma amostra de 100 ml era direcionado para processo de filtragem e pesagem, para se obter CSS e CSF. Testes com concentrações menores foram produzidos diluindo o concentrado em água destilada. À medida em que a concentração no becker diminuía os volumes amostrados aumentavam para 200 ml, 300 ml, 500 ml e 1 l (última medição).

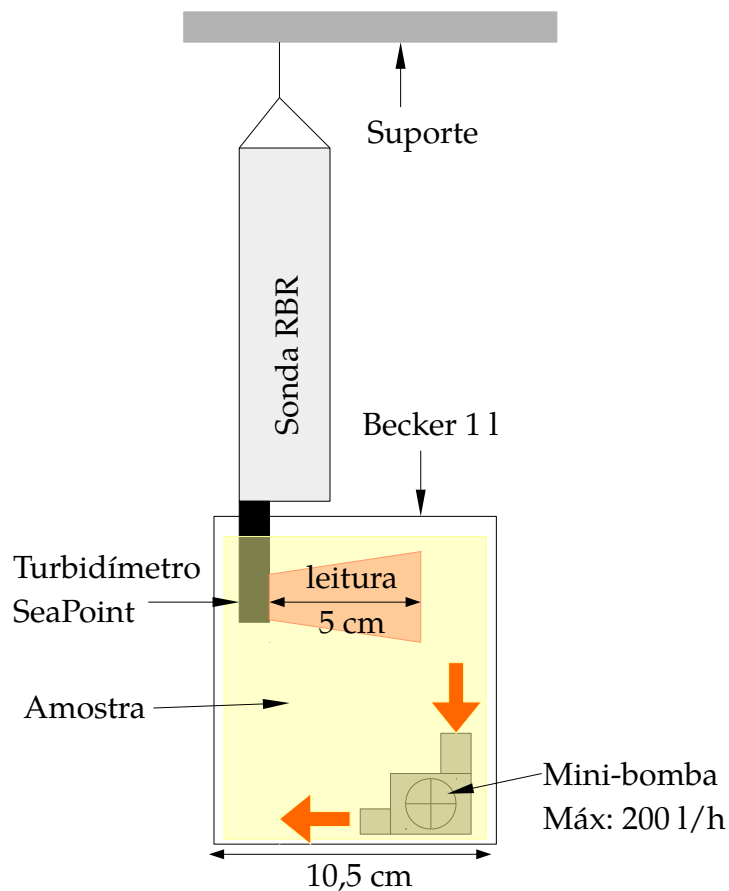


Figura 4.6: Aparato experimental para a calibração dos turbidímetros.

Os dados de turbidez foram relacionados com as respectivas CSS, CSV e CSF, amostradas no momento da medição. Dessa relação, uma curva de calibração de turbidez-sedimento foi obtida. Baseada em um modelo de regressão linear, a função teve seus parâmetros de ajuste fornecidos pelo método dos mínimos quadrados (MMQ). A incerteza da curva-chave foi calculada pela Equação 4.1 e expandida pela Equação 4.2.

### 4.3.5 Granulometria

A caracterização e a variabilidade da granulometria dos sólidos suspensos na água foram monitoradas nas estações 1, 2, 3, 6 e 9. No início, eram coletadas amostras de 1 litro, que depois eram submetidas ao analisador de partículas *Malvern* do LDSC-UFRJ (Figura 4.5). A amostra era condicionada em frasco do tipo becker que era submetido a uma seção de 10 minutos, no ultrassom, para desagregar as partículas. Depois da seção de ultrassom, a amostra era submetida a 3 leituras consecutivas no *Malvern*.

Entretanto, devido à baixa concentração de sedimentos, os valores de obscuração ficavam abaixo de 5% e os resultados não eram satisfatórios. Em seguida, a coleta passou a ser de 5 l. Depois de período mínimo de decantação de uma semana, o excesso de água era removido e filtrado, restando 500 ml de amostra concentrada. Porém, mesmo assim, a estação 6 continuava com obscuração abaixo de 5%. Por fim, a coleta de 10 l atendeu a todas as estações envolvidas e se tornou a metodologia padrão para análise granulométrica no *Malvern*. Para avaliar a eventual perda de sedimento pelo volume excedente, o material filtrado do volume excedente foi submetido ao mesmo procedimento de filtragem e pesagem. Neste caso específico, assumimos que o sedimento retido no filtro, após a queima da matéria orgânica, deve ser representado por argilas com tamanho inferior a  $2 \mu\text{m}$ , pois consideramos que as frações maiores decantaram durante o período de repouso. A concentração retida nos filtros foi inferiores a 10%.

### 4.3.6 Vazão

A série temporal de vazão, nas estações 6 e 9, foram obtidas a partir da construção da curva-chave de vazão. Esta, por sua vez, dependeu do cruzamento de um conjunto de dados de nível e vazão. Os registros de vazão, para a estação 6, foram extraídos do banco de dados da Hidroweb (estação da LIGHT: 59309000) e, para a estação 9, a vazão foi medida por campanhas de correntometria. Os registros de níveis, nas estações 6 e 9, foram obtidos das estações hidrossedimentológicas instaladas no presente estudo.

## Nível

A série de nível foi obtida a partir de medições feitas pelo sensor de pressão absoluta da Keller AG da série XR, integrado à sonda datalogger RBR Duo, instalada nas estações hidrossedimentométricas 6 e 9. O sensor de pressão foi configurado para registrar, a cada 15 minutos, a média de 10 medições instantâneas, feitas a cada 3 segundos. A correção do efeito da pressão atmosférica para os dois postos, foi feita com a série horária de coleta, pela estação meteorológica de Seropédica (87868).

Com o objetivo de calibrar o sensor antes de entrar em operação, foi realizado uma sequência de testes usando um tubo de calibração desenvolvido especialmente para este fim (Figura 4.7). O tubo de PVC de 2,75 m é graduado com uma fita métrica, onde a menor divisão é 1 mm. A leitura é realizada através de uma mangueira translúcida que reproduz, pelo princípio dos vasos comunicantes, o nível do interior do tubo. Com a ajuda de uma torneira e uma mangueira, é possível remover ou introduzir água no interior do tubo e, conseqüentemente, variar o nível. Durante o experimento, foram registrados a cada 15 minutos, valores de pressão atmosférica, com acurácia  $\pm 0,5$  hPa, através da estação meteorológica Vaisala WXT510, que ficou instalada ao lado do boca superior do tubo.



Figura 4.7: Coluna d'água graduada para simulação da variação de nível da água para teste do sensor de pressão da sonda RBR Duo: a foto da esquerda mostrando a leitura do nível e a foto da direita mostrando o aparato completo.

A incerteza e a repetibilidade do sensor foram avaliadas em dois testes. O primeiro teste consistiu em fixar o sensor de pressão no fundo do tubo e medir a pressão absoluta em diferentes níveis. O sensor foi previamente configurado para registrar um dado de pressão absoluta a cada um minuto, onde cada minuto representa a média de 20 medições instantâneas. Para cada nível testado, o sensor permaneceu medindo por pelo menos 10 minutos, gerando assim, pelo menos, 10 registros por nível. Só depois, o volume do tubo era alterado para um outro nível. O experimento testou tanto uma situação de gradual aumento do nível como de descida.

Segundo o fabricante, a acurácia do sensor da Keller-XR é de 0,05% do fundo de escala. Como o fundo de escala deste sensor é de 10 m, então a acurácia instrumental do sensor é  $\pm 0,005$  m. A resolução é menor que 0,001% do fundo de escala, ou seja, 0,0001 m. A deriva pode chegar a aproximadamente 0,2% ao ano.

Depois de corrigidos os efeitos da pressão atmosférica e da sua posição no interior do tubo, os dados medidos pelo sensor de pressão foram relacionados com as respectivas leituras diretas da coluna d'água milimetrada. A partir dessa relação, uma curva de calibragem, para o sensor de pressão, foi obtida. Baseada em um modelo de regressão linear, a função teve seus parâmetros de ajuste fornecidos pelo método dos mínimos quadrados (MMQ).

### Correntometria

As campanhas de correntometria contaram com o perfilador acústico da RDI Instruments, modelo ADCP 1200 kHz Rio Grande. Segundo o fabricante, este instrumento tem a acurácia de 25% da velocidade relativa da água. Neste caso, sua acurácia fica em torno de  $\pm 2$  mm/s e a resolução em torno de 1 mm/s. Para obter informação de direção, o instrumentos dispõe de uma bússola magnética com acurácia de  $\pm 2^\circ$  e resolução de  $1^\circ$ . Esta bússola deve ser calibrada, com ajuda do *software* WinRiver II, no início de cada campanha. O instrumento é capaz de discretizar o campo de velocidades, ao longo da coluna d'água, dividindo a coluna em células de medição, exceto a uma distância de 0,5 m do sensor e próximo ao fundo (0,5m), na qual a relação sinal ruído é muito alta (Figura 4.8). Como a medição da seção ocorre com o ADCP em movimento, a correção do efeito relativo da movimentação do barco foi feita utilizando um recurso chamado *bottom tracking*, que usa o fundo como referência, assumindo que o mesmo não seja móvel. O instrumento é alimentado por uma bateria externa de automóvel e sua operação, controlada em tempo real através de um *notebook* com *software* WinRiver II.

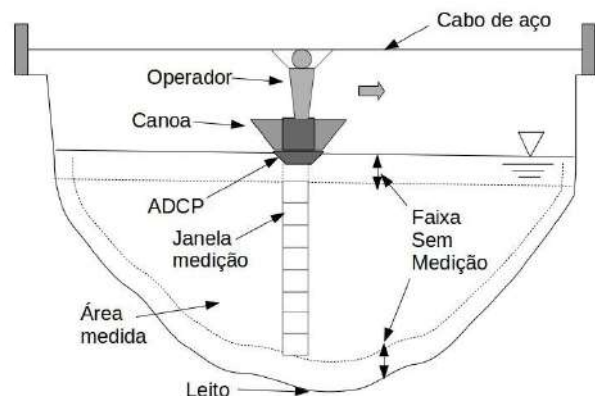


Figura 4.8: Descrição da metodologia e faixa de medição na seção de correntometria com ADCP no rio Guandu.



O procedimento de medição seguiu as recomendações descritas por OBERG *et al.* (2005) e ANA (2014). A incerteza na medição de vazão com ADCP resultou da combinação de diferentes fontes de erro, que podem afetar a precisão e a acurácia da medição. MUSTE *et al.* (2004) identificou pelo menos 15 fontes de erro, distribuídas nas 5 variáveis medidas: velocidade da água (10), velocidade do barco (1), profundidade (2), tempo de travessia (1) e distância da margem (1). Para minimizar a incerteza, na medição de vazão, uma série de procedimentos foram sistematizados pela *United State Geological Survey* (USGS) (MUELLER *et al.*, 2009) e pela Agência Nacional de Águas (ANA) (ANA, 2014).

### Curva-chave de vazão

A curva-chave de vazão ( $Q(t)$ ) foi obtida pelo modelo logarítmico, em que após a transformação logarítmica da série temporal de vazão ( $Q(t)$ ) e do nível corrigido ( $h_1(t)=h'(t)+h_0$ ), onde o  $h'(t)$  é o nível da água sobre o sensor corrigido da pressão atmosférica (m) e  $h_0$  é a diferença de cota entre o ponto mais fundo leito e ponto de medição do sensor de pressão (m). Esse modelo se expressa na forma de uma regressão linear:

$$\log(Q(t)) = \theta_1 \log(h'(t) + h_0) + \log(\theta_0) + \log \varepsilon, \quad (4.3)$$

onde  $\log \varepsilon$  é o termo residual, que se assume ter distribuição normal  $N(0, \sigma^2)$ . Após a transformação do conjunto de dados, os parâmetros ( $\theta_i$ ) foram ajustados pelo MMQ. A sua retransformação pode ser descrita como:

$$Q(t) = \theta_0 (h'(t) + h_0)^{\theta_1} \varepsilon \quad (4.4)$$

Aqui, o termo  $\varepsilon$  aparece como um fator de correção, devido ao método de ajuste da função usar médias geométricas (ou médias logarítmicas) e não aritméticas (ver em FERGUSON (1986) e JANSSON (1996)). Esse fator de correção pode ser calculado como  $\varepsilon = e^{1/2\sigma^2}$  para logaritmo neperiano ou  $\varepsilon = 10^{1,1513\sigma^2}$  para logaritmo de base 10, onde  $\sigma^2$  seria a variância da Equação 4.3.

A extrapolação da curva, para além dos conjuntos de dados de correntometria medidos exigiu a construção de uma segunda curva de calibração para águas altas, que, no caso do método logarítmico, admite como resultado final a expressão matemática:

$$Q(t) = \theta_3 (h_1(t) - h_2)^{\theta_2} \varepsilon \quad (4.5)$$

Onde, para se determinar a nível  $h_2$ , utilizou-se o seguinte método analítico:

$$h_2 = \frac{h_3 h_4 - h_5^2}{h_3 + h_4 - 2h_5}, \quad (4.6)$$

onde  $h_3$  e  $h_4$  são os dois níveis referentes às vazões mais altas, e  $h_5$  é o nível com referente a  $Q_5 = \sqrt{Q_3 Q_4}$ . Depois, os parâmetros de ajustes  $\theta_2$  e  $\theta_3$  foram obtidos pelo MMQ, após a transformação logarítmica desses três pares de dados.

#### 4.4 Localização e descrição das estações hidrosedimentométricas

Essa avaliação de campo permitiu definir 11 estações hidrosedimentométricas para coleta de água, para análise de sólidos suspensos, fixos e voláteis, além de coletar amostras adicionais para análise granulométrica (Figura 4.9). Duas estações (6 e 9) foram complementadas com medições de nível da água.

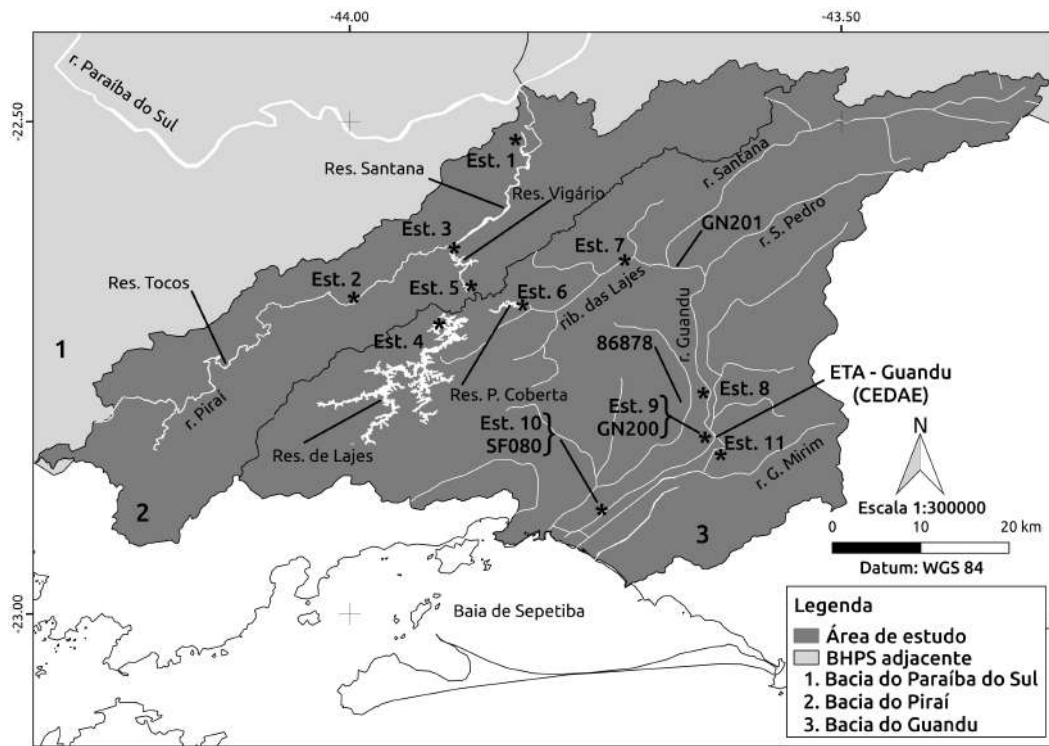


Figura 4.9: Localização das 11 estações hidrosedimentométricas (Est. xx).

Na prática, não foi possível encontrar locais onde todas estas condições fossem atendidas. Como só existiam disponíveis duas sondas integradas com sensor de pressão e turbidez, a escolha da sua instalação foi crítica, uma vez que existiam mais estações do que sensores. Considerando também a disponibilidade de dados medidos por outras instituições, foram escolhidas seções, uma logo a jusante da UHE Pereira Passos (estação 6) e, outra, a jusante da ETA-Guandu (estação 9).

A estação 1 se localizou junto à saída do túnel da UEL Sta. Cecília, local por onde chega a água captada do rio Paraíba do Sul, para o reservatório de Santana (Figura 4.10). Essa estação caracterizou o início da transposição e representou a descarga de sólidos suspensos afluente ao reservatório de Santa Cecília, no rio Paraíba do Sul. O ponto de coleta é visivelmente turbulento, com margens e leito de concreto (Figura 4.10). Além da coleta de água, quase quinzenal, a estação contou com a ajuda de um observador de bacias que realizou coletas diárias, entre os verões de 2014-2015 e 2015-2016.



Figura 4.10: Vista de cima da Estação 1: saída do túnel (estrutura de concreto) das águas da UEL Sta. Cecília para o reservatório de Santana.

A estação 2 se localizou na estação Fazenda Nova Esperança (58350001), no rio Piraí. Sua margem é composta por fragmentos de pastagem e por vegetação ciliar, comprimidos por plantações de eucaliptos, de ambos os lados (Figura 4.11). Seu leito é raso, com cerca de 80 cm de profundidade, de composição essencialmente areno-seixosa, com blocos rochosos isolados. A seção estava contida entre pequenas corredeiras a montante e a jusante. Nessa estação, coletava-se uma amostra de água no meio do rio, acessado pelas pedras, e se registrava a leitura da régua da estação 58350001. Entre os dias 12/12/2015 e 01/03/2016, houve ainda a coleta diária de amostras de água, feita por uma Observadora de bacia.

A estação 3 se localiza na tomada de água da UEL Vigário, no reservatório de Santana. A coleta era feita da ponte, com ajuda de uma corda (Figura 4.11). A seção tinha cerca de 2 m de profundidade e seu leito era arenoso com uma das margens protegidas por blocos rochosos e a outra, por uma pequena mata ciliar. Houve três tentativas de coletas diárias de amostra de água com Observadores de bacias. Entretanto, só o terceiro observador conseguiu manter regularidade diária, entre os dias 07/03/2016 e 06/04/2016.



Figura 4.11: Local de coleta: (a) Estação 2 junto à estação 58350001 no rio Pirai, (b) Estação 3 na tomada da UEL Vigário, (c) Estação 4 no Clube de Pesca Pirai no reservatório de Lajes, (d) Estação 5 no canal de engolimento do reservatório de Vigário.

A estação 4 se localizou no Clube de Pesca de Pirai, no reservatório de Lajes (Figura 4.11). Devido à crise hídrica, o leito junto à margem estava exposto, mostrando um solo desprotegido, na qual ficam encostadas as centenas de voadeiras. Este é um local de grande movimentação de pequenas embarcações. A partir da margem, a profundidade chegava rapidamente aos 20 m. Os 3 meses (outubro, novembro e dezembro de 2014) de dados ausentes corresponderam ao período em que o LDSC ficou aguardando pela resposta da Light Energia à solicitação de entrada no clube para coleta uma amostra de água. Nesta estação, a coleta foi feita com ajuda de uma embarcação do clube.

A estação 5 se localizou no canal de concreto, que direciona a água do reservatório de Vigário para engolimento da UHE Nilo Peçanha (Figura 4.11). A coleta neste ponto, era feita no meio do canal, cujo acesso era possibilitado por uma passarela suspensa.

A estação 6 se localizou a jusante da UHE Pereira Passos (Figura 4.3). Na estação 6, o acesso foi o fator determinante, forçando a aceitar uma seção com mais turbulência. O canal é reto com aproximadamente 60 m de largura. O leito era formado por matacões e grandes seixos. A margem esquerda era formada, essencialmente, por matacões e mata ciliar, interrompidos apenas por uma pequena praia

arenosa, logo a jusante do ponto de coleta. A margem direita era alta e coberta por uma estreita mata ciliar. Nessa estação, instalou-se uma sonda de coleta automática para medição de nível e turbidez a cada 15 minutos. A descrição detalhada desta estação se encontra no Capítulo 3 (Figura 4.13 e Figura 4.15). Além da coleta de água, quase quinzenal, a estação contou também com a ajuda de um observador de bacias, que realizou coletas diárias, entre os dias 21/11/2015 e 04/04/2016.

A estação 7 se localizava na ponte da RJ-127 sobre o rio Ribeirão das Lajes, no município de Paracambi (Figura 4.12). Esse ponto é caracterizado pela contribuição, a montante, dos principais tributários da margem direita do rio Guandu e do reservatório da PCH Paracambi. Suas margens eram altas e cobertas por uma estreita mata ciliar. O leito aparentava ser essencialmente arenoso. A coleta era realizada sobre a ponte da RJ-127.



Figura 4.12: Continuação das fotos das estações de coleta de água: estação 7 - ponte da RJ - 127 sobre o rio Guandu; estação 8 - ponte da BR-116 (Presidente Dutra) sobre o rio Guandu; estação 9 - margem esquerda do rio Guandu logo a jusante da ETA-Guandu; e estação 10 - ponte da BR-101 sobre o canal de S. Francisco.

A estação 8 se localizou na ponte da via Dutra (BR-116), no município de Seropédica. Sua posição visou quantificar a contribuição dos dois maiores tributários do rio Guandu, os rios Santana e São Pedro, além de ser o último ponto antes da barragem da Cedae (Figura 4.12). Suas margens são altas e cobertas por uma estreita mata ciliar. O barranco possui marcas de escavação por pescadores. O leito aparentava ser essencialmente arenoso. A coleta era realizada sobre a ponte da BR-116.



A estação 9 se localizou logo a jusante da barragem da Cedae, no município de Nova Iguaçu (Figura 4.12). Sua posição visou ser o último ponto de controle antes da mudança para um ambiente estuarino, controlado pelos efeitos hidráulicos da maré. Esse ponto representou a condição mais próxima da captada pela ETA-Guandu e também possibilitou retratar o impacto dos tributários mais poluídos, no caso, Poços, Ipiranga e lagoa da Cedae. Essa estação se encontrava em uma área urbana muito frequentada por pescadores e banhistas. Desse modo, a segurança do instrumento foi o fator mais relevante. Isso acabou acarretando a escolha de uma seção com recirculação nas margens. Sua margem esquerda era alta e ocupada por moradias, com barrancos escavados por pescadores e árvores frutíferas com raízes expostas, tombando para o interior do rio. Sua margem direita, com margens altas cobertas por uma estreita mata ciliar. O barranco estava escavado por pescadores, com as raízes das árvores expostas e algumas tombavam para o interior do rio. O leito era arenoso nas áreas de remanso e, na calha principal, era formado por afloramentos rochosos e seixos.

Nessa estação, foi instalada uma sonda de coleta automática, para medição de nível e turbidez, a cada 15 minutos. Além da coleta de água quase quinzenal, a estação contou também com a ajuda de um observador de bacias, que realizou coletas diárias, entre os dias 17/01/15 e 13/07/15 e, depois, entre os dias 27/10/15 e 04/04/16. Nessa mesma localidade, o Inea instalou uma estação de monitoramento de nível e precipitação.

A estação 10 se localizou na ponte da Rio-Santos (BR-101) sobre o canal de São Francisco, no bairro de Santa Cruz, município do Rio de Janeiro (Figura 4.12). Sua posição visou identificar possíveis mudanças na CSS produzidas pelo ambiente estuarino. A coleta era realizada sobre a ponte da BR-101.

A estação 11 se localizou na desembocadura do duto de lançamento dos rejeitos do tratamento de água bruta, da ETA-Guandu, na sub-bacia do Guandu Mirim, na margem da antiga estrada Rio-São Paulo, em frente ao portão principal da ETA-Guandu, município de Nova Iguaçu. Esse ponto visou quantificar a contribuição da ETA-Guandu no aporte de sólidos suspensos e floculantes ao rio Guandu-Mirim e a baía de Sepetiba. Um canal trapezoidal de concreto recebe esse afluente, com profundidade aproximada de 1 m.

#### **4.4.1 Instalação e manutenção da sonda nas estações 6 e 9**

Definido o local, uma estaca de caibro (100 x 50 x 2.500 mm) foi cravada no leito do rio, a cerca de 3 m da margem. Nessa estaca, foi fixada a sonda RBR, equipada com um sensor de pressão e um turbidímetro. O suporte de fixação, na estaca foi preso de modo a deixar a sonda sempre submersa, a pelo menos 10% da escala de fundo

do senso de pressão, ou seja, 1 m da superfície (Figura 4.13). Tanto o caibro como o sensor foram referenciados a pelo menos, 2 níveis de referência (RNs), com ajuda de um nível óptico e de uma mira topográfica (Figura 4.14, Figura 4.15 e Figura 4.16). A sonda RBR Duo N° 52545 foi instalada na estação 9 e a N° 52546, na estação 6.

Figura 4.13: Mergulho para fixação da sonda RBR Duo na estaca de caibro submersa: rib. das Lajes a jusante da UHE Pereira Passos, estação 6 e rio Guandu a jusante da ETA-Guandu, estação 9. Seta branca identificando o mergulhador.

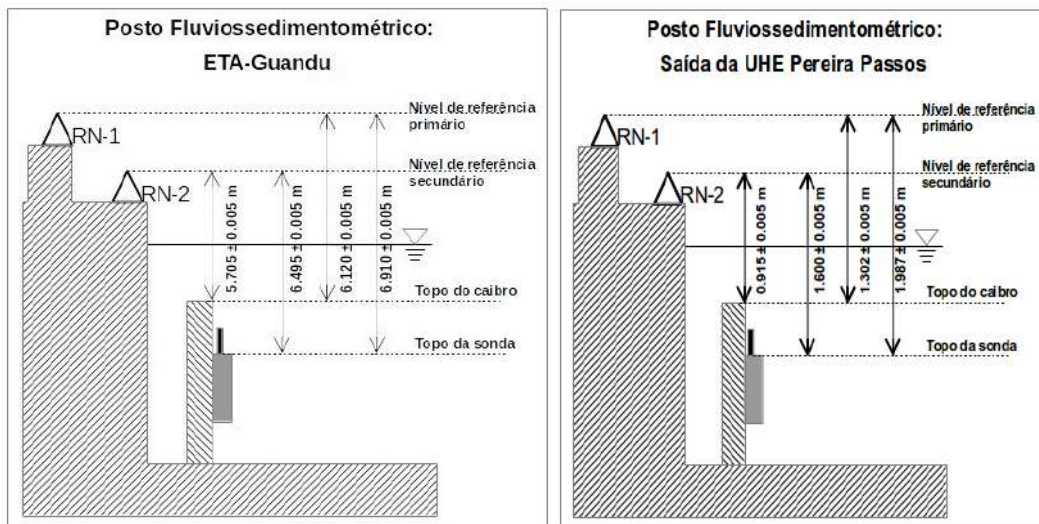


Figura 4.14: Descrição dos postos hidrossedimentológicos e das cotas em relação aos níveis de referência (RNs) da estação 6, a jusante da UHE Pereira Passos, e da estação 9, a jusante da UTE Guandu.

Devido ao acúmulo de detritos e à formação de biofilme, na janela do turbidímetro, a visita para manutenção era semanal e a coleta dos dados armazenados na sonda RBR Duo, quinzenal. Nessa visita, um mergulhador também inspecionava o estado do suporte. Durante as campanhas de limpeza da sonda da estação 9, foram encontradas, por diversas vezes, ilhas de macrófitas e lixo presos na estrutura que suportava o sensor, o que poderia obstruir a leitura óptica do turbidímetro (Figura 7.18). Outro efeito negativo foi o crescimento rápido de biofilme na janela óptica de medição (Figura 7.19).

## 4.5 Calibração

### 4.5.1 Incerteza na medição para CSS, CSV e CSF

#### Incerteza na medição do volume da amostra

O modelo matemático da medição do volume da amostra pode ser escrito como:



Figura 4.15: Descrição dos pontos definidos como níveis de referência ba estação 6, a jusante da UHE Pereira Passos.



Figura 4.16: Descrição dos pontos definidos como níveis de referência ba estação 9, a jusante da ETA-Guandu.

$$V_G = v_g + \varepsilon_g, \quad (4.7)$$

onde  $V_G$  é a estimativa do volume da amostra coletada em l;  $v_g$  é a leitura direta





Figura 4.17: Foto tirada em 16/06/2015 mostrando a remoção de uma ilha de macrófitas flutuantes presa na estrutura de madeira que suportava a sonda RBR Duo na estação 9, a jusante da ETA-Guandu.



Figura 4.18: Sonda RBR Duo após 7 dias de monitoramento na estação 9 (esquerda) e após a limpeza (direita).

do volume da amostra, usando o copo graduado do aparato de filtragem, cuja menor divisão volumétrica é 0,025 l;  $\varepsilon_g$  é a incerteza padrão associada à leitura do copo graduado, descrita por uma distribuição retangular com largura de 0,025 l, cujo valor é de  $\pm 0,014$  l.

### **Incerteza no procedimento de filtragem**

No processo de filtragem, foi possível notar perda de resíduo filtrável nas paredes do copo e no encaixe da base, mesmo depois de rinçada com água destilada. Para avaliar esta perda, após a filtragem, o copo foi limpo com um filtro de fibra de vidro, que depois foi submetido ao mesmo procedimento das demais amostras. Este procedimento foi realizado para três ordens de grandeza de PSS (7,9 mg, 20,1 mg e 124,7 mg), resultando, respectivamente, nos seguintes valores de perda: 0,0 mg, 0,1 mg e 0,6 mg. Estima-se que a perda é de 0,5 % do peso da amostra.

## Incerteza na medição do peso do filtro e das amostras

O modelo matemático da medição na balança de precisão do peso da amostra seca (AS) pode ser escrito como:

$$\Delta_{AS} = \frac{\sigma_{AS}}{\sqrt{N}}; \Delta_{esp} = \frac{\sigma_{esp}}{\sqrt{3}}; \Delta_{res} = \frac{\sigma_{res}}{\sqrt{3}}, \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_{AS} = t_{95,2} \sqrt{\Delta_{AS}^2 + \Delta_{esp}^2 + \Delta_{res}^2}, \quad (4.9)$$

$$AS = \overline{AS} + \varepsilon_{AS}, \quad (4.10)$$

onde  $\Delta_{AS}$  é incerteza padrão do desvio padrão ( $\sigma_{AS}$ ) da pesagem da amostra seca repetida 3 vezes;  $\Delta_{esp}$  é a incerteza padrão referente a distribuição retangular com largura igual ao erro máximo admissível da balança (0,2 mg);  $\Delta_{res}$  é a incerteza padrão referente a distribuição retangular com largura igual à resolução da balança (0,1 mg).  $AS$  é a estimativa do peso seco da amostra em mg e  $\varepsilon_{AS}$  é a incerteza expandida da medição.  $\overline{AS}$  é a média das três pesagem da amostra seca. Este mesmo modelo pode ser usado no cálculo do PF e AV, apenas substituindo  $\overline{AS}$  e  $\varepsilon_{AS}$  pelo índice e variável correspondentes.

A lei de propagação de incertezas estabelece que as incertezas padrão relacionadas a cada variável do modelo matemático da medição devem ser propagadas para gerar uma incerteza combinada. O modelo matemático da incerteza combinada do PSS pode ser expresso como:

$$\varepsilon_{PSS} = \sqrt{\varepsilon_{AS}^2 + \varepsilon_{PF}^2} - 0,005\overline{PSS}, \quad (4.11)$$

$$PSS = \overline{PSS} + \varepsilon_{PSS}, \quad (4.12)$$

onde  $\varepsilon_{PSS}$  é a incerteza expandida do peso do sólido suspenso em mg;  $\varepsilon_{PF}$  e  $\varepsilon_{AS}$  são as incertezas expandidas do peso do filtro e da amostra seca (estufa). O segundo termo ( $-0,005\overline{PSS}$ ) representa a perda no copo de filtragem. Este mesmo modelo pode ser usado no cálculo do PSF e PSV, apenas substituindo  $\varepsilon_{PF}$  e  $\varepsilon_{AS}$  pelo índices correspondentes.

Usando a CSS como exemplo, a expressão da incerteza combinada de medição em termos de concentração (mg/l), pode ser escrita como:

$$\varepsilon_{lab} = |CSS| \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{PSS}}{PSS}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_g}{v_g}\right)^2}, \quad (4.13)$$

onde  $\varepsilon_{lab}$  é a incerteza combinada da medição de CSS gerada no laboratório. Este mesmo modelo pode ser usado para CSF e CSV, apenas substituindo CSS,  $\varepsilon_{PSS}$  e

Tabela 4.2: Avaliação da hipótese nula da homogeneidade horizontal para CSS, CSF e CSV na seção das est. 6 e 9 pelo teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ).  $\bar{e}$  é o resíduo (meio-margem).  $\sigma_e$  é desvio padrão do resíduo.  $\chi_{95,d}^2$  é o valor crítico do  $\chi^2$  para valor-p de 0,05 com  $d$  graus de liberdade.  $t_{95,d}$  é o valor crítico t Student para valor-p de 0,05 com  $d$  graus de liberdade.  $\varepsilon_{hor}$  é o intervalo de confiança (IC) para valor-p=0,05 gerada pela aproximação.

	Est. 06 N=19			Est. 09 N=24			Total N=43		
	CSS	CSF	CSV	CSS	CSF	CSV	CSS	CSF	CSV
Avaliação									
$\bar{e}$	-0,6	-0,4	-0,2	0,9	0,8	0,1	0,2	0,3	0,0
$\sigma_e$	$\pm 2,3$	$\pm 1,8$	$\pm 1,2$	$\pm 2,3$	$\pm 1,7$	$\pm 0,8$	$\pm 2,3$	$\pm 1,7$	$\pm 1,0$
Teste									
$\chi^2$	15,174	13,852	8,681	16,046	12,337	6,570	31,220	26,189	15,251
$\chi_{95,d}^2$	28,869	28,869	28,869	35,172	35,172	35,172	58,124	58,124	58,124
IC									
$t_{95,d}$	2,101	2,101	2,101	2,069	2,069	2,069	2,017	2,017	2,017
$\varepsilon_{hor}$	$\pm 4,8$	$\pm 3,8$	$\pm 2,5$	$\pm 4,8$	$\pm 3,5$	$\pm 1,7$	$\pm 4,6$	$\pm 3,4$	$\pm 2,0$

PSS pelos índices e variáveis correspondentes.

### Incerteza da amostragem

O intervalo de confiança a cerca da extrapolação espacial da medição pontual para toda seção de controle foi contornada coletando a jusante de corredeiras, UELs e UHEs, onde a alta turbulência criava condições de plena mistura. Para confirmar esta hipótese foi realizado um estudo investigativo nas estações 6 e 9. Nestas duas estações foram coletadas, respectivamente, 19 e 24 pares de amostras superficiais simultâneas. Cada par era formado por uma amostra coletada na margem e outra no meio calha principal. Objetivo foi testar pelo método do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) a hipótese nula de que não haveria diferença significativa na CSS entre margem e meio do rio. O teste mostrou que não houve diferença significativa ( $\chi^2 < \chi_{95,d}^2$ ) na CSS superficial entre a margem e meio nas estações 6 e 9 (Tabela 4.2). Com isso, a amostragem foi simplificada nestas duas estações, coletando apenas na margem e adicionando um intervalo de confiança ( $\varepsilon_{hor}$ ) correspondente. Para as estações 1, 3, 5, 7, 8 e 10 foi utilizado o  $\varepsilon_{hor}$  considerando todo o conjunto de dados (N=43).

Em relação à variação na coluna d'água, no dia 17/12/2014, foi realizada, com ajuda de uma canoa, a perfilagem com turbidímetro de dois pontos da seção do rio Guandu, na estação 9. Um perfil foi feito a cerca de 10 metros da margem e o outro perfil foi feito no meio da calha principal. Os dois perfis de CSS foram submetidos ao teste da hipótese nula t-Student. Pelo resultado do teste, foi possível confirmar que

Tabela 4.3: Avaliação da hipótese nula da homogeneidade vertical para CSS na seção das est. 9 pelo teste t-Student ( $t$ ).  $\overline{CSS}$  é a média da CSS na superfície e coluna d'água (mg/l).  $Var(CSS)$  é a variância da CSS para superfície e na coluna d'água.  $t_{95,d}$  é o valor crítico t-Student para valor-p de 0,05 com  $d$  graus de liberdade.  $\varepsilon_{col}$  é a incerteza expandida da hipótese nula com valor-p = 0,05.

	Meio	Margem
Estatística		
Superfície		
$N$	12	11
$\overline{CSS}$	8,6	8,6
$\sigma_{CSS}^2$	0,100	0,114
Coluna d'água		
$N$	12	14
$\overline{CSS}$	8,6	8,6
$\sigma_{CSS}^2$	0,007	0,089
Teste		
$t_{obs}$	-0,018	0,031
$t_{95,d}$	2,160	2,179
IC		
$\varepsilon_{col}$	$\pm 0,0$	$\pm 0,2$

não existe diferença significativa ( $t_{obs} < t_{95,d}$ ) entre a coluna d'água e a superfície (Tabela 4.3). Com isso, a amostragem foi simplificada, descartando a necessidade de amostrar em diferentes profundidades, adicionando apenas o intervalo de confiança ( $\varepsilon_{col}$ ) correspondente. Para as estações 1, 3, 5, 7, 8 e 10 foi utilizado o  $\varepsilon_{col}$  do perfil do meio da calha.

Eventos extremos naturais (como tempestades) e antrópicos (como paradas de manutenção da Cedae) podem mudar drasticamente, e em questão de horas, a CSS de certos rios. Por limitações de natureza logística, financeira e instrumental, a estimativa do erro, ao adotar uma amostragem diária, só foi investigada nas estações 6 e 9, que dispunham de um turbidímetro coletando a cada 15 minutos. Esta incerteza será tratada nos capítulos 5 e 6.

Aplicando a lei de propagação da incerteza, temos:

$$\varepsilon_{CSS} = \sqrt{\varepsilon_{lab}^2 + \varepsilon_{hor}^2}, \quad (4.14)$$

Tabela 4.4: Estimativa da incerteza de medição da CSS, CSF e CSV e suas componentes.

	$\varepsilon_{PF}$	$\varepsilon_{AS}$	$\varepsilon_{PSS}$	$\varepsilon_{lab}$	$\varepsilon_{hor}$	$\varepsilon_{col}$	$\varepsilon_{CSS}$
Estimativa (mg/l)	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 5$	0	$\pm 6$

A estimativa da incerteza dos dados de CSS, CSF e CSV foi de  $\pm 6$  mg/l. Na Tabela 4.4, encontra-se resumida a participação de cada componente de incerteza de medição.

### 4.5.2 Curva de calibração da relação CSS-turbidez

As Figura 4.19 e Figura 4.20 curva de calibração das estações 6 e 9. O valor encontrado para incerteza foi de  $\pm 13,8$  mg/l, para o sensor n° 52545 e  $\pm 9,4$  mg/l, para o sensor n° 52546 (Figura 4.20 e Figura 4.20). No caso do sensor n° 52546, uma segunda regressão foi feita, usando apenas valores inferiores a 200 NTU. O segundo modelo melhorou a diferença residual dos valores mais baixos, o que foi desejável, uma vez que quase todos os registros observados, na estação 6, encontraram-se dentro da faixa de 0 a 200 NTU.

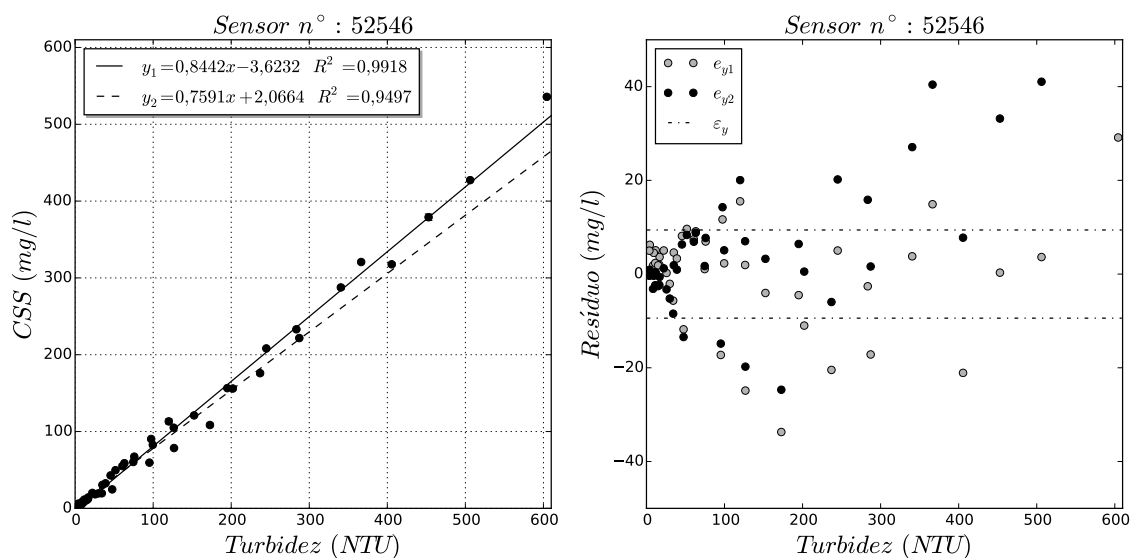


Figura 4.19: Curva turbidez-CSS, resíduo ( $e_{y1}$ ,  $e_{y2}$ ) e incerteza expandida ( $\varepsilon_{y2}$ ) do turbidímetro número 52546, estação 6, rib. das lajes, jusante da UHE Pereira Passos.

### 4.5.3 Curva de calibração da relação pressão-nível

Ambos apresentaram um desvio sistemático, expresso pelo parâmetro de ajuste independente ( $\theta_0$ ). A incerteza da curva de calibração foi calculada pela Equação 4.1

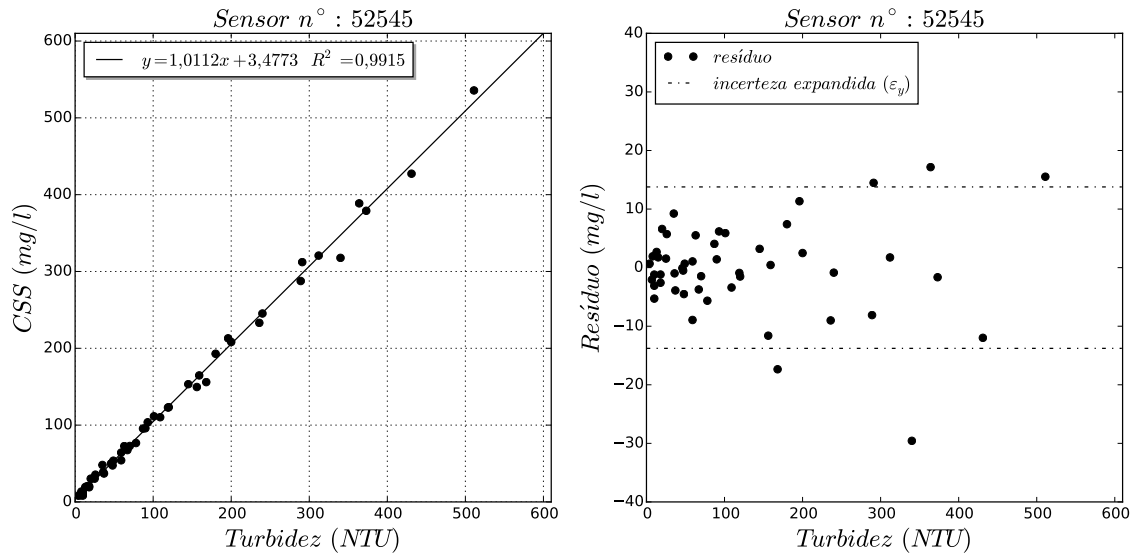


Figura 4.20: Curva-chave de turbidez, resíduo (e) e incerteza expandida ( $\epsilon_y$ ) do turbidímetro número 52545, estação 9, rio Guandu, jusante da ETA - Guandu.

e expandida pela Equação 4.2, no valor de  $\pm 0,005$  m, para ambos os sensores (Figura 4.21 e Figura 4.22).

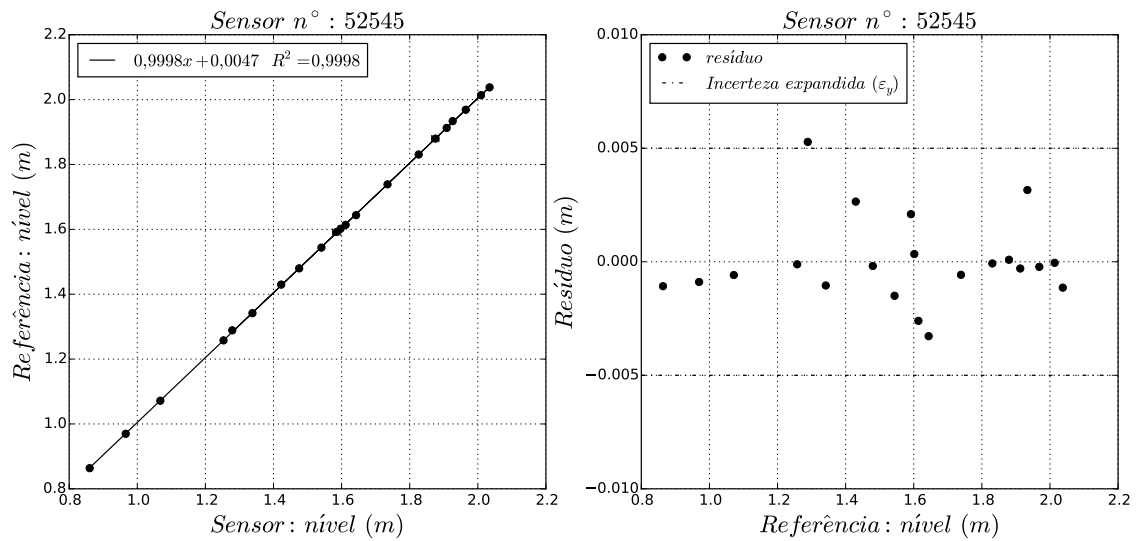


Figura 4.21: Curva de calibração, resíduo e incerteza expandida do sensor de pressão número 52545, estação 9, rio Guandu, jusante da ETA - Guandu.

#### 4.5.4 Campanha de correntometria na estação 9

A profundidade da seção do rio, na estação 9, era maior que 2 m. Por isso, foi necessário utilizar uma embarcação de apoio. Entretanto, não havia embarcações disponíveis na região, nas primeiras campanhas, o que motivou a construção de uma balsa improvisada, feita com 2 bombonas de 40 litros, batizada de *Papillon*

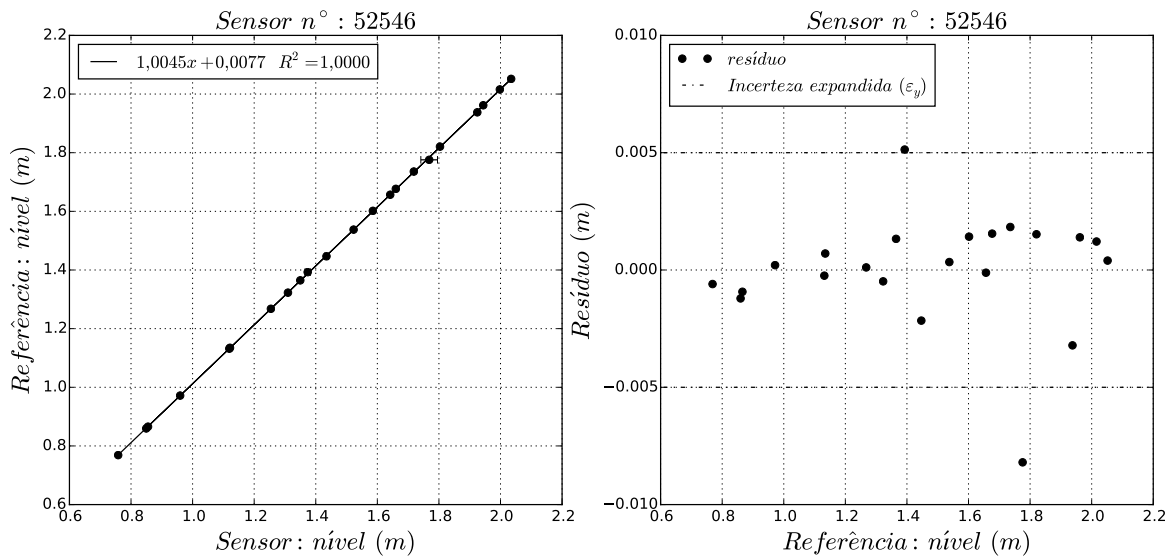


Figura 4.22: Curva de calibração, resíduo e incerteza expandida do sensor de pressão número 52546, estação 6, rio Rib. das lajes, jusante da UHE Pereira Passos.

(Figura 4.23). A propulsão da *Papillon* era garantida pela natação do operador, que dispunha de nadadeiras de mergulho e colete salva-vidas. O notebook e a bateria ficavam protegidos no interior da caixa organizadora e o ADCP, aparafusado na parte inferior da balsa.



Figura 4.23: Fixação do ADCP na balsa *Papillon* (foto à esquerda) e acomodação dos periféricos (bateria e computador) na caixa organizadora (foto à direita).

Entretanto, em condições de correnteza mais intensa, a travessia se tornava difícil e perigosa, para o operador e para o equipamento. Posteriormente, uma canoa, feita de tábuas, foi consertada e disponibilizada para a equipe (Figura 4.24). Também foi adquirido um cabo de aço, com catraca manual, que facilitou a execução da seção em condições de maior vazão (Figura 4.24). Todavia, a *Papillon* continuou sendo utilizada na campanha de correntometria, agora presa à popa da canoa.

O ADCP foi configurado para perfilar com células de 25 cm. A calibração da





Figura 4.24: Campanhas de medição de vazão com ADCP. Medição utilizando apenas a balsa *Papillon* (foto à esquerda) e medição utilizando uma canoa apoiando a balsa *Papillon* (foto à direita).

bússola foi feita, no rio, com o ADCP montado na *Papillon*. Devido à dificuldade em se manter parado no meio da calha do rio, não foi possível fazer o teste do fundo móvel. Entretanto, a sondagem com busca-fundo sugere que o leito, na parte de maior correnteza, é composto por afloramentos rochosos ou leito compactado.

A medição se iniciava na margem esquerda, onde era medida a sua distância em relação à embarcação. Depois, aguardava-se a aquisição de um mínimo de 10 verticais. Em seguida, a travessia se iniciava com ajuda da nadadeira (só *Papillon*) ou do cabo de aço (*Papillon*+canoa). A navegação, dentro do possível, foi em uma velocidade mais baixa do que o fluxo do rio e mantendo um trajeto retilíneo e perpendicular à margem. Ao chegar à outra margem, aguardou-se mais 10 aquisições antes da finalização da medição, registrando também a distância da margem. Para uma mesma condição de nível, buscou-se fazer, pelo menos, quatro travessias ou pares de travessias, com mais 720 s de tempo de medição.

A medição de nível feita pelo RBR Duo durante as campanhas de vazão foram usadas na construção da curva-chave. O nível usado na curva referenciou o zero no ponto mais profundo da seção. A sondagem do leito da seção da estação 9 foi extraída do levantamento correntométrico com ADCP. Na estação do Inea, como o sensor está em um poço, na margem esquerda do rio, sua posição está 0,57 m abaixo do ponto mais profundo da seção. Na estação 6, o sensor de pressão estava a 1,8 m acima do ponto mais profundo da seção e o sensor de pressão da estação 9 estava a 3,58 m acima do ponto mais profundo da seção.

No total, foram realizadas cinco campanhas de correntometria. Destas, três (19/11/2014, 15/12/2014 e 17/12/2014) foram incorporados ao presente estudo. Dentre as adversidades que afetaram a incerteza na medição e o descarte de medições, destacaram-se, criticamente, a duração e o número de travessias, como também a estacionalidade da vazão.

Inicialmente, o número de travessias era considerado como fator crítico para ava-

Tabela 4.5: Medição da vazão na estação 9.

Data e hora	duração (s)	h (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Desvio (%)	Inea: h (m)
19/11/14 12:00	> 720	4,08	38	< 5	4,55
17/12/14 10:30	1185	4,21	47	4,2	4,81
17/12/14 10:55	1248	4,33	61	3,1	4,92
17/12/14 14:30	956	4,42	66	0,4	4,96
15/12/14 17:40	380	4,82	120	-	5,45
15/12/14 17:50	332	4,93	129	-	5,56

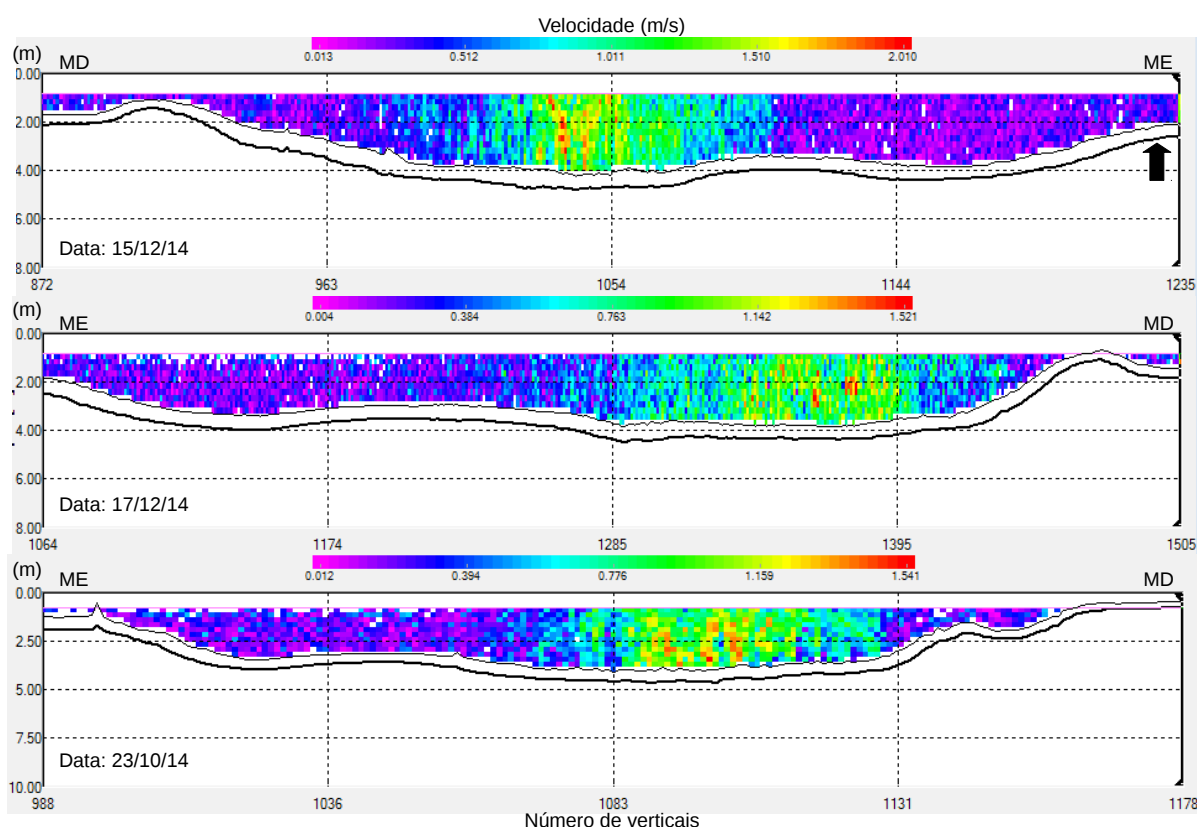


Figura 4.25: Visualização gráfica da seção de correntometria realizadas na estação 9 nos dias 23/10/2014, 15/12/2014 e 17/12/2014. A seta em preto aponta para localização da sonda RBR duo. ME: margem esquerda; MD: margem direita. Medição do dia 23/10/2014 utilizou apenas a balsa *Papillon* e medição do 15/12/2014 e 17/12/2014 utilizou uma canoa apoiando a balsa *Papillon*.

liação da qualidade da medição de vazão. Estudos em túnel de vento recomendavam pelo menos 10 repetições, com tolerância de até 5% no desvio em torno da média (AIAA, 1995). A USGS, até 2011, recomendava quatro repetições, com a mesma tolerância (MUELLER *et al.*, 2009). Entretanto, estudos mais recentes, conduzidos por OBERG e MUELLER (2007), mostraram que o tempo é o fator mais crítico na melhora da estimativa de vazão. Então, desde 2011, a USGS MASON (2011) passou a adotar este novo critério, recomendando apenas um par de travessias, com duração

completa de pelo menos 720 s (ou 2x360 s) e tolerância de até 5% no desvio em torno da média. Mais tarde, ANA (2014) passou a recomendar o mesmo procedimento.

O tipo de embarcação e a não estacionalidade da descarga líquida, devido à operação hidroelétrica dificultaram o cumprimento das recomendações propostas pela USGS e pela ANA. Na campanha do dia 23/10/14, a travessia foi feita com a *Papillon* movida por um nadador com nadadeira de mergulho. Para manter a direção e vencer a correnteza, o nadador tinha que impor maior velocidade, descumprindo o tempo mínimo de uma travessia (360 s). Por esta razão, as medições deste dia acabaram sendo descartadas. No dia 15/12/14, apesar da campanha já dispor de uma canoa e cabo de aço, o regime do rio foi marcado pela não estacionalidade, sendo que cada travessia era um evento único. Como os registros foram obtidos em condições mais raras, estas medições foram incorporadas ao conjunto de dados. Apenas no dia 17/12/14, foi possível atender plenamente às recomendações proposta pela USGS e pela ANA. No dia 19/11/14, uma campanha conjunta do LDSC com o Inea permitiu obter uma boa estimativa, oriunda de mais de quatro travessias, feitas entre as 11:45 e 12:45. Apenas o valor médio foi disponibilizado pelo órgão. Entretanto, durante o acompanhamento da medição foi possível testemunhar que todas as recomendações foram plenamente executadas. A Tabela 4.5 mostrou as medições que foram consideradas válidas e aplicadas na construção da curva-chave de vazão.

#### 4.5.5 Curva-chave de vazão

Na estação 6, a curva-chave de vazão usou dados de vazão horária da estação UHE Pereira Passos - Canal Fuga (59311000), disponibilizados pela Hidroweb da ANA. O registro de nível da sonda RBR se mostrou coerente e sincronizado com a medição de vazão da Hidroweb (Figura 4.26). Os níveis máximo e mínimo, medidos pela sonda, foram contemplados com registros de vazão correspondentes, presentes no conjunto de dados da estação 59311000.

Na estação 9, a curva-chave contou apenas com medições de vazões, restritas a uma faixa inferior a 130 m<sup>3</sup>/s (Tabela 4.5). A medição de nível, por outro lado, abrangeu um conjunto mais amplo, que inclui níveis que correspondem a vazões superiores aos medidos na campanha com ADCP. Dentre todos os eventos de pico de descarga líquida, as duas interrupções da captação da ETA-Guandu foram as mais expressivas. Desta forma, na estação no 9, a extrapolação superior da curva-chave foi reavaliada, a partir da experiência visual obtida na visita de campo, durante as duas interrupções da captação da ETA-Guandu.

A partir do testemunho presencial, informações disponíveis da defluência da UHE Pereira Passos e da precipitação dos quatro dias anteriores, foi possível concluir

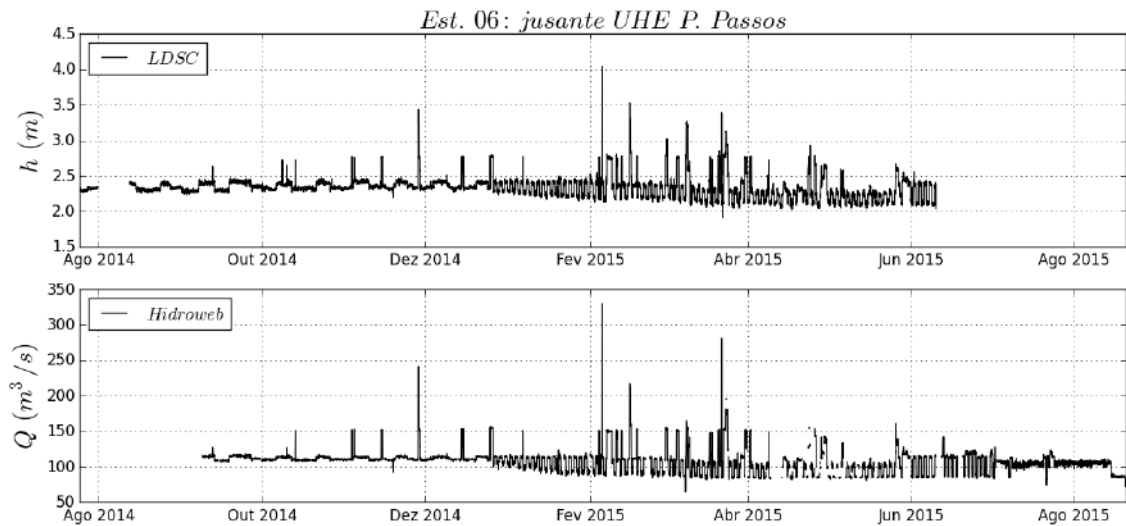


Figura 4.26: Comparação entre a série de nível medida pela sonda RBR e a vazão disponibilizada pela Hidroweb na estação 6

que a extrapolação da curva-chave, baseada no método logarítmico (Equação 4.5 e Equação 4.6), estaria sobrestimando, significativamente, a vazão observada nesses dois dias. Por isso, duas curvas-chave foram propostas: uma curva-chave, baseada no modelo de lei de potência ( $Q_1$ ), que cobriria a faixa com medições de vazões inferiores a  $130 \text{ m}^3/\text{s}$  e uma outra curva chave, baseada no modelo de regressão linear ( $Q_2$ ), que responderia pela faixa que extrapola o conjunto de dados usado no treinamento / teste ( $> 130 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Pelas mesmas razões, duas curvas-chave provisórias foram propostas, para a estação de monitoramento de nível do Inea.

A incerteza da curva-chave de vazão foi calculada pela Equação 4.1 e expandida pela Equação 4.2 no valor de  $\pm 9,2 \text{ m}^3/\text{s}$ , para a estação 6,  $\pm 6,4 \text{ m}^3/\text{s}$  para a estação 9 e  $\pm 8,1 \text{ m}^3/\text{s}$ , para a estação do Inea (Figura 4.27, Figura 4.28 e Figura 4.29).

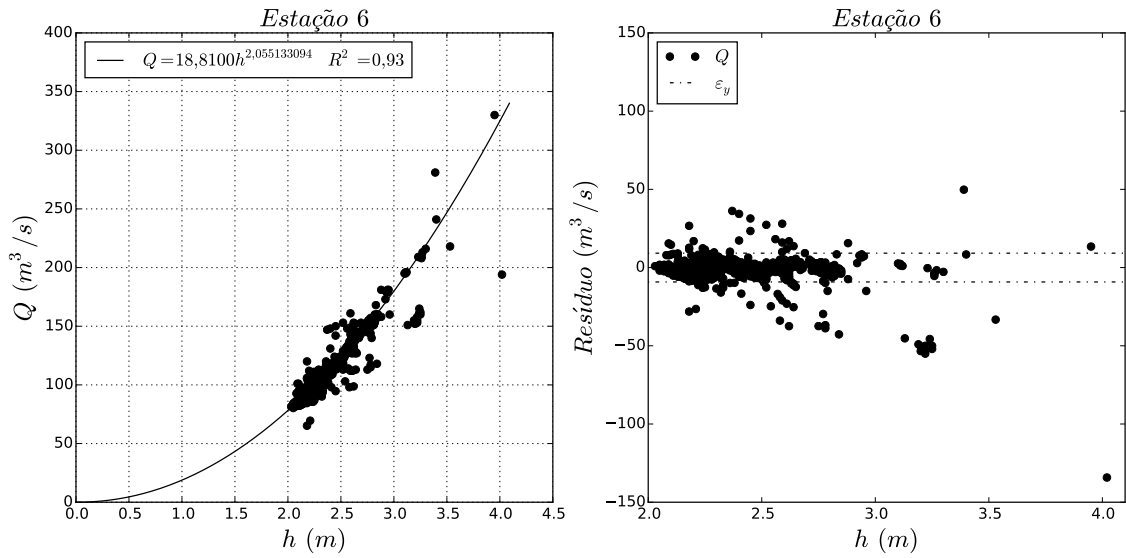


Figura 4.27: Curva-chave de vazão, resíduo e incerteza expandida da estação 6, rio Rib. das lajes, jusante da UHE Pereira Passos.

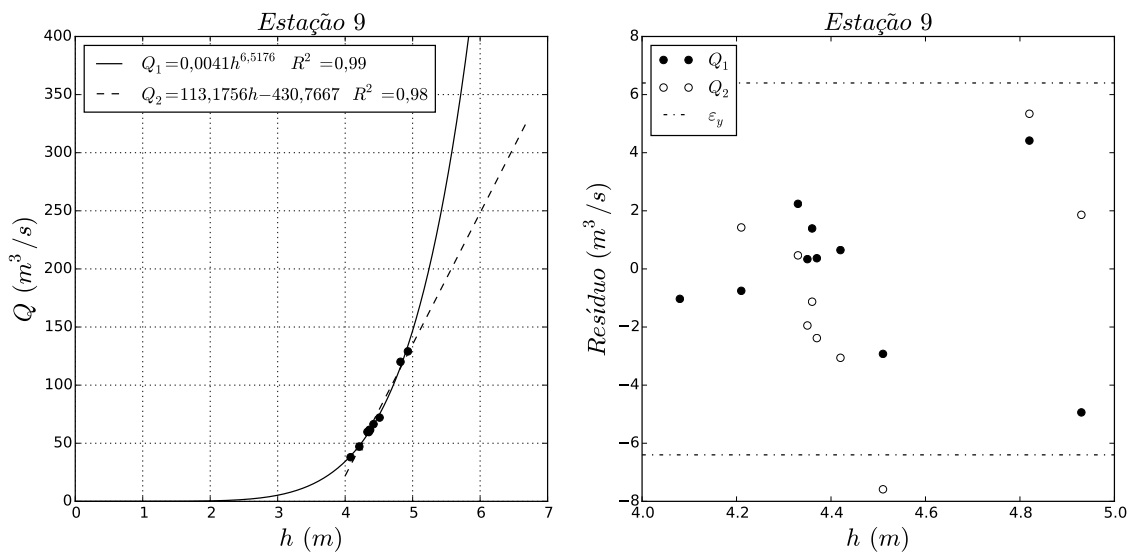


Figura 4.28: Curva-chave de vazão, resíduo e incerteza expandida da estação 9, rio Guandu, jusante da ETA - Guandu.

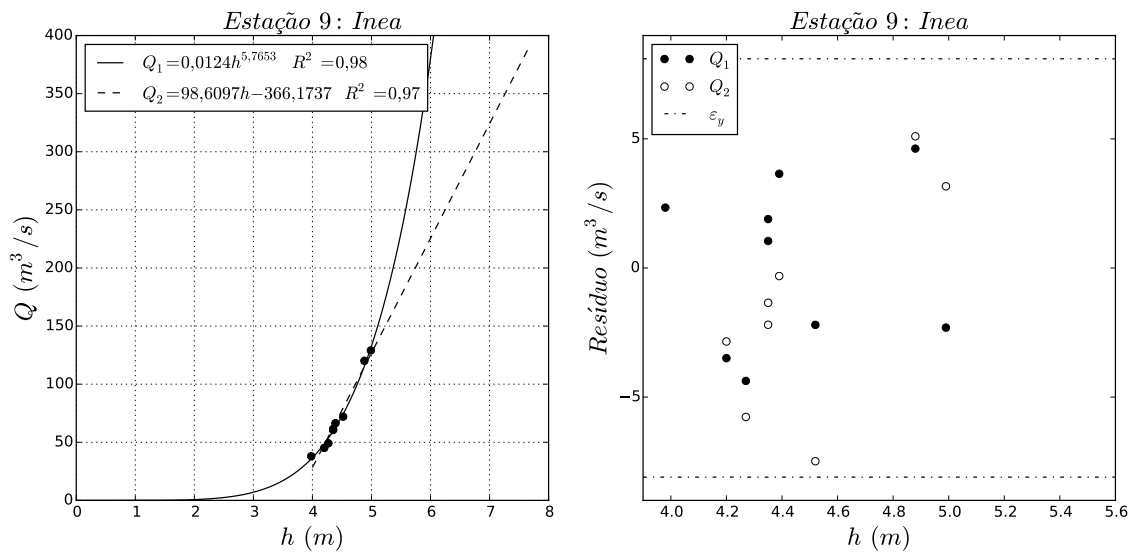


Figura 4.29: Curva-chave de vazão, resíduo e incerteza expandida da estação do Inea próxima à estação 9 da tese, rio Guandu, jusante da ETA - Guandu.

# Capítulo 5

## Estimativa da descarga anual de sólidos suspensos captada pela UEL Santa Cecília

### 5.1 Introdução

A descarga de sólidos suspensos (ou lavagem, ver Capítulo 4) é controlada por vários fatores dinâmicos e não lineares, como clima, pedologia, litologia, relevo e usos do solo e da água (GARCIA, 2008; GELLIS, 2013). A variabilidade temporal da descarga sólida em suspensão se manifesta na escala anual, sazonal ou associada a eventos isolados (diário e horário). Comumente, a maior parte da descarga anual de sedimentos finos, transportados em um rio, pode ser resumida em 5 ou 10 dias (COYNEL *et al.*, 2004). Logo, a escolha da taxa de amostragem e do tamanho do registro pode variar conforme o clima, as características da bacia e a precisão desejada. Em bacias hidrográficas menores, localizadas em vales estruturais, eventos de alta concentração de sólidos em suspensão podem durar menos de um dia. Por outro lado, bacias maiores podem apresentar mudanças mais lentas, chegando a durar vários dias. Eventos extremos, como tempestades catastróficas, são um exemplo típico de evento que precisaria de resolução diária ou horária. Porém, o custo em manter um monitoramento hidrossedimentológico acaba sendo o fator determinante na escolha da taxa amostral e do tamanho do registro.

Na prática, as séries temporais disponíveis são, normalmente, curtas ou fragmentadas, e a resolução temporal é inadequada para uma estimativa precisa. COYNEL *et al.* (2004) mostraram, a partir de séries temporais em alta resolução, o quanto se perde na precisão da estimativa da descarga sólida em suspensão, quando se tem nas mãos apenas séries com baixa resolução temporal. Ao simular um cenário, em que o desvio aceitável na estimativa seria de 20 %, o estudo concluiu que a amostragem



ideal, para uma bacia hidrográfica de 53.100 km<sup>2</sup> (rio Garonne), deveria ser a cada três dias e, para uma bacia de 165 km<sup>2</sup> (rio Nivelles), deveria ser a cada sete horas.

Diante da impossibilidade de obter um ano hidrológico completo, com dados diários de concentração de sólidos suspensos (CSS), torna-se necessário completar a série medida com um modelo de imputação de dados faltantes. Porém, uma modelagem que consiga expressar os mecanismos físicos da produção de sedimentos, em uma bacia, e seu transporte para a calha do rio, na escala diária, é muito difícil e custoso, dependendo do controle, em alta resolução espaço-temporal, de uma série de variáveis, tais como topografia, precipitação, tipo e uso solo.

Por isso, muitos estudos foram conduzidos de forma a buscar modelos, que reduzam a complexidade do problema, em técnicas de natureza prática (GARCIA, 2008). Dentre os modelos mais difundidos, está o modelo de lei da potência linearizado ou curva-chave de sedimento KISI (2005); AYTEK e KIŞI (2008). Este é um modelo empírico e, portanto, tem, como ponto de partida, um processo sistemático de medição. Deste conjunto de dados, tiram-se conclusões e se formula uma equação que vincula as grandezas de interesse, sem estabelecer hipóteses a priori. As condicionantes para o uso deste tipo de modelo referem-se mais às características estatísticas dos dados do que em atender alguma teoria física de causa e efeito. No caso da descarga de lavagem, de fato, o mecanismo físico que explica sua variabilidade está na bacia e na hidráulica do rio.

A curva-chave de sedimento utiliza a relação entre a concentração de sólidos em suspensão (CSS) e a vazão (Q) (GARCIA, 2008). A correlação positiva entre a vazão e concentração de sólidos em suspensão é explicada pela redundância da informação, no sentido de que ambas são efeitos de algumas causas em comum, como, por exemplo, escoamento superficial (*run off*), após um evento de chuva espacialmente homogênea na bacia. Diferente do escoamento superficial, que é um processo que abrange uma grande área (km<sup>2</sup>), a vazão fluvial se concentra em uma seção bem definida (m<sup>2</sup>), permitindo que seja facilmente monitorada. A combinação de um dado facilmente disponível e a correlação positiva entre as duas grandezas são as principais razões para o uso dessa técnica.

Apesar da correlação positiva, a resposta da vazão e da CSS não são exatamente iguais após um evento de chuva homogênea, na bacia. O início do escoamento concentrado é facilmente reconhecido pelo aumento abrupto da vazão e da CSS. Por outro lado, o final do evento é mais difícil de ser discernido, uma vez que seu decaimento é mais lento e, frequentemente, acaba sendo sobreposto pelo evento seguinte, especialmente na estação chuvosa. Por essa razão, a magnitude da concentração de sólidos em suspensão pode variar em ordens de grandeza para uma mesma vazão.

A relação temporal da magnitude das duas grandezas se expressam em 5 tipos básicos de histerese, sendo que apenas o raro tipo 5 seria estacionário(Figura 5.1)

(GELLIS, 2013). Na maioria dos rios, a histerese é do tipo 1, em que as maiores concentrações ocorrem na ascensão da vazão e as menores concentrações, durante declínio da vazão. Neste tipo de histerese, o pico de CSS ocorre antes do pico de vazão, quando a fonte de sedimento é exaurida, ainda durante o evento do escoamento superficial. O tipo 3 ocorre quando a velocidade da onda de inundação é mais rápida do que o pico de CSS. Os tipos 2 e 4 podem ser encontrados em ambientes onde ocorre degelo e em ambientes desérticos, respectivamente (GELLIS, 2013). O tipo 1 é comumente associado às bacias hidrográficas mais conservadas e o tipo 3, a bacias grandes ou alteradas, como áreas urbanas, onde o escoamento pode ser muito rápido (GELLIS, 2013).

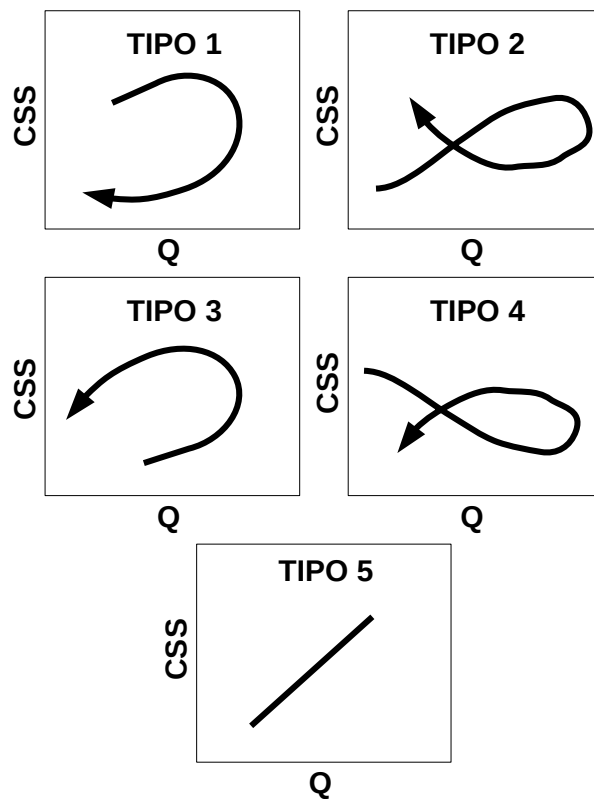


Figura 5.1: Tipos de histerese na relação CSS-Q.

A participação do rio Paraíba do Sul no assoreamento da margem noroeste da baía de Sepetiba tem como ponto de partida a captação da UEL Santa Cecília e sua defluência para o reservatório de Santana, localizado no município de Barra do Piraí (RJ). Operado pela LIGHT desde 1953, este desvio representa o início da transposição Paraíba do Sul-Piraí-Guandu (TPPG). Após levantamento bibliográfico, foram encontradas apenas duas estimativas para a descarga de sólidos suspensos bombeada pela UEL Sta. Cecília: uma estimativa de 1.400.000 t/ano (BIRD-MPO/SEPURB/PQA-ABC-PNUD, 1997) e outra estimativa de 584.000 t/ano (MOLISANI *et al.*, 2006). Essa diferença em ordem de grandeza entre as estimativas foi

um motivo adicional para revisão desse cálculo.

O entendimento da variabilidade temporal da descarga de sólidos suspensos neste ponto seria estratégica para a tese, afetando diretamente as estimativas da retenção de sedimentos finos nos reservatórios da transposição e na descarga anual de sólidos suspensos que chega ao rio Guandu e baía de Sepetiba. Este capítulo visou estimar a descarga anual de sólidos suspensos proveniente da captação da UEL Santa Cecília (estação 1), em um ano seco extremo (15/4/2014 a 14/4/2015), e em um ano típico (15/4/2015 e 14/04/2016).

## 5.2 Seleção e coleta de dados

### 5.2.1 Seleção das variáveis

As variáveis selecionadas para estimação da descarga de sólidos suspensos foram: vazão natural ( $Q_N$ ), no ponto de captação da UEL Santa Cecília; precipitação acumulada diária ( $P$ ) em diferentes partes da bacia do Paraíba do Sul, a montante da UEL Sta. Cecília; e concentração de sólidos suspensos (CSS), no ponto de captação da UEL Santa Cecília ou logo na saída do túnel, onde o reservatório do Santana recebe as águas bombeadas de Sta. Cecília (Tabela 5.7 e Figura 5.2). A descrição da estação 1 se encontra no capítulo 4.

A série temporal da concentração de sólidos em suspensão foi extraída da base de dados do Inea e da *Hidroweb* (Tabela 5.7). Na base de dados do INEA, foi selecionada a estação SC200, localizada próxima à captação da UEL Sta. Cecília. Na base da *Hidroweb*, foram selecionadas quatro estações logo a montante da captação da UEL Sta. Cecília: duas na altura do município de Volta Redonda-RJ (58305000 e 58305001), uma em Barra do Piraí-RJ (58322000) e uma na saída do túnel da UEL Sta. Cecília para o reservatório de Santana (58318001) (Tabela 5.7 e Figura 5.2). O registro de CSS mais antigo foi coletado em 23/4/1986. Assim, esta data passou a ser referência para o levantamento das demais variáveis nos bancos de dados.

A vazão natural corresponde à vazão em que é retirado o efeito da operação de aproveitamentos à montante e incorporadas vazões relativas à evaporação líquida dos reservatórios e aos usos consultivos da água na bacia (ONS, 2015). A série de vazão natural média diária na localidade da UEL Santa Cecília foi obtida do posto natural n<sup>o</sup> 125 e atualizada para o período de 1931 a 2014, pelo ONS (ONS, 2015), e disponibilizada pela ANA<sup>1</sup> (Tabela 5.7 e Figura 5.2). Informações sobre as vazões do período de 2015 e 2016 foram obtidas, indiretamente, a partir dos informativos preliminares diários da operação (IPDO-ONS<sup>2</sup>), os quais disponibilizam a vazão

---

<sup>1</sup><http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/outorgaefiscalizacao/RioParaibadoSul.aspx>

<sup>2</sup>[http://www.ons.org.br/resultados\\_operacao/ipdo.aspx](http://www.ons.org.br/resultados_operacao/ipdo.aspx)

regularizada do dia.

A vazão média diária bombeada pela UEL Sta. Cecília para o reservatório de Santana foi extraída indiretamente a partir dos informativos preliminares diários da operação (IPDO-ONS). O valor era calculado pela diferença entre as vazões afluente e defluente do reservatório de Sta. Cecília.

Os dados de precipitação acumulada diária foram extraídos da base de dados da *Hidroweb*<sup>3</sup> administrada pela ANA. Foram selecionadas três localidades, nas quais foi possível reconstituir séries de precipitação para o período de 1986-2016, e que representavam diferentes regiões da bacia do Paraíba do Sul, a montante de UEL Sta Cecília (Tabela 5.7 e Figura 5.2). A localidade de São Luiz de Paraitinga-SP (PSL) representa a região do principal formador do rio Paraíba do Sul (rio Paraitinga). Taubaté-SP (PTA) representa a região central da bacia do Paraíba do Sul. A localidade de Volta Redonda-RJ (PVR) representa a região mais próxima a montante da UEL Sta. Cecília. Nas três localidades, houve a necessidade de usar duas estações pluviométricas, para cobrir o período de interesse: uma mais antiga (convencional), que disponibiliza precipitação acumulada diária, e outra mais recente (telemétrica), que disponibiliza precipitação acumulada horária.

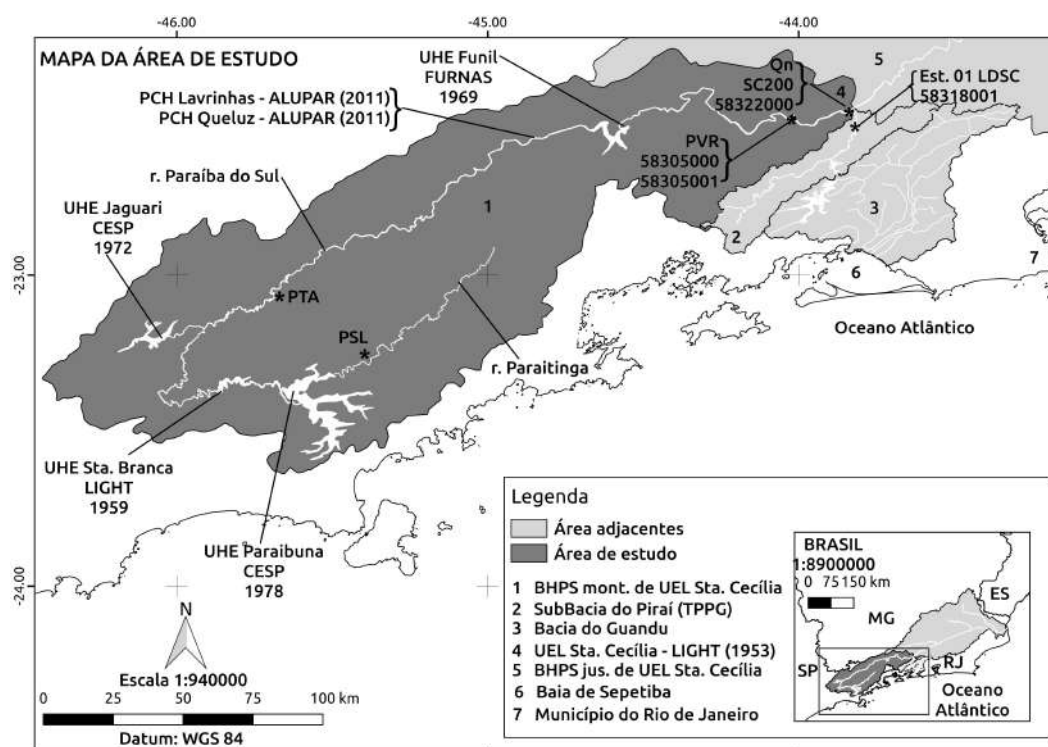


Figura 5.2: Área de estudo. Qn: vazão natural, PSL: precipitação acumulada em S. L. de Paraitinga, PTA: precipitação acumulada em Taubaté, PVR: precipitação acumulada em Volta Redonda.

<sup>3</sup><http://hidroweb.ana.gov.br/>

Tabela 5.1: Estações selecionadas e estação criada no presente estudo (Cód.: 1 - LDSC). PSL: precipitação acumulada (mm/d) no município de São Luiz de Paraitinga; PTA: precipitação acumulada (mm/d) no município de Taubaté; PVR: precipitação acumulada (mm/d) no município de Volta Redonda;  $Q_N$ : vazão natural diária a montante da captação de UEL Sta. Cecília;  $Q_R$ : vazão regularizada diária a montante da captação de UEL Sta. Cecília.

Dado	Tipo <sup>(a)</sup>	Código	Início	Fim	$\Delta t$ <sup>(b)</sup>	Lat	Lon	Oper.	Resp.
PSL	C	2345065	1937	2015	D	-23,2218	-45,3234	CPRM	ANA
	T	86912	2014	2016	H	-23,2328	-45,3038	INMET	INMET
PTA	C	2345062	1937	2015	D	-23,0373	-45,5598	CPRM	ANA
	T	86911	2006	2016	H	-23,0417	-45,5208	INMET	INMET
PVR	C	2244041	1943	2015	D	-22,5008	-44,0920	CPRM	ANA
	T	58305000	2015	2016	H	-22,4993	-44,0916	LIGHT	LIGHT
$Q_N$	CC	125	1931	2014	D	-22,4818	-44,8394	LIGHT	ONS
$Q_R$	CC	125	2015	2016	D	-22,4818	-44,8394	LIGHT	ONS
CST	C	SC200	1984	2014	V	-22,4818	-44,8394	INEA	INEA
CSS	C	58305001	1994	1995	V	-22,5014	-44,0912	NI <sup>(c)</sup>	NI
CSS	C	58305000	1999	2012	V	-22,5005	-44,0908	NI	NI
CSS	C	58322000	1999	2000	V	-22,4662	-43,8502	NI	NI
CSS	C	58318001	1999	2011	V	-22,5107	-43,8254	NI	NI
CSS	C	1	2014	2016	V	-22,5104	-43,8253	LDSC	LDSC
CSF	C	1	2014	2016	V	-22,5104	-43,8253	LDSC	LDSC
CSV	C	1	2014	2016	V	-22,5104	-43,8253	LDSC	LDSC

<sup>(a)</sup> Tipo de estação: C - convencional, T - telemétrica, CC - curva-chave.

<sup>(b)</sup> Taxa de amostragem: D - diário, H - horário, V - variável.

<sup>(c)</sup> NI: não informado.

## 5.2.2 Materiais e Métodos

### 5.2.3 Vazão natural média diária ( $Q_N$ )

A vazão afluyente, observada no reservatório de Santa Cecília é artificial, regularizada pela operação em cascata das usinas hidroelétricas a montante. Entretanto, para aplicações relativas à descarga diária de sólidos suspensos, necessita-se conhecer a resposta do rio aos eventos de chuva intensa sem os efeitos indesejados de amortecimento de cheia, ou seja, reconstituir a vazão natural da seção como se não existissem os reservatórios. Dois métodos foram avaliados para tratar esse problema, a média móvel e média móvel exponencial.

A média móvel aritmética (MM) é modelo de extrapolação de dados que suaviza as oscilações, um tipo de filtro, e se baseia na seguinte equação de recursividade:

$$\hat{y}(t+1) = \frac{y(t) + y(t-1) + \dots + y(t-k+1)}{k} \quad (5.1)$$

No caso da média móvel exponencial(MME) , existe um fator de multiplicação ( $\alpha$ ), que pode dar mais ou menos peso ao residual mais recente:

$$\hat{y}(t+1) = \hat{y}(t) + \alpha(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (5.2)$$

### 5.2.4 Modelo de imputação de dados faltantes na série de CSS

#### Curva-chave de sedimento

A curva-chave de sedimento é um modelo logarítmico e é aplicada para estimar a descarga sólida de fundo ( $Q_{sf}$ ) a partir de vazão ( $Q$ ). Entretanto, esse mesmo modelo tem sido aplicado, com frequência, para estimativa de CSS. Apesar de não haver relação física de causa e efeito, a alta correlação positiva, observada entre as duas variáveis, combinada à disponibilidade de dados de vazão, em resolução diária ou horária, tem justificado o uso prático dessa relação. A curva-chave de sedimento pode ser expressa como:

$$CSS(t) = \theta_0(Q_N(t-i))^{\theta_1}\varepsilon, \quad (5.3)$$

onde a  $Q_N(t-i)$  é vazão natural de uma seção para atrasos  $i=0, 1, 2, \dots$  dias. A equação anterior pode ser escrita na forma de regressão linear, pela transformação

logarítmica da série temporal de vazão natural ( $Q_N(t-i)$ ) e da concentração de sólidos suspensos ( $CSS(t)$ ):

$$\log(CSS(t)) = \theta_1 \log(Q_N(t-i)) + \log(\theta_0) + \log \varepsilon \quad (5.4)$$

Depois, os parâmetros de ajustes  $\theta_0$  e  $\theta_1$  foram obtidos pelos métodos dos mínimos quadrados (MMQ). O fator de correção  $\varepsilon$  foi calculado como  $\varepsilon = e^{1/2\sigma^2}$ , para logaritmo neperiano ou  $\varepsilon = 10^{1,1513\sigma^2}$ , para logaritmo de base 10, onde  $\sigma^2$  seria a variância da Equação 5.4.

### 5.2.5 Estatística de avaliação e validação

A validação de um modelo é baseada na avaliação estatística dos resultados, obtidos a partir do conjunto de teste. Basicamente, as estatísticas de validação foram calculadas a partir do resíduo do modelo ( $e(t)$ ), ou seja, a diferença entre o valor real e o valor predito pelo modelo:

$$e(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (5.5)$$

O coeficiente de determinação mede o percentual da variabilidade total, que é explicada pelo modelo:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (y(t) - \hat{y}(t))^2}{\sum_{t=1}^N (y(t) - \bar{y})^2} \quad (5.6)$$

Um valor de  $R^2$  próximo de 1 indica que a maior parte da variabilidade total é explicada pelo modelo.

Outra estatística utilizada para avaliação de modelos é a raiz quadrada do EMQ, conhecida como RMS:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N e^2(t)} \quad (5.7)$$

O RMS tem a mesma escala da variável de saída.

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o RMS são muito sensíveis aos valores mais altos da variável de saída, uma vez que os erros são elevados ao quadrado. Para a avaliação de valores menores, pode-se utilizar o  $R^2$  sobre os logaritmos dos valores conservados e preditos:

$$R_{\log}^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (\log(y(t)) - \log(\hat{y}(t)))^2}{\sum_{t=1}^N (\log(y(t)) - \overline{\log y(t)})^2} \quad (5.8)$$

Outra estatística variante é o erro absoluto médio percentual (MAPE):

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left| \frac{y(t) - \hat{y}(t)}{y(t)} \right| \quad (5.9)$$

O MAPE apresenta seu resultado de forma relativa.

Uma estatística adimensional, para avaliação do desempenho do modelo, é correlação entre os resultados do modelo e os valores observados da variável de saída:

$$\rho_{y\hat{y}} = \frac{\sum_{t=1}^N (y(t) - \bar{y})(\hat{y}(t) - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sigma^2(y)}\sqrt{\sigma^2(\hat{y})}}, \quad (5.10)$$

onde  $\bar{\hat{y}} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \hat{y}(t)$  é média dos resultados do modelo.

A validação cruzada é um procedimento simples e robusto, para avaliar o desempenho do modelo, a partir de um mesmo conjunto de dados. Consiste em dividir o conjunto de dados em K subconjuntos e em K ciclos. Em cada ciclo, o modelo é ajustado, utilizando K-1 subconjuntos, e avaliado no subconjunto teste correspondente ao ciclo Figura 5.3. As estatísticas de avaliação podem ser calculadas sobre o resultado de cada ciclo e a avaliação final seria aplicada no conjunto formado pela concatenação das saídas dos K testes. Recomenda-se utilizar 5 ou 10 ciclos e que cada ciclo seja maior que 50 registros.

	1	2	3	...	K
<b>Ciclo 1:</b>	Te	Tr	Tr	...	Tr
<b>Ciclo 2:</b>	Tr	Te	Tr	...	Tr
<b>Ciclo 3:</b>	Tr	Tr	Te	...	Tr
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
<b>Ciclo K:</b>	Tr	Tr	Tr	...	Te
<hr/>					
<b>Avaliação:</b>	Te	Te	Te	...	Te

Figura 5.3: Representação do procedimento de validação cruzada de K ciclos. Tr é conjunto de treinamento e Te é o conjunto de teste.



Tabela 5.2: Estações sedimentológicas usadas no presente estudo. N: número de registros.  $\bar{\mu}$  é a média.  $\sigma$  é o desvio padrão. CST é a concentração de sólidos totais suspensos. CSS é a concentração de sólidos suspensos. CSF é a concentração de sólidos fixos suspensos. CSV é a concentração de sólidos voláteis suspensos.

Sigla	Código	N	$\bar{\mu}$ mg/l	$\sigma$ mg/l	Mín. mg/l	Máx. mg/l
CST	SC200	155	26,9	$\pm 33,8$	1,8	250
CSS	58305001	5	16,2	$\pm 3,6$	11,6	22,0
CSS	58305000	26	36,2	$\pm 35,1$	9,0	190,0
CSS	58322000	6	56,4	$\pm 33,9$	35,0	128,1
CSS	58318001	22	83,6	$\pm 74,4$	12,0	271,0
CSS	1	24	42,4	$\pm 49,0$	4,7	186,4
CSV	1	24	6,1	$\pm 5,5$	1,2	22,8
CSF	1	371	34,6	$\pm 39,8$	0,4	331,5

## 5.2.6 Cálculo da descarga anual de sólidos suspensos ( $Q_{ss}$ )

Nesse estudo, será assumido que a descarga de sólidos suspensos é igual à descarga de lavagem, ou seja, que só existem silte e argila em suspensão e que o leito não é fonte de sedimento fino. A descarga anual de sólidos suspensos da estação  $i$  ( $Q_{ssi}$ ) foi expressa como:

$$Q_{ssi} = \sum_{t=1}^{365} 0,0864 Q_{i,t} CSS_{i,t}, \quad (5.11)$$

onde  $Q_{i,t}$  é a descarga líquida, na estação  $i$ , para o dia  $t$  (l/dia) e  $CSS_{i,t}$  é a concentração de sólidos suspensos, na estação  $i$ , para o dia  $t$  (t/l).

## 5.3 Pré-processamento

### 5.3.1 Tratamento da série de CSS

A base de dados sedimentológicas está dividida em séries temporais de concentrações de sólidos totais em suspensão (CST), concentração sólidos fixos em suspensão (CSF), concentração sólidos suspensos (CSS) e concentração de sólidos voláteis (CSV) (Tabela 5.2). Estas séries apresentam período de amostragem variado, sendo que a melhor resolução amostral é diária. Como frequentemente a literatura utiliza CSS, todas as outras informações sedimentológicas (CSF e CST) foram convertidas para CSS, de modo a maximizar o aproveitamento dos registros sedimentológicos disponíveis neste local. A transparência da água pós-filtragem, constatada pela

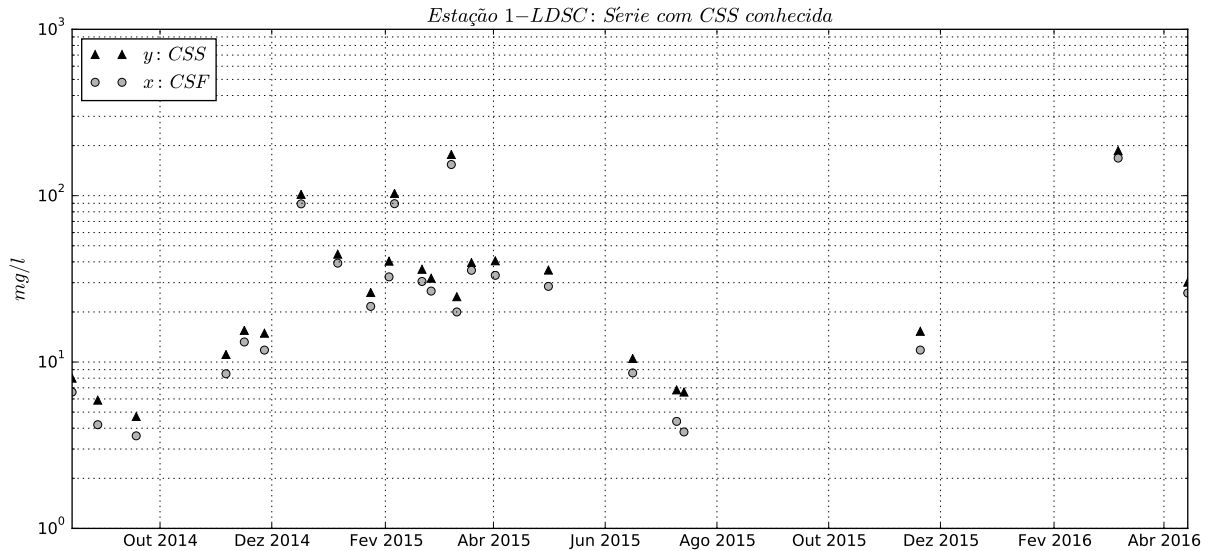


Figura 5.4: Série temporal das amostras coletadas no presente estudo na estação 1 com CSS e CSF conhecidos.

inspeção visual, durante a filtração das 371 amostras, sugere que, no caso da estação 1, a participação dos coloides seja desprezível, em termos de peso. Isto permitiu simplificar o problema, considerando a CST igual a CSS.

Para converter CSF em CSS ou CST, foi proposto um modelo de regressão linear para a estação 1 (Figura 5.6). Para tal, usou-se uma série de 24 registros coletados, na estação 1, em dias variados, onde eram conhecidos os valores CSF e CSS (Figura 5.4 e Figura 5.5). Esse conjunto de dados foi usado para ajustar os parâmetros do modelo de regressão linear puro através do método dos mínimos quadrados (Tabela 5.3 e Figura 5.6).

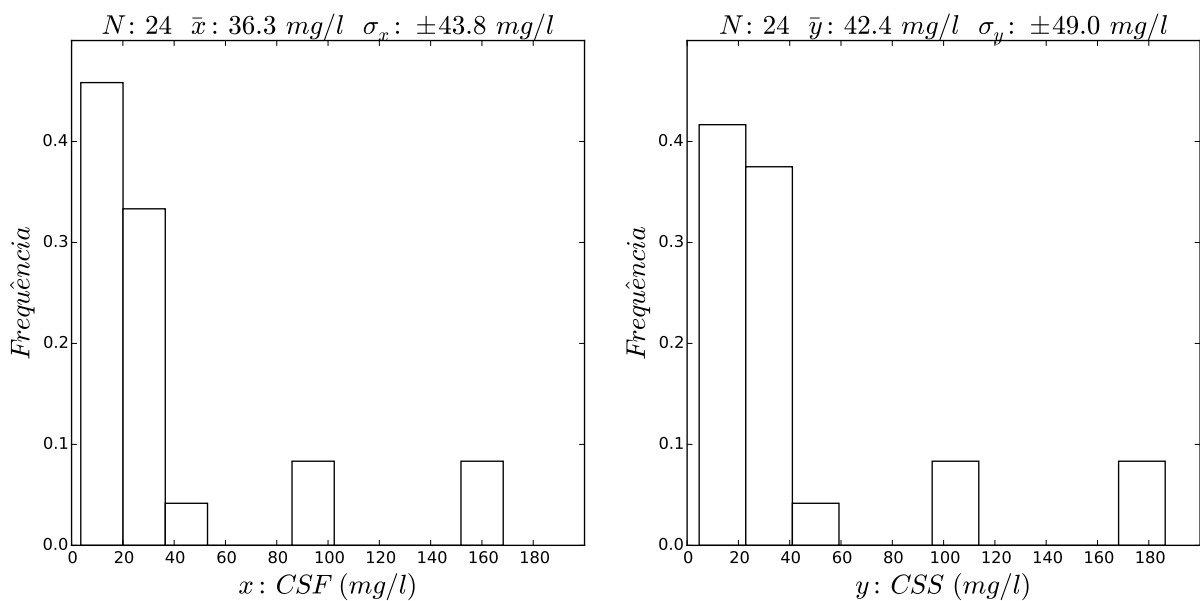


Figura 5.5: Histogramas das variáveis CSS e CSF.

Tabela 5.3: Estimador da CSS a partir da CSF.

<b>Descrição das variáveis</b>	
$N^\circ$ registros:	24
$\mathbf{x}$ :	CSF
$\bar{x}$ :	36,3 mg/l
$\sigma_x$ :	$\pm 43,8$ mg/l
$\mathbf{y}$ :	CSS
$\bar{y}$ :	42,4 mg/l
$\sigma_y$ :	$\pm 49,0$ mg/l
<b>MMQ</b>	
Modelo:	$\hat{y} = 1,1185066906x + 1,7763862425 + \varepsilon$
Bias:	$-9,26 \times 10^{-16}$
Variância:	1,94
<b>Avaliação</b>	
$R^2$ :	0,999
$R_{log}^2$ :	0,996
RMS:	$\pm 1,4$ mg/l
MAPE:	0,05
$\rho_{y\hat{y}}$ :	0,9996
<b>Intervalo de confiança</b>	
$t_{95,22}$ :	2,074
$\varepsilon$ :	$\pm 3,0$ mg/l

As estatísticas de avaliação do modelo foram aplicadas para todo o conjunto de dados, uma vez que este conjunto era muito pequeno ( $N=23$ ), onde se encontra resumida na Tabela 5.3. A distribuição do resíduo apresentou média nula, variância aproximadamente constante e forma próxima da distribuição normal, com  $R^2$  de 0,96, atendendo às condições necessárias para o uso do MMQ (Figura 5.7 e Figura 5.8). O ajuste do modelo foi satisfatório na explicação da variabilidade total, com o  $R^2$  e  $R_{log}^2$  muito próximo de 1 (Tabela 5.3 e Figura 5.6). O valor do coeficiente de correlação ( $\rho_{y\hat{y}}$ ) também foi muito próximo de 1, demonstrando um bom desempenho na previsão dos dados de CSS do conjunto de treinamento (Figura 5.6). As estatísticas de validação mostraram que o erro foi 5 % (MAPE) ou  $\pm 1,4$  mg/l (RMS) e que, ao considerar a distribuição de *Student*, chegou-se a uma estimativa do erro, em cada predição, de  $\pm 3,0$  mg/l, para um intervalo de confiança de 95 %.

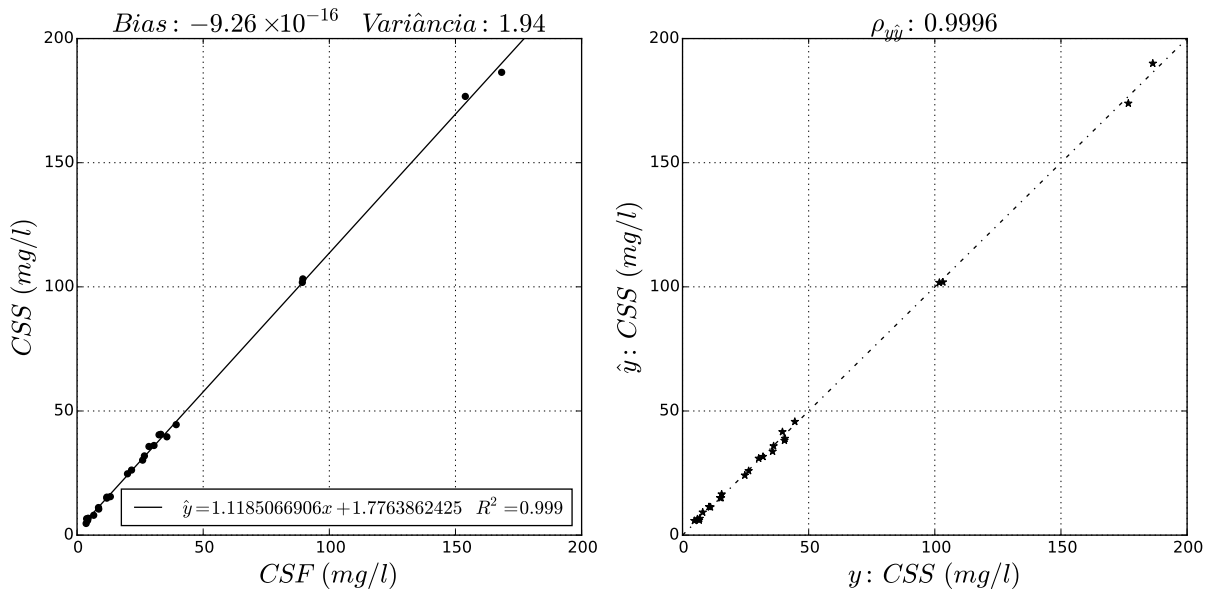


Figura 5.6: Gráfico da reta de calibração e gráfico da correlação do real com o predito.

### 5.3.2 Tratamento da série de precipitação

No caso da série de precipitação por localidade, o conjunto de dados horários, provenientes das estações telemétricas, foram convertidos para valores acumulados diários. A conversão foi a soma de dados horários referente a um determinado dia, obtendo como saída a precipitação acumulada deste dia. Bastava a presença de um único dado horário ausente para converter o dado diário correspondente em dado ausente também.

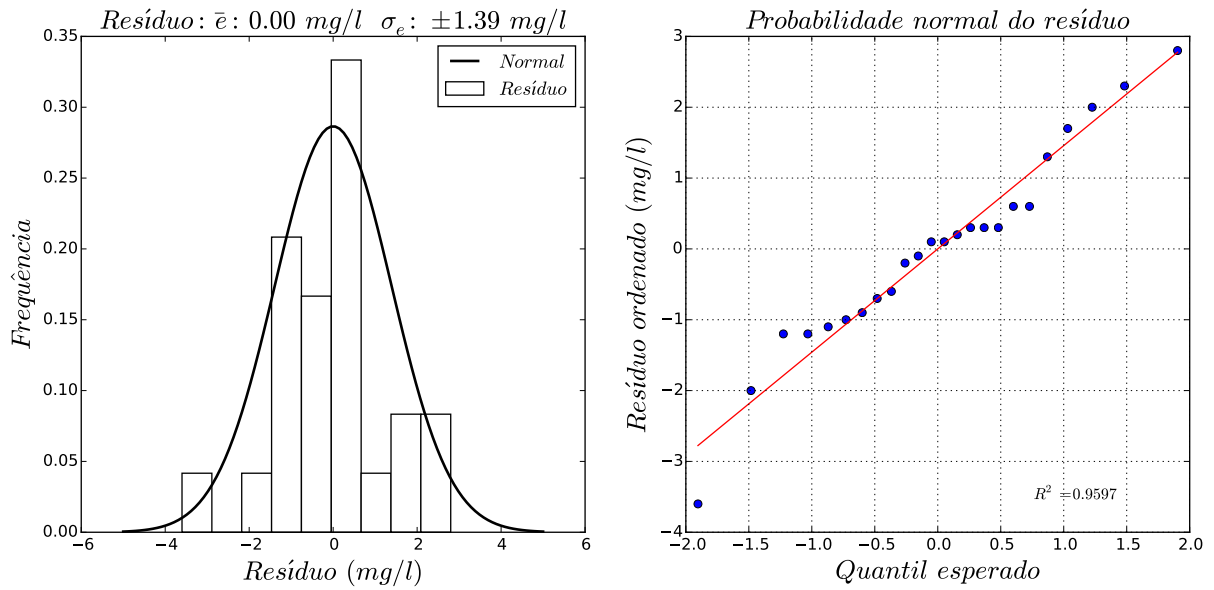


Figura 5.7: Histograma do resíduo e gráfico da probabilidade normal do resíduo.

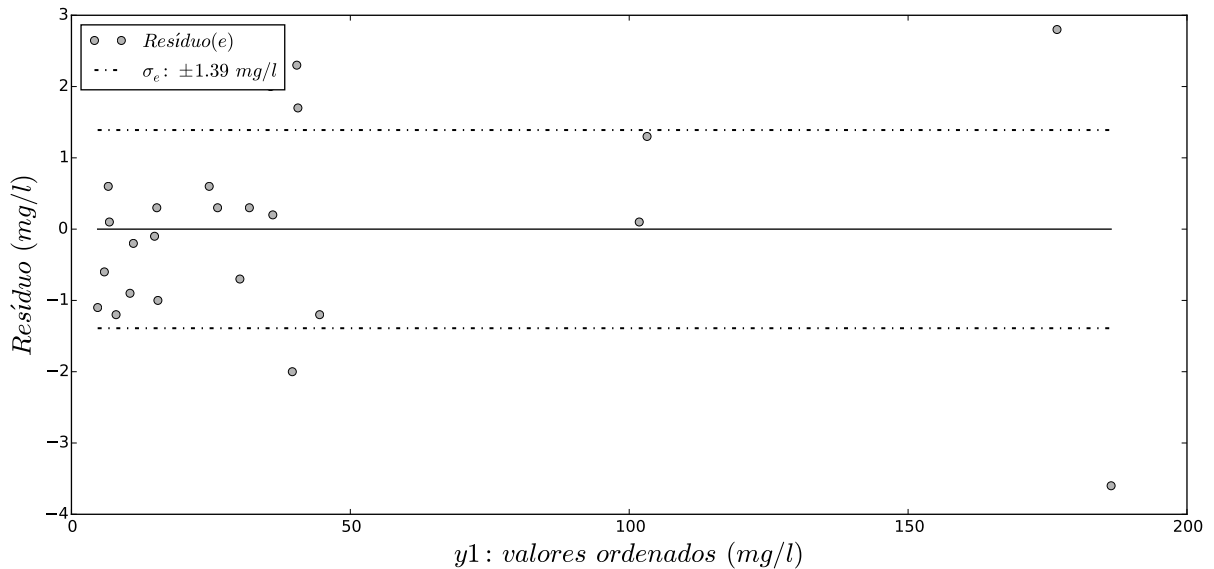


Figura 5.8: Gráfico da variação temporal do resíduo da saída predita.

### 5.3.3 Tratamento da série de vazão

A série de vazão bombeada pela UEL Sta. Cecília foi extraída dos boletins diários do IPDO-ONS. Dados espúrios mínimos e máximos foram tratados conforme as características do bombeamento da usina elevatória. A usina está equipada com quatro unidades de bombeamento, com capacidade de  $40 \pm 2 \text{ m}^3/\text{s}$  cada (FEEMA, 1985). Entretanto, em condição de cheia simultânea nos rios Piraí e Paraíba do Sul, o que é comum, o bombeamento é suspenso e toda vazão afluyente é vertida para jusante (ONS, 2013). A suspensão do bombeamento é decorrente do fato de que as condições de cheia, no rio Piraí, são sempre mais críticas que as do rio Paraíba do

Tabela 5.4: Variáveis utilizadas no cálculo da vazão natural para 2015 e 2016.  $Q_a$  é vazão média diária afluente ao reservatório.  $Q_d$  é vazão média diária defluente ao reservatório.  $Q_N$  é a vazão natural calculada

Início:	20/04/2014	
Fim:	31/12/2014	
Frequência:	Diária	
N:	255	
Fonte:	ONS	
Variáveis	tipo	Localidade
x1:	$Q_a$	UHE Paraibuna
x2:	$Q_d$	UHE Paraibuna
x3:	$Q_a$	UHE Sta. Branca
x4:	$Q_d$	UHE Sta. Branca
x5:	$Q_a$	UHE Jaguari
x6:	$Q_d$	UHE Jaguari
x7:	$Q_a$	UHE Funil
x8:	$Q_d$	UHE Funil
x9:	$Q_a$	UHE Sta. Cecília
y1:	$Q_N$	UHE Sta. Cecília

Sul. Acionadas as quatro bombas, a usina adquire capacidade máxima de  $160 \pm 8$  m<sup>3</sup>/s, logo, registros superiores foram convertidos para  $160 \pm 8$  m<sup>3</sup>/s.

A série de vazão natural diária ( $y1:Q_N$ ), para o posto n<sup>o</sup> 125, entre os anos de 1931 e 2014, foi extraída da revisão de vazões do ONS (2015). Entretanto, para os anos de 2015 e 2016, este parâmetro precisou ser estimado. O primeiro passo foi obter, a partir dos boletins diários do IPDO-ONS, as vazões diárias, em diferentes pontos da bacia, a montante da UEL Sta. Cecília (Tabela 5.4). O conjunto de treinamento compreendeu o período entre 20/04/2014 e 31/12/2014, uma vez que esse período dispõe tanto de dados do posto n<sup>o</sup> 125 como dados oriundos do IPDO-ONS. Em posse desses dados, estimou-se, pelo balanço de entradas e saídas, o quanto de água entrou no rio Paraíba do Sul naquele dia ( $\hat{y}1$ ) (Tabela 5.5 e Figura 5.9). Depois, foram incorporados os efeitos da evaporação nos reservatórios e das captações dos usuários através do *bias* do  $\hat{y}1$  (Tabela 5.5). Os efeitos da retenção nos reservatórios, e do tempo, gasto no percurso até o posto de controle em Sta. Cecília, foram incorporados no ajuste dos modelos de média móvel ( $\hat{y}2$  e  $\hat{y}3$ ) (Tabela 5.5).

O modelo simplificado do balanço hídrico ( $\hat{y}1$ ) apresentou correlação positiva significativa, mostrando que as estimativas do modelo  $\hat{y}1$  se aproximaram das obtidas pela revisão de vazões do ONS ( $y1$ ) (Tabela 5.6). No documento que acompanha esta revisão, não constam detalhes sobre a metodologia adotada no cálculo da vazão

Tabela 5.5: Modelos para vazão natural para o período de 2015 e 2016.

Modelos $Q_N$	
$\hat{y}1$ :	$x1 + (x3 - x2) + x5 + (x7 - x6 - x4) + (x9 - x8)$
Bias:	-6,7540
Variância:	1.093,65
$\hat{y}2$ :	Modelo de média móvel da $\hat{y}1$
Nº de dias:	5 dias
Bias:	-6,5079
Variância:	249,28
$\hat{y}3$ :	Modelo de média móvel exponencial da $\hat{y}1$
$\alpha$ :	0,3759
Bias:	-6,6674
Variância:	209,39



Figura 5.9: Série temporal da vazão natural do posto  $n^\circ$  125 e do modelo  $\hat{y}1$  balanço hídrico diário do Rio Paraíba do Sul a montante de UEL Santa Cecília.

natural, omitindo, inclusive, os valores adotados referentes à evaporação, à infiltração e à captação. Restou incorporar todos esses efeitos no modelo, como uma correção, adicionando o valor do *bias* (Tabela 5.5). Ao comparar a série do posto de controle ( $y1$ ) e o modelo  $\hat{y}1$ , foi possível perceber que a série do  $y1$  é mais suavizada do que a série estimada pelo modelo  $\hat{y}1$  e que os picos dos eventos de  $y1$  têm atraso de, aproximadamente, um dia. Este padrão sugere que o ONS deve ter aplicado um modelo de média móvel, parecido com o modelo aplicado para médias mensais (ONS, 2015). Estas características também puderam ser percebidas na autocorrelação, onde os eventos, em  $y1$ , apresentaram maior dependência dos dias anteriores, e na correlação cruzada, onde a máxima correlação ocorreu quase um dia

Tabela 5.6: Avaliação dos modelos para cálculo da vazão natural do posto 125 em Sta. Cecília, onde MM é média móvel aritmética e MME é a média móvel exponencial (em negrito o modelo selecionado).

Avaliação	$\hat{y}1$	$\hat{y}2$ : MM( $\hat{y}1$ )	$\hat{y}3$ : MME( $\hat{y}1$ )
RMS	33,75	17,08	<b>15,93</b>
MAPE	0,19	0,10	<b>0,09</b>
R <sup>2</sup>	-	0,69	<b>0,73</b>
$\rho_{y\hat{y}}$	0,7215	0,9011	<b>0,9099</b>
Intervalo de confiança			
$t_{95,254}$ :			1,960
$\varepsilon$ :			<b>±30</b>

antes (Figura 5.10 e Figura 5.11).

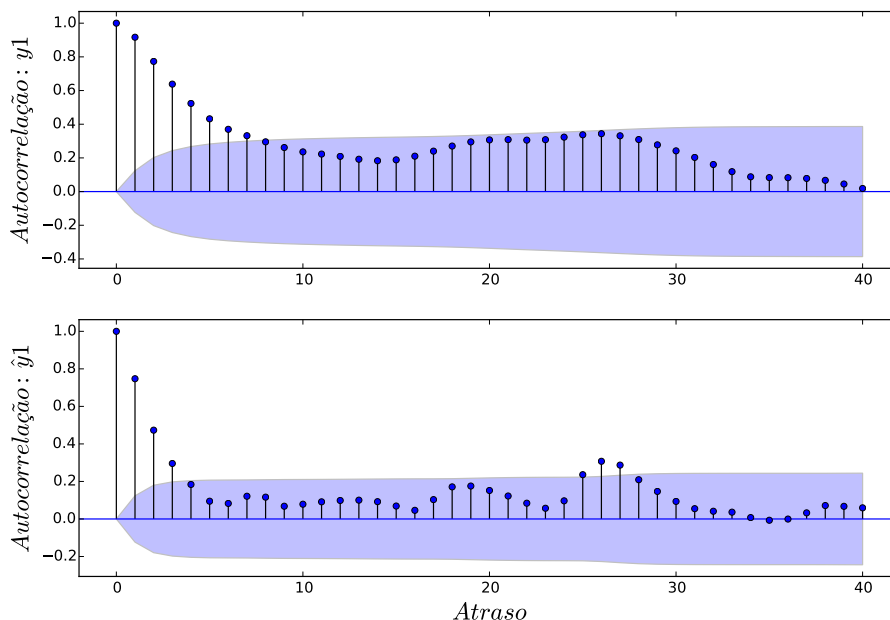


Figura 5.10: Autocorrelação da série do posto  $n^\circ$  125 ( $y1$ ) e do modelo  $\hat{y}1$ .

A modelagem da média móvel seguiu duas abordagens. A primeira foi aplicar uma média móvel em cada reservatório, usando os atrasos sugeridos no documento do ONS, e, depois, introduzir o resultado no modelo  $\hat{y}1$ . A segunda abordagem foi aplicar a média móvel diretamente na série gerada pelo modelo  $\hat{y}1$ . Além dos valores de atraso sugeridos pelo ONS, valores entre 1 e 15 dias foram testados para ambas as abordagens. Os resultados da segunda abordagem apresentaram melhor correlação com  $y1$ , onde a média móvel, com atraso de 5 dias, foi o melhor modelo entre todos dessa abordagem.

Uma segunda técnica, a média móvel exponencial, também foi ajustada, seguindo



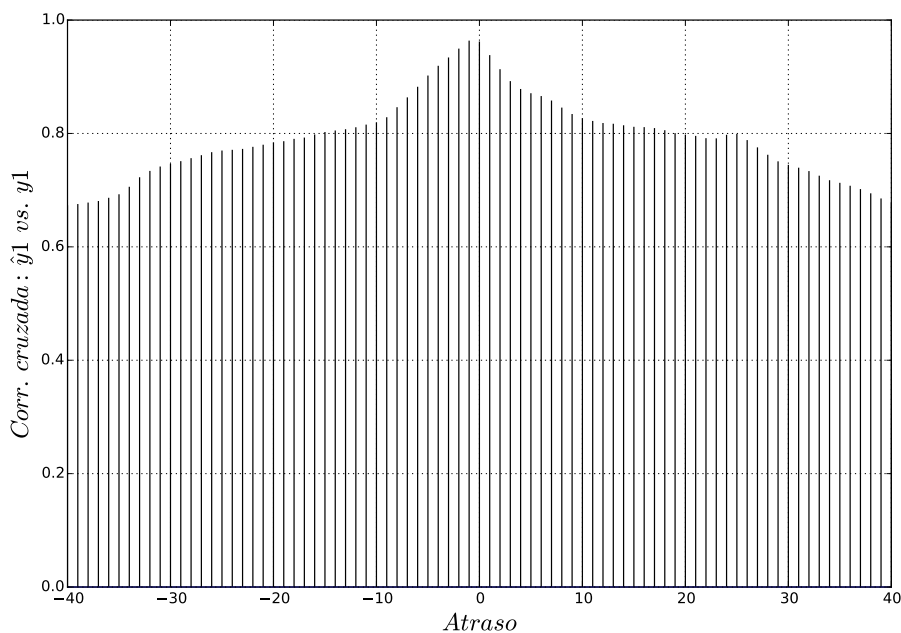


Figura 5.11: Correlação cruzada entre o modelo  $\hat{y}_1$  e a série do posto  $n^\circ$  125 ( $y_1$ ).

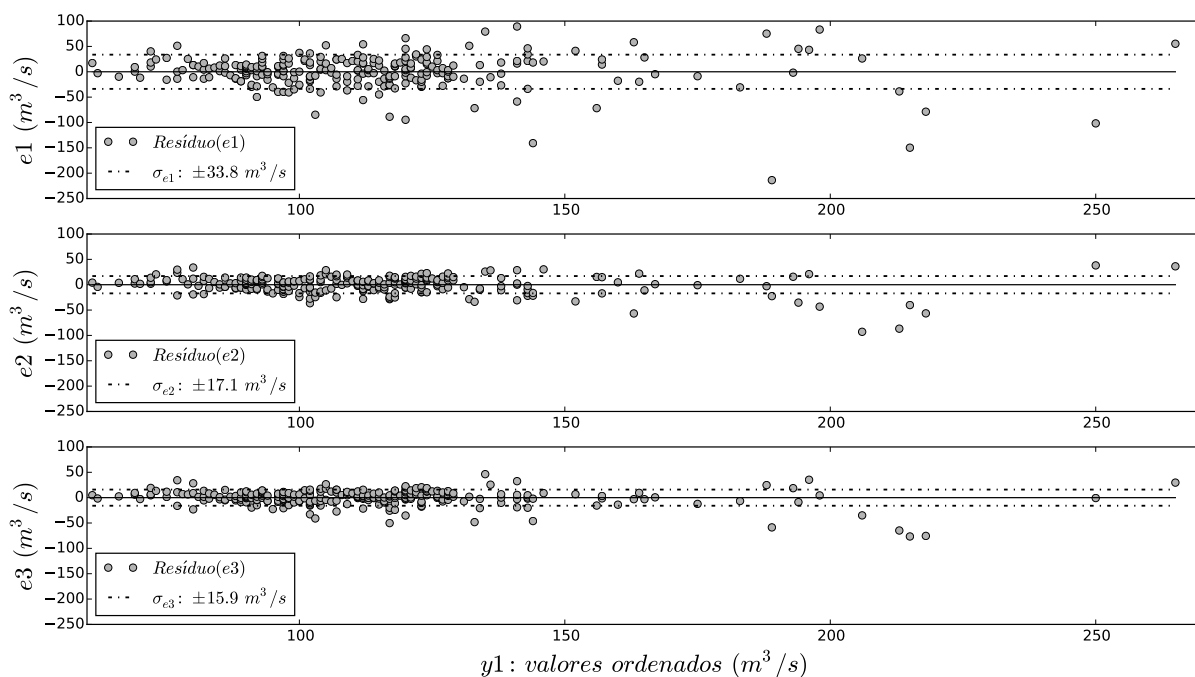


Figura 5.12: Grafico do resíduo dos modelos  $\hat{y}_1$ ,  $\hat{y}_2$  e  $\hat{y}_3$ .

a mesma abordagem que a primeira. Neste caso, o modelo com  $\alpha$  de 0,37 apresentou a melhor correlação com  $y_1$  (Figura 5.14). Este modelo se ajustou com o atraso da série  $y_1$ . Na avaliação geral (MAPE, RMS e  $R^2$ ), este modelo foi o que apresentou melhor desempenho, se comparado aos demais, sendo este o modelo selecionado para a estimação da vazão natural no posto da UEL Sta. Cecília, entre 2015 e 2016. Futuramente, esta série estimada pelo modelo será substituída pela série consistida e publicada pelo ONS.



Figura 5.13: Série temporal da vazão natural do posto  $n^\circ$  125 e do modelo de média móvel exponencial (MME)  $\hat{y}_2$ .

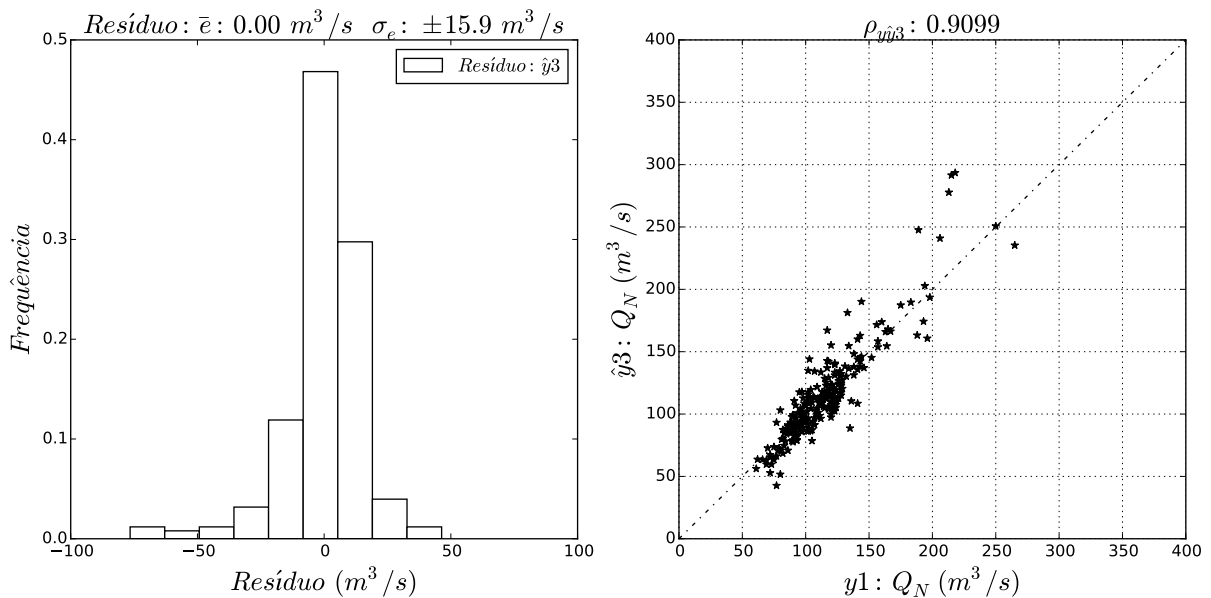


Figura 5.14: Histograma do resíduo do modelo  $\hat{y}_3$  e gráfico de correlação entre o modelo selecionado  $\hat{y}_3$  e a série do posto  $n^\circ$  125 ( $y_1$ ).

## 5.4 Modelo de imputação de dados de CSS

Ao finalizar o tratamento dos dados, foi possível reunir quatro variáveis de explicadoras e uma variável de saída (Tabela 5.7). O conjunto de dados abrange o período de 1986 a 2016, onde o período melhor amostrado compreende os anos 2014/15 e 2015/16 (Figura 5.16, Figura 5.17, Figura 5.18, Figura 5.19). Em termos de distribuição de dados de CSS existe uma diferença marcante entre as estações seca e chuvosa (Figura 5.20).

Para o período de 15/04/2014 a 14/04/2016, que abrange um ano seco, seguido

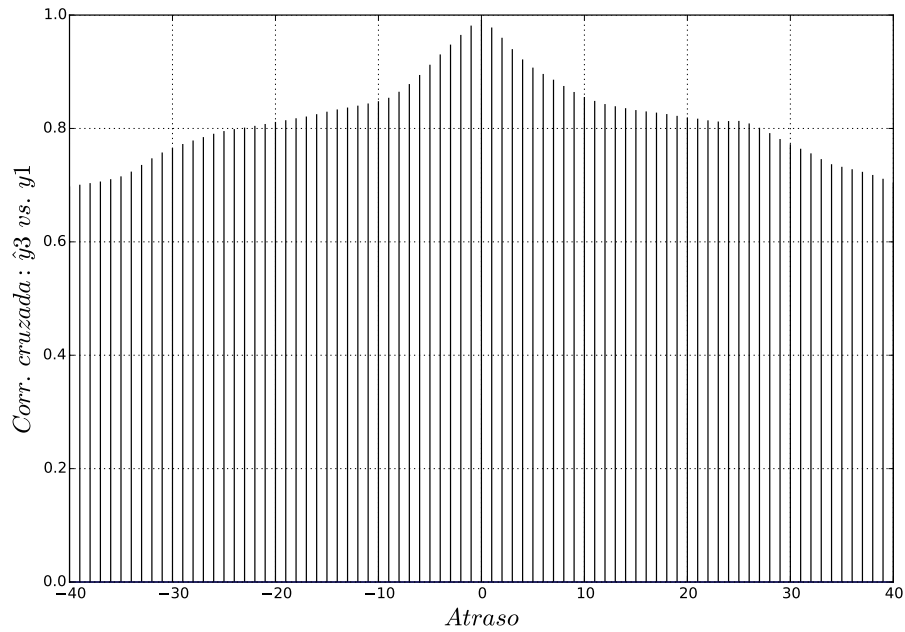


Figura 5.15: Correlação cruzada entre o modelo  $\hat{y}_3$  e a série do posto  $n^\circ$  125 ( $y_1$ ).

de um ano típico, foram coletadas 349 amostras, das quais, 66 ocorreram na estação seca (maio a outubro) e 283, na estação chuvosa (novembro a abril) (Figura 5.18 e Figura 5.19). A maior parte dos dados ausentes (78 %) se concentraram na estação seca.

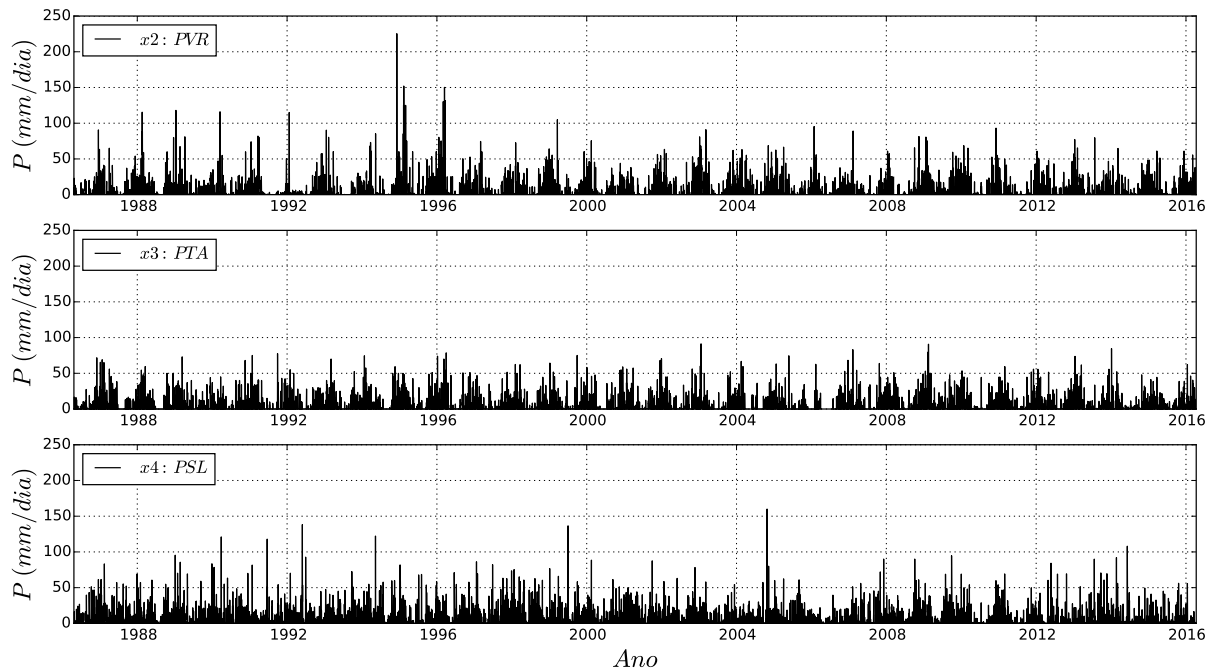


Figura 5.16: Série temporal de precipitação diária acumulada das localidades de São Luiz de Paraitinga (PSL), Taubaté (PTA) e Volta de Redonda (PVR).

A curva-chave de sedimento foi baseada no modelo logarítmico (Equação 4.4). O

Tabela 5.7: Variáveis selecionadas para modelagem do estimador da concentração sólidos suspensos diários na est. 01. NI: não informado.

Série completa					
Início:	23/04/1986				
Fim:	14/04/2016				
Frequência:	Diária				
Registro total:	10.950				
Descritor	$Q_N$ m <sup>3</sup> /s	PVR mm/dia	PTA mm/dia	PSL mm/dia	CSS mg/l
Registros ausentes	10.948	10.885	10.800	10.945	559
Registros ausentes	2	65	150	5	10.391
Média	277	3,8	3,6	4,5	39
Desv. Padrão	±197	±10,6	±9,1	±10,7	±45
Mínimo	36	0,0	0,0	0,0	2
Percentil 25 %	145	0,0	0,0	0,0	13
Mediana	212	0,0	0,0	0,0	22
Percentil 75 %	347	1,5	1,6	3,5	44
Máximo	2.110	225,3	91,2	160,0	373
Incerteza	±31	NI	NI	NI	±7

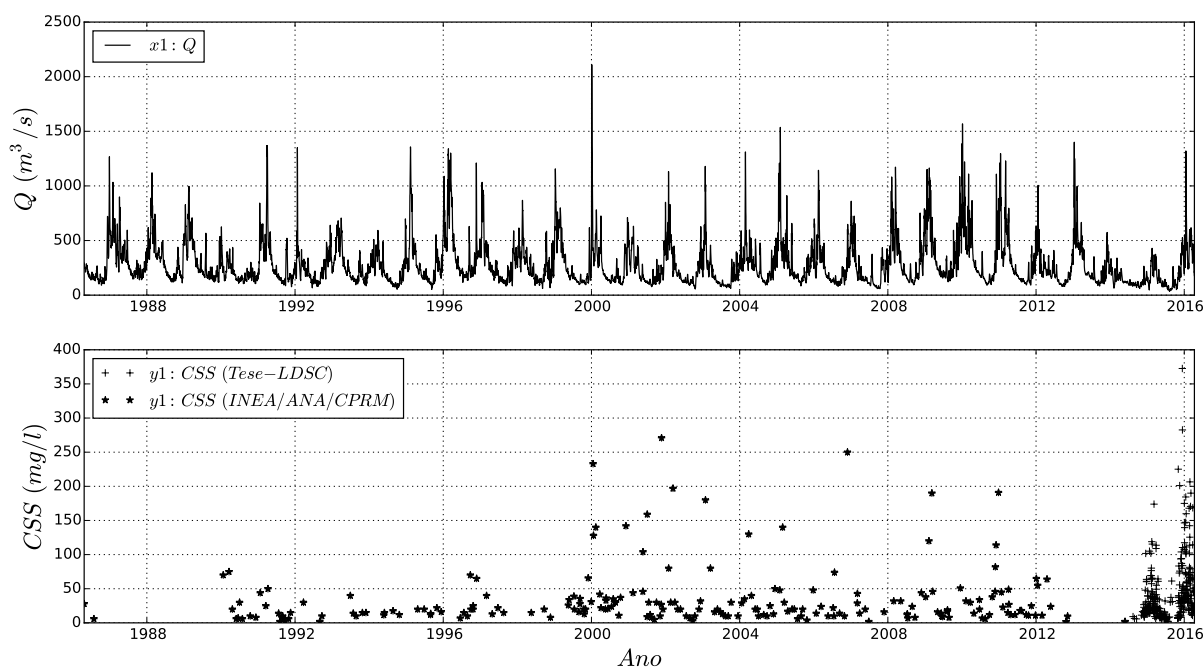


Figura 5.17: Série temporal da vazão natural ( $Q_N$ ) e da concentração de sólidos suspensos (CSS).

método de ajuste dos parâmetros foi o MMQ, após transformação logarítmica das variáveis CSS e Q.

Apesar do baixo desempenho, o modelo de curva-chave de sedimento foi melhor na estimação de concentrações mais baixas (<50 mg/l) (Figura 5.24), refletindo em

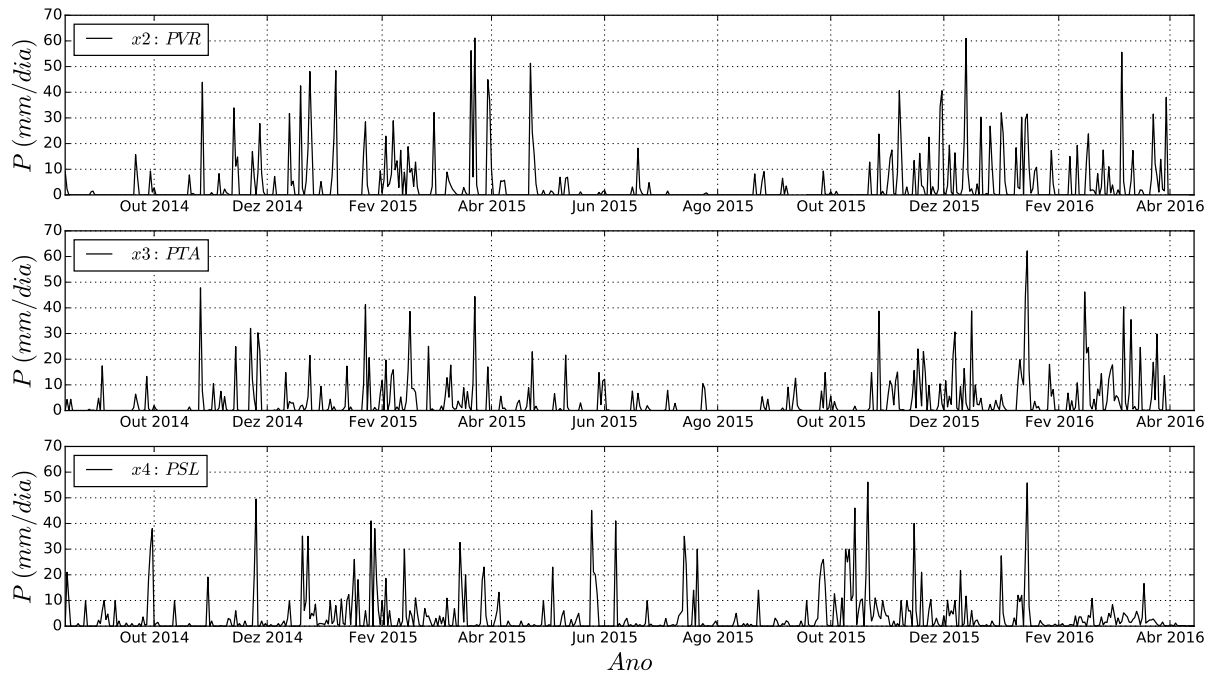


Figura 5.18: Detalhamento do período entre 15/04/14 e 14/04/16 da série temporal de precipitação diária acumulada das localidades de São Luiz de Paraitinga (PSL), Taubaté (PTA) e Volta de Redonda (VR).

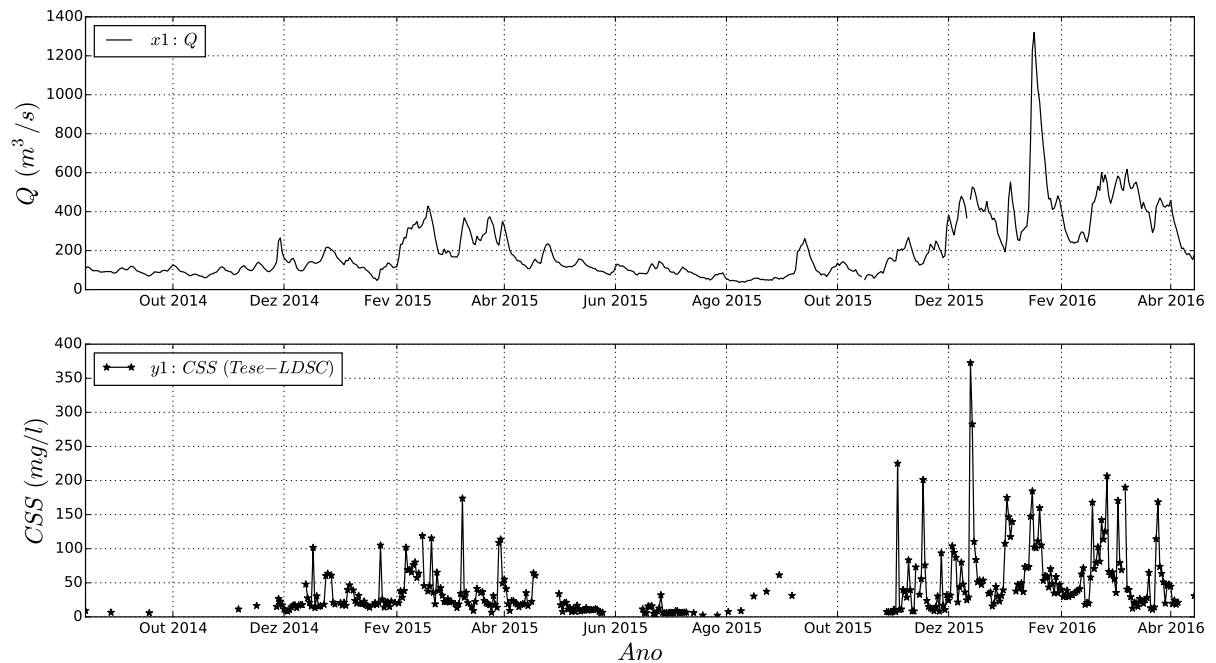


Figura 5.19: Detalhamento do período entre 15/04/14 e 14/04/16 da série temporal da vazão natural ( $Q_N$ ) e da concentração de sólidos suspensos (CSS).

uma melhor avaliação no  $R_{log}^2$  (Tabela 5.8).

No geral, a avaliação do modelo não foi satisfatória, mas em estudos de curva-chave de sedimento aplicado a sólidos suspensos, isso acontece com certa frequência, porque a correlação da  $Q$  com a CSS é de redundância, uma vez que ambas são efeitos

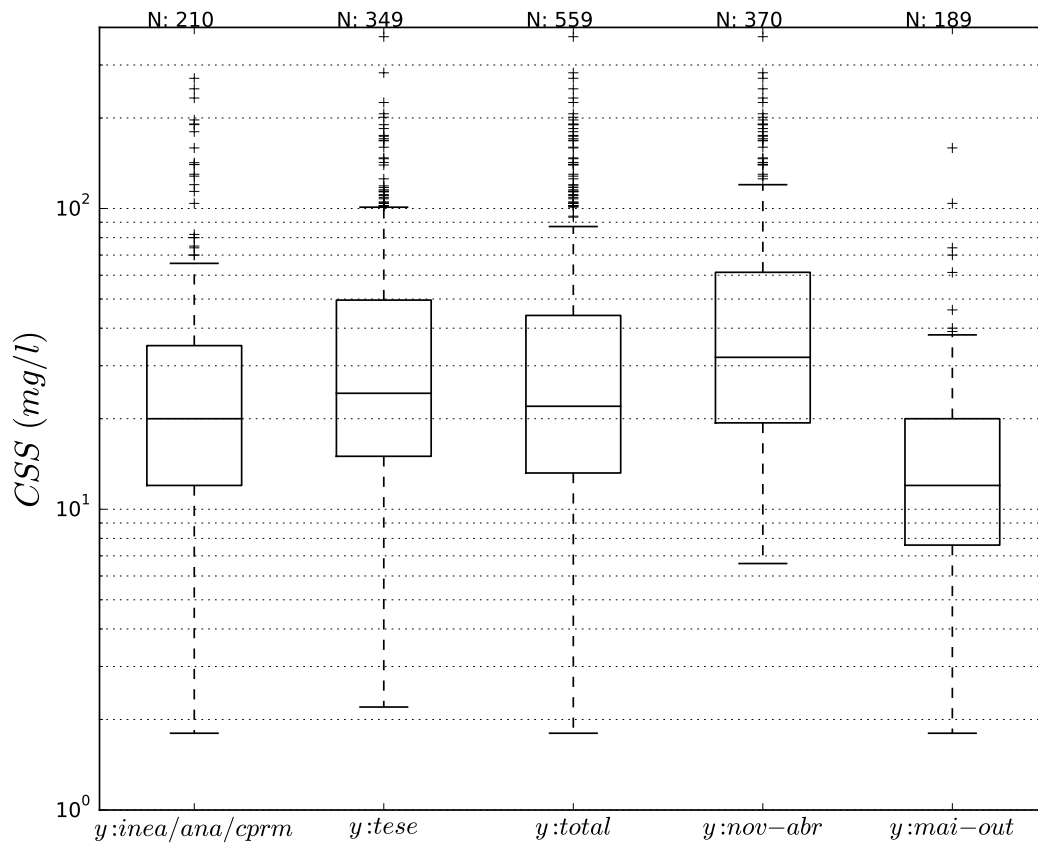


Figura 5.20: Diagrama de caixa comparando os registros dos banco de dados (INEA/ANA/CPRM), coletados durante a tese, total e estação chuvosa e seca.

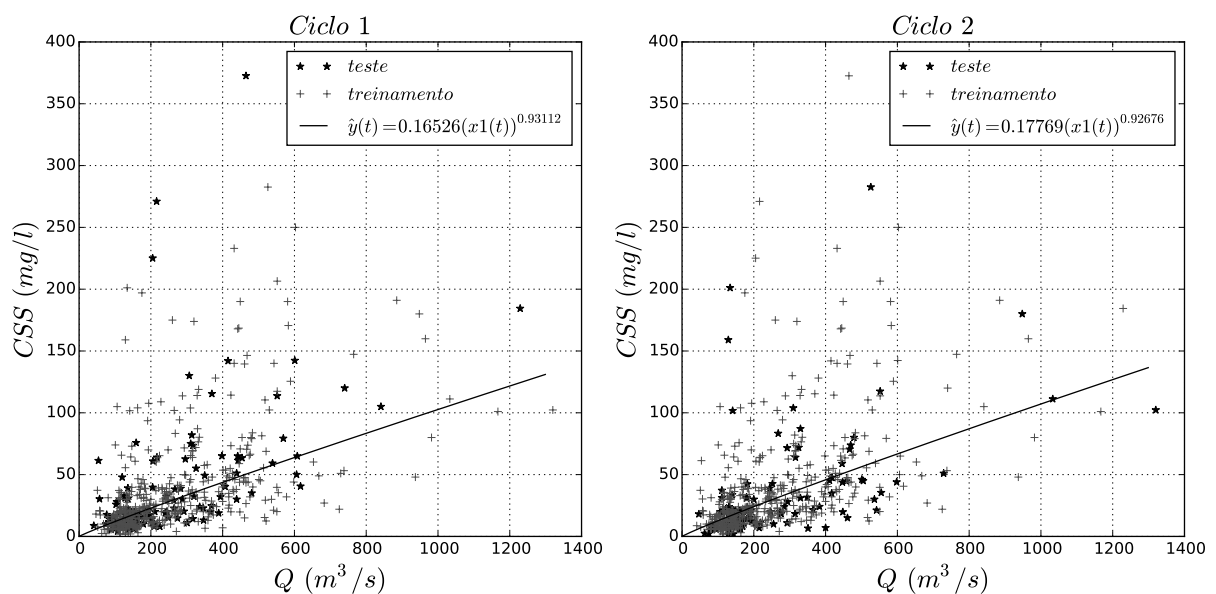


Figura 5.21: Primeiro e segundo ciclo da modelagem da curva chave de sedimento.

de causas em comum. Isso ocorre porque a  $Q$  obteve uma correlação maior do que um parâmetro causal, como a precipitação, pois a  $Q$  é expressão não apenas de uma causa em comum, mas de várias. Todavia, não é uma relação de compromisso.

Tabela 5.8: Resultado dos ciclos da validação cruzada do modelo de curva-chave de sedimento.

CCS : Q	1º ciclo	2º ciclo	3º ciclo	4º ciclo	5º ciclo	Avaliação
EMQ	1771,28	1307,78	2009,11	1632,41	1194,61	1583,39
RMS	42,09	36,16	44,82	40,4	34,56	39,79
MAE	22,19	21,47	23,78	17,2	18,46	20,62
MAPE	0,71	0,71	0,72	0,57	0,61	0,66
$R^2_{log}$	0,39	0,38	0,32	0,32	0,42	0,37
$R^2$	0,21	0,23	0,07	0,21	0,33	0,21

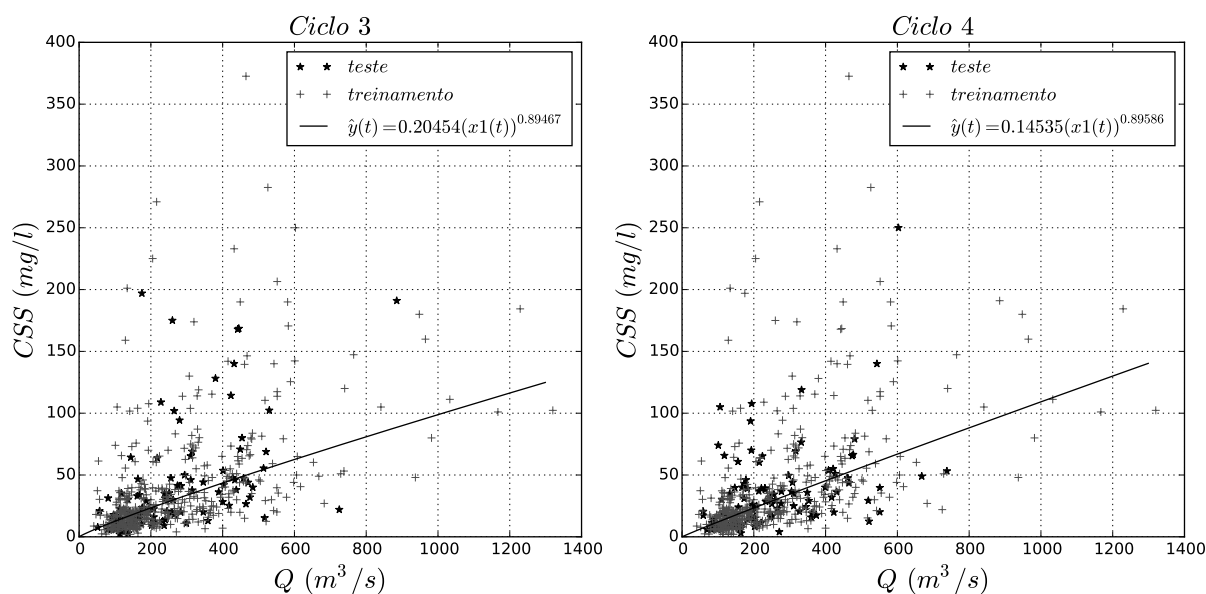


Figura 5.22: Terceiro e quarto ciclo da modelagem da curva chave de sedimento.

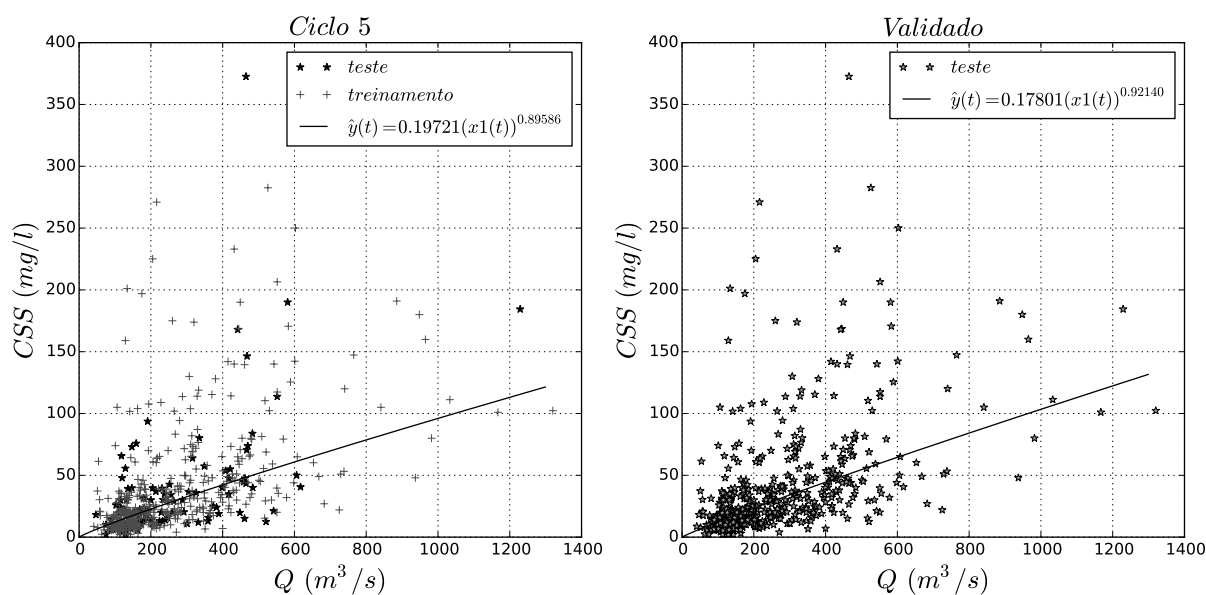


Figura 5.23: Quinto ciclo e modelo final da curva chave de sedimento.

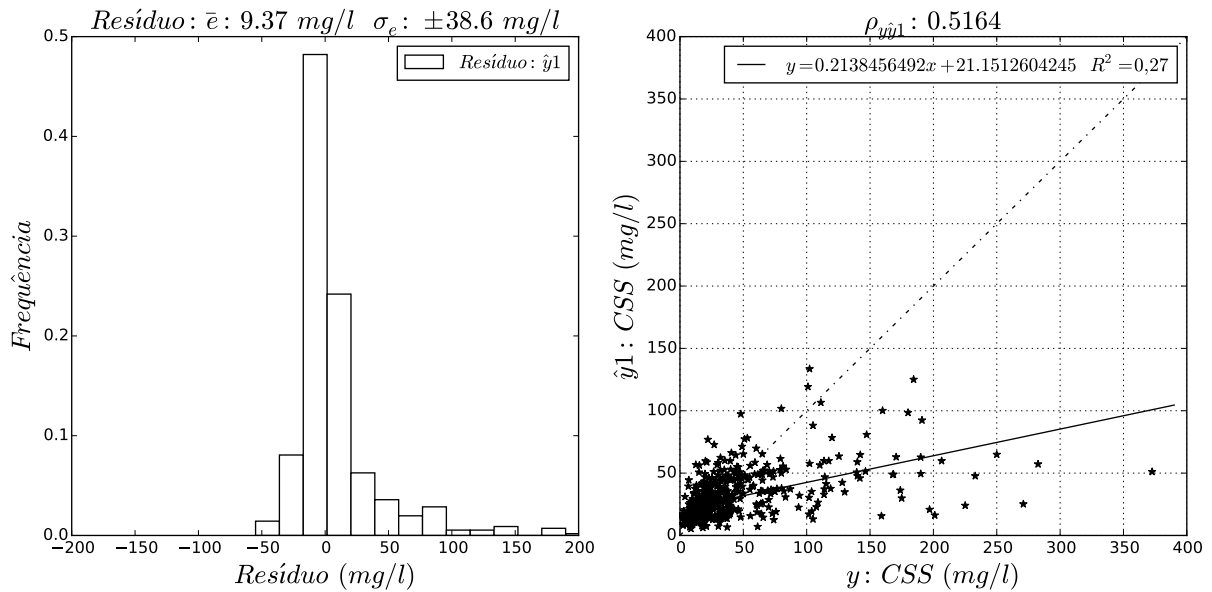


Figura 5.24: Distribuição do resíduo e gráfico de correlação entre o real e o predito referente ao modelo de curva chave de sedimento

Outros parâmetros causais podem ter efeitos adversos para CSS e  $Q$ , como é o caso da presença de barragens regularizando a vazão. Enquanto que a vazão natural pode ser resgatada por modelo abastecido com séries de vazões naturais medidas nos tributários e artificiais medidas na operação das barragens, a CSS natural é desconhecida. Os dados de CSS, usados nesse estudo, não foram corrigidos dos efeitos de retenção e diluição, que ocorreram, principalmente, no reservatório de Funil. A CSS também é mais sensível aos diferentes usos do solo, no tempo e espaço, do que a  $Q$ . Como os dados de CSS e  $Q$  foram diários, os efeitos de histerese da passagem de uma cheia não puderam ser removidos, refletindo na dispersão dos dados extremos.

## 5.5 Estimativas das descargas anuais de sólidos em suspensão bombeadas pela UEL Sta. Cecília

As estimativas da descarga anual de sólidos suspensos ( $Q_{ss}$ ) para o ano seco e para o ano típico utilizaram, como dado de entrada, a série temporal de CSS coletada, completada com dados imputados pelo modelo CCS, e a série temporal da vazão bombeada pela UEL Sta. Cecília disponibilizada pelo ONS (Figura 5.26). Em termos de média mensal, a estação de alta concentração de sólidos suspensos dura cinco meses, iniciando-se em dezembro e terminando em abril (Figura 5.27). No ano historicamente seco, entre 15/04/2014 e 14/04/2015, o  $Q_{ss}$  foi  $72.701 \pm 5.402 \text{ t/ano}$ .



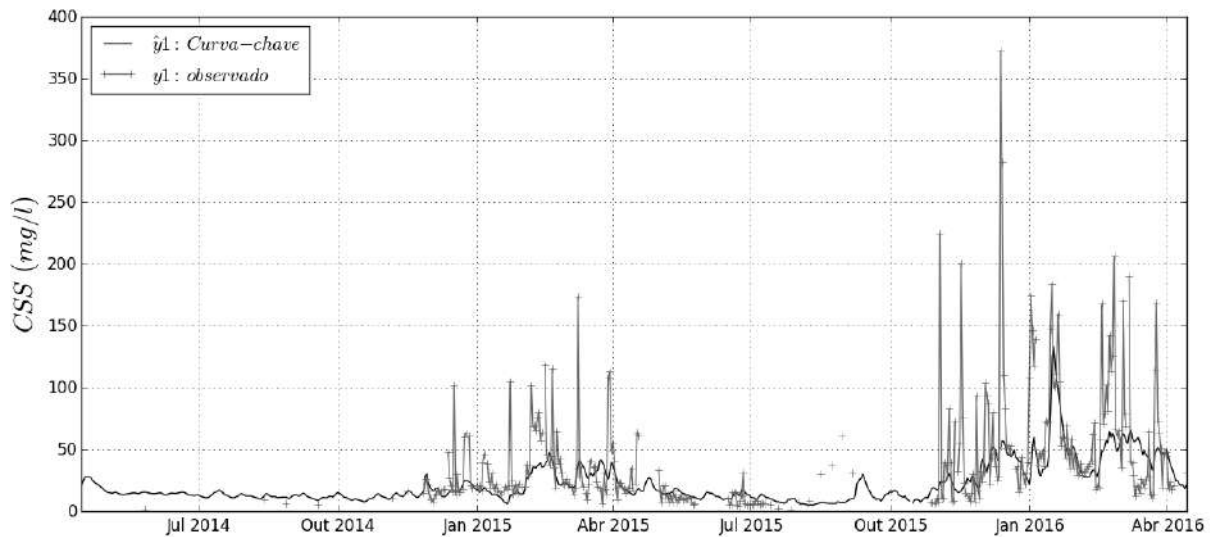


Figura 5.25: Comparação das saídas do modelo CCS e dos dados medidos entre o período de 23/04/14 a 14/04/16.

No ano típico, entre 15/04/2015 e 14/04/2016, a  $Q_{ss}$  foi de  $128.634 \pm 3.877$  t/ano. Durante a ano seco, o  $Q_{ss}$  sofreu uma queda de 43 %.

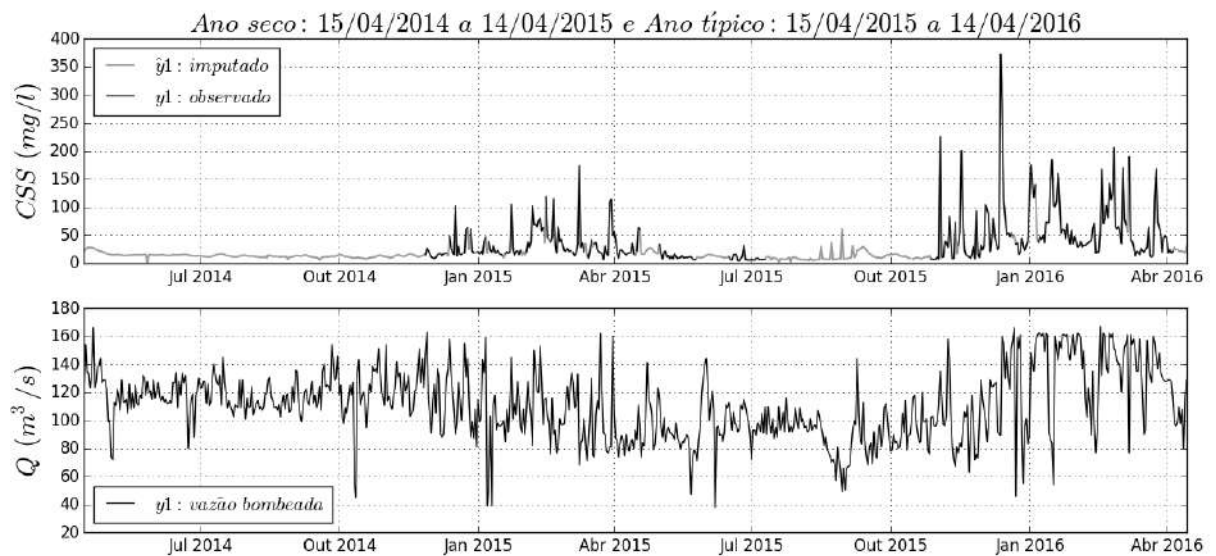


Figura 5.26: Série temporal da CSS e  $Q_{bomb}$  utilizada no cálculo da descarga anual de sólidos suspensos bombeado pelo UEL Sta. Cecília.

## 5.6 Discussão

Os resultados obtidos, neste capítulo, divergiu das estimativas, até então, apresentadas na literatura (Tabela 5.9). No estudo do BIRD-MPO/SEPURB/PQA-ABC-PNUD (1997), a estimativa de 1.400.000 t/ano foi de uma ordem de grandeza superior ao observado no presente estudo. Esta estimativa diverge inclusive das esti-

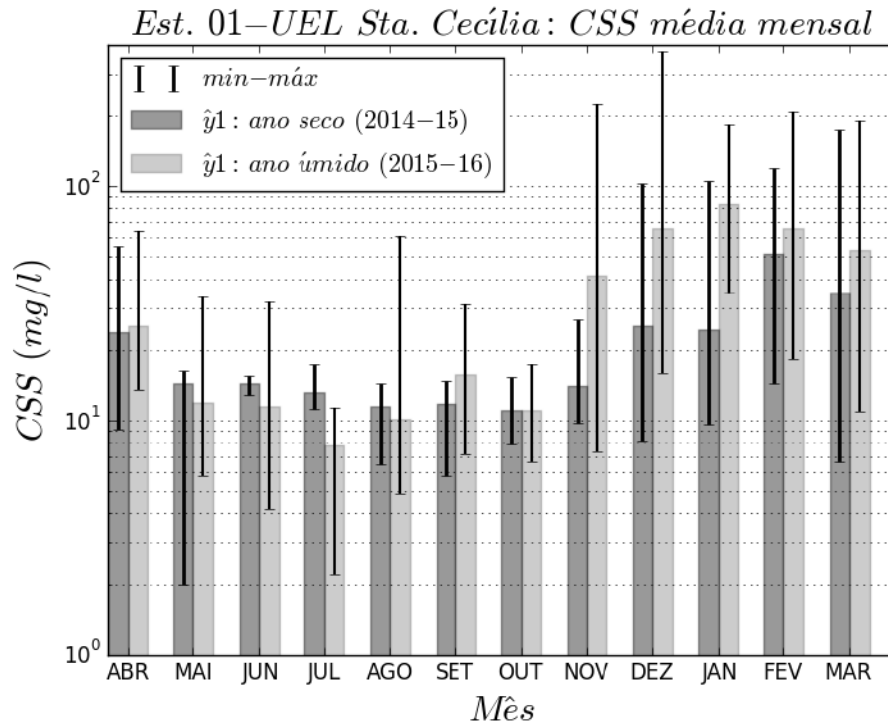


Figura 5.27: Gráfico em barra da CSS média mensal para o ano seco extremo (2014/15) e ano úmido típico (2015/16).

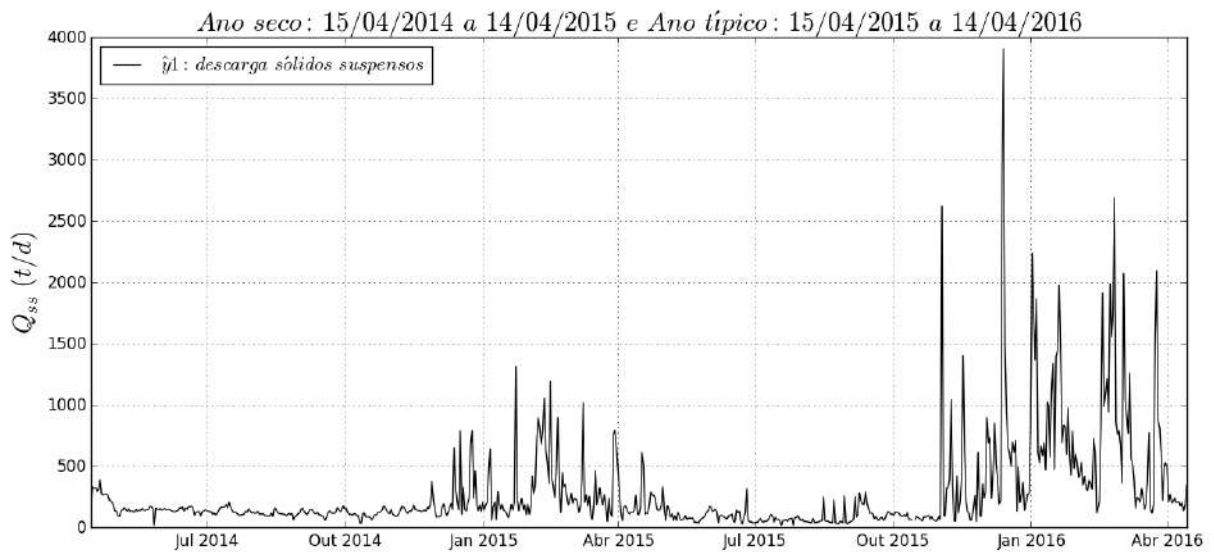


Figura 5.28: Série temporal da descarga de sólidos suspensos  $Q_{ss}$  bombeada pela UEL Sta. Cecília para o ano seco extremo (2014/15) e ano típico (2015/16).

mativas encontradas logo a montante (Volta redonda-RJ: 124.736 t/ano) e a jusante (Três Rios-RJ: 684.045 t/ano), no mesmo estudo.

A estimativa obtida por MOLISANI *et al.* (2006) foi mais de 3 vezes maior do que o estimado no presente estudo. No estudo desses autores, a estimativa média da concentração de sólidos suspenso média (118 mg/l) foi sobrestimada, divergindo dos dados coletados neste estudo.

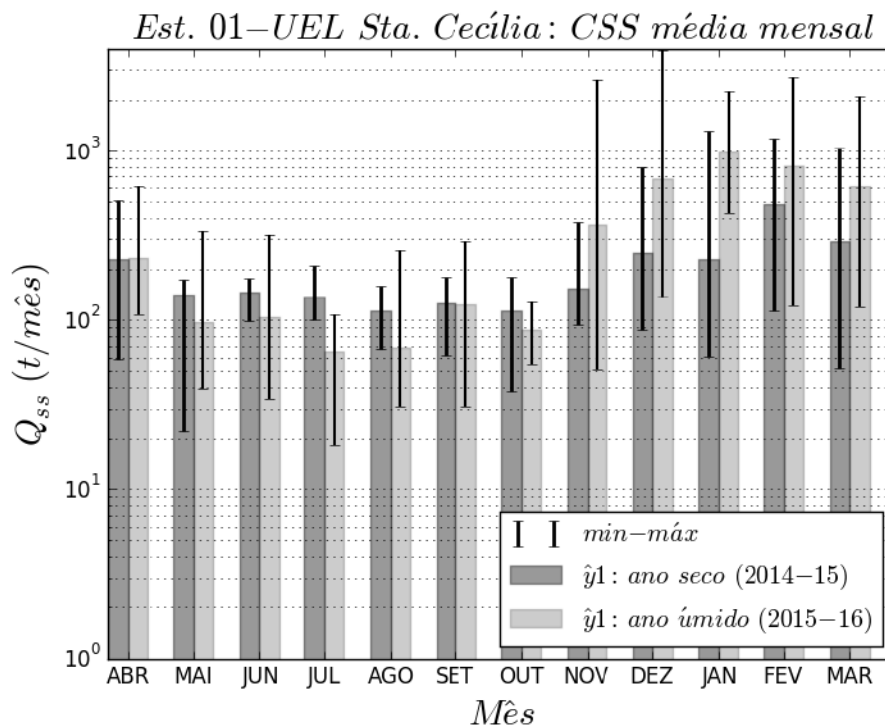


Figura 5.29: Gráfico em barra da  $Q_{ss}$  média mensal para o ano seco extremo (2014/15) e ano típico (2015/16).

As hidroelétricas são barreiras físicas para o sedimento transportado pelos rios. Neste sentido, o reservatório de Funil é o mais importante, uma vez que possui um grande volume e se localiza a jusante dos principais afluentes e próximo da UEL Sta. Cecília (Figura 3.1). Desse modo, grande parte da carga poluente e sedimentar da bacia de drenagem paulista acaba sendo depurada e sedimentada neste reservatório, onde frequentemente, ocorrem grandes florações de cianobactérias (Figura 5.31).

A UHE Funil dispõe ainda de uma válvula difusora, que, quando acionada, torna-se uma potencial fonte de sedimentos finos, uma vez que sua captação é próxima ao fundo da barragem. Na estiagem de 2014 e 2015, ocorreram testes operacionais<sup>4</sup>, motivados pela possibilidade da usina vir a ter que parar de operar suas unidades geradoras, devido às condições desfavoráveis de armazenamento do seu reservatório (Figura 5.32). Nessas condições excepcionais a válvula difusora seria o principal dispositivo de vertimento para a UHE Funil.

Devido ao efeito de retenção do reservatório de Funil, a descarga de sólidos suspensos na em UEL Sta. Cecília, incrementa-se, em grande parte, pela drenagem do trecho entre Funil e UEL Sta. Cecília. Após a barragem do Funil, o rio passa outra vez a sofrer diretamente os efeitos das atividades antrópicas, a partir do Município de Itatiaia. Deste ponto em diante, é severamente impactado, por receber toda a carga de esgotos domésticos sem tratamento, assim como efluentes líquidos de indústrias

<sup>4</sup><http://slideplayer.com.br/slide/2990779/>

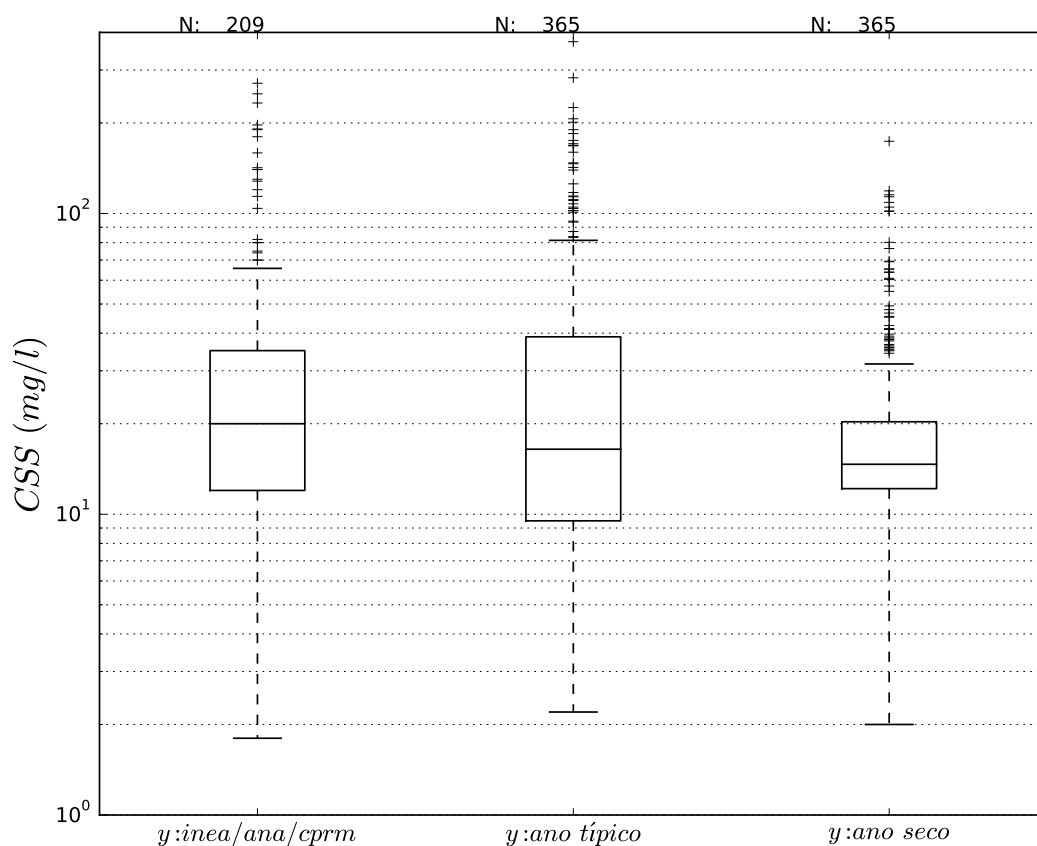


Figura 5.30: Diagrama em caixa comparando os anos seco e típico em relação ao resto do conjunto dos registros.



Figura 5.31: Afloramento de cianobactérias no reservatório de Funil. Foto tirada pela SUPMEP *apud*. ARAÚJO *et al.* (2012).

e de atividades agropecuárias, localizadas na bacia de drenagem (ARAÚJO *et al.*, 2012).

Entre a UHE Funil e UEL Sta. Cecília, os afluentes da margem esquerda são os principais contribuintes de sedimento para o rio Paraíba do Sul (ARAÚJO *et al.*, 2012). Dentre eles, destacam-se os rios Sesmarias, Barreiro de Baixo e Bananal (Figura 5.33). Este lado da margem foi, historicamente, mais desmatado e hoje apresenta processos erosivos avançados e loteamento precarizado.

Tabela 5.9: Comparação das estimativas de descarga de sólidos suspensos bombeados pela UEL Sta. Cecília obtidas pela BIRD-MPO/SEPURB/PQA-ABC-PNUD (1997), Molisani *et al* (2006) e tese (Simulado, seco e típico). NI: não informado. Simulado foi uma simulação usando os dados de CSS da ano típico (tese) e de Q do estudo de Molisani *et al* (2006).

	BIRD... (1997)	Molisani <i>et al.</i> (2006)	Ano seco 2014-15	Ano típico 2015-16
$\bar{Q}_{bomb}$ (m <sup>3</sup> /s):	NI	160	114	107
$Q_{ss}$ (t/ano):	1.400.000 <sup>(a)</sup>	584.000	72.701±5.402	128.634±3.877

<sup>(a)</sup> Posto código 58321000: posto sedimentológico do município de Barra do Piraí, logo a jusante do reservatório de Sta. Cecília, operada pela DNAEE (1989 - 1995).



Figura 5.32: Teste da válvula difusora na UHE Funil em 18/11/14 durante 3 horas (11:00 - 14:00). Seta branca apontado a saída do difusor. Foto tirada por Marcelo Roberto Rocha de Carvalho.

## 5.7 Conclusão

A descarga anual de sólidos suspensos bombeada pela UEL Sta. Cecília, para o reservatório, foi de 72.701±5.402 t, para um ano de seca histórica (15/04/2014 a 14/04/2015) e de 128.634±3.877 t, para um ano típico (15/04/2015 a 14/04/2016).



Figura 5.33: Região de morros desmatados e colonizado por pastagens, entre Rio Claro - RJ e Bananal - SP. Foto tirada pela SUPMEP *apud*. ARAÚJO *et al.* (2012).

# Capítulo 6

## Estimativa da eficiência de retenção de sólidos suspensos no sistema de múltiplos reservatórios da transposição

### 6.1 Introdução

Os impactos sociais, econômicos e ambientais devido à acumulação de sedimentos nos reservatórios, são reconhecidos como um grave problema de difícil remediação (ICOLD, 1989). O assoreamento de reservatórios aumenta o risco de eutrofização, por excesso de nutrientes e de toxicidade por microrganismos e/ou contaminantes (CRABILL *et al.*, 1999; SMITH *et al.*, 1999; AUDRY *et al.*, 2004). No contexto da geração de energia e de abastecimento, observa-se a diminuição da vida útil do reservatório, a vulnerabilidade às estiagens e o risco de danos às turbinas geradoras e bombas elevatórias (CARVALHO *et al.*, 2000). A jusante, a falta de aporte de sedimentos e nutrientes aumenta a erosão fluvial e costeira e reestrutura ecossistemas aquáticos, além de oferecer uma barreira física para espécies aquáticas migratórias (JOHN, 1996; BRANDT, 2000; SCHILT, 2007).

Em termos globais, estimativas apontam que 3 - 5 Gt de sedimentos são retidos por reservatórios anualmente (VÖRÖSMARTY *et al.*, 2003; SYVITSKI, 2003). A vida útil média dos reservatórios decresceu de 100 para 22 anos MAHMOOD (1987). O Brasil já possui muitos reservatórios total ou mesmo parcialmente assoreados. Porém, a falta de levantamentos sistemáticos dificulta precisar o grau de assoreamento (CARVALHO *et al.*, 2000). Segundo CARVALHO *et al.* (2000) existem pelo menos 48 reservatórios brasileiros total ou parcialmente assoreados.

A eficiência de retenção de sedimentos finos, em reservatórios, depende direta-

mente da velocidade de sedimentação dos sólidos suspensos e do período retido no reservatório (BRUNE, 1953; HEINEMANN, 1984; VERSTRAETEN e POESEN, 2000). A velocidade de sedimentação das partículas afluentes é controlada pela distribuição dos tamanhos das partículas, que são, predominantemente compostas por sedimentos finos, que podem ser controlados, por sua vez, por processos de floculação. Por outro lado, o período de retenção é influenciado pelas características da descarga sólida afluente e pelas características geométricas, estruturais e operacionais do próprio reservatório.

A despeito dos fatores causais, a eficiência de retenção de sedimentos finos, em um reservatório, pode ser obtida pela simples proporção entre as descargas de sólidos suspensos afluente e defluente (HEINEMANN, 1981). Entretanto, na maioria dos reservatórios, essa informação é desconhecida ou incompleta (VERSTRAETEN e POESEN, 2000). Por isso, muitos modelos empíricos foram propostos, relacionando a eficiência de retenção, previamente conhecida, com parâmetros mais facilmente encontrados, como dimensões do reservatório e descarga líquida afluente (JOTHI-PRAKASH e VAIBHAV, 2008).

A transposição de bacias Paraíba do Sul-Piraí-Guandu consiste de múltiplos reservatórios, para fins de abastecimento e de geração de energia elétrica, para a região metropolitana do Rio de Janeiro. O sistema constituído por cinco reservatórios, é abastecido, majoritariamente, por dois afluentes - os rios Paraíba do Sul e Piraí, e operado pela empresa Light.

Em termos de assoreamento, o reservatório de Santana é o mais impactado, porém a falta de dados oficiais atualizados impede uma estimativa precisa (FEEMA, 1985). Em uma reprodução do comunicado da Light da época, a Feema (1985) relatou que o assoreamento foi responsável pela perda de 50% do volume útil do reservatório de Santana (FEEMA, 1985). O estudo mais recente, conduzido por MOLISANI *et al.* (2006), estimou que, anualmente, 853.000 t de sedimentos ficam retidas no reservatório de Santana. Este estudo se baseou na modelagem empírica que usou como dados de entrada, as dimensões dos reservatórios, as descargas líquidas afluente e defluente, o relevo, o clima e os escassos dados de CSS. Esse mesmo estudo afirma, ainda, que cerca de 90% dos sedimentos transportados em suspensão, pelo rio Piraí e pelo bombeamento da UEL Santa Cecília, ficam retidos nos múltiplos reservatórios (MOLISANI *et al.*, 2006).

Estimativas do que efetivamente chega da transposição à bacia do Guandu foram investigadas nos estudos da BIRD-MPO/SEPURB/PQA-ABC-PNUD (1997) e do MOLISANI *et al.* (2006). No estudo de BIRD-MPO/SEPURB/PQA-ABC-PNUD (1997), foi estimado que chegaria pela transposição 322.000 t/ano, baseado em um conjunto de dados, cuja fonte é desconhecida, coletados entre 1969 e 1994. No estudo de MOLISANI *et al.* (2006), a partir de modelos empíricos de produção de sedimento



e sedimentação em reservatório, estimou-se uma transposição de  $270 \times 10^3 \text{t/ano}$ . Entretanto, ambos os estudos esbarram na escassez dos dados e na falta de clareza sobre as fontes utilizadas.

## 6.2 Objetivo

O objetivo desse capítulo foi estimar, a partir de dados observacionais coletados em um ano historicamente seco e em um ano com regime de chuvas típica, a descarga anual de sólidos suspensos que chega à bacia do Guandu pela TPPG, e a eficiência de retenção de sólidos suspensos do conjunto de reservatório formados por Santana, Vigário e Ponte Coberta.

## 6.3 Seleção e coleta de dados

### 6.3.1 Seleção das variáveis

Essa etapa envolveu 26 fontes de dados para o pré-processamento, que se encontra resumido da Tabela 6.1 e georreferenciado na Figura 6.1. A descrição das estações de coleta 1, 2, 3, 4, 5, 6 encontra-se no capítulo 4.

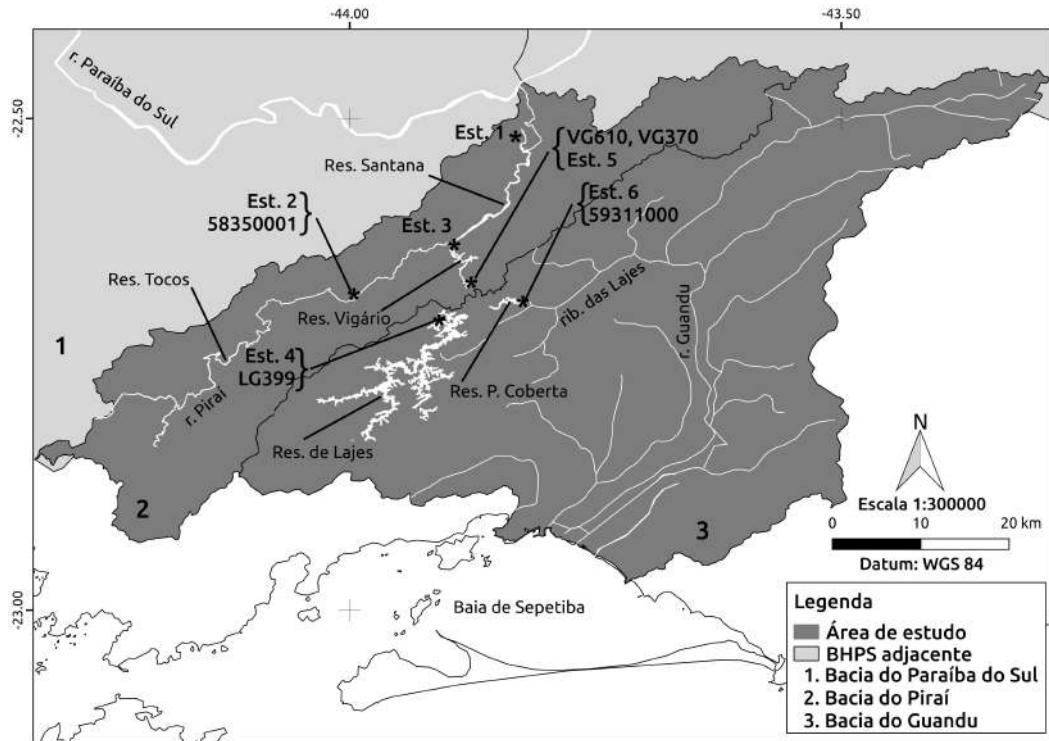


Figura 6.1: Mapa da área de estudo e localização das estações de coletas (Est. xx).

Tabela 6.1: Estações selecionadas e estação criada no presente estudo (LDSC). PI: rio Piraí; PP: jusante UHE Pereira Passos; RL: reservatório de Lajes; ST: tomada reservatório de Santana; SC: tomada UEL Santa Cecília; VG: defluência do reservatório de Vigário; T: turbidez.

Dado	Código	Início/Fim	$\Delta t^{(a)}$	Lat.	Lon.	Oper.	Fonte <sup>(c)</sup>
SC							
Q <sub>ss</sub>	1	2014/16	D	-22,5104	-43,8253	LDSC	I
GRA	1	2014/16	V	-22,5104	-43,8253	LDSC	I
Tocos							
Q <sub>a</sub>	201	2005/16	D	NI <sup>(b)</sup>	NI	LIGHT	II
Q <sub>d</sub>	317	2014/16	D	NI	NI	LIGHT	II
PI							
Nível	58350001	2005/16	V	-22,6567	-43,9500	LIGHT	III
Q	58350001	2005/16	V	-22,6567	-43,9500	LIGHT	III
CSS/F/V	2	2014/6	V	-22,6567	-43,9500	LDSC	I
GRA	2	2014/6	V	-22,6567	-43,9500	LDSC	I
ST							
Nível	NI	2014/16	D	NI	NI	ONS	II
CSS/F/V	3	2014/16	V	-22,6285	-43,8946	LDSC	I
GRA	3	2014/16	V	-22,6285	-43,8946	LDSC	I
RL							
CSS/F/V	4	2014/16	V	-22,6969	-43,9058	LDSC	I
CST	LG399	1990/13	V	-22,7051	-43,8927	INEA	IV
VG							
CSS/F/V	5	2014/16	V	-22,6798	-43,8741	LDSC	I
CST	VG610	1990/09	V	-22,6305	-43,8956	INEA	IV
CST	VG370	1990/13	V	-22,6799	-43,8755	INEA	IV
PP							
Nível	6	2014/16	15 min.	-22,6833	-43,8177	LDSC	I
Q <sub>d</sub>	59311000	2014/15	H	-22,6861	-43,8222	LIGHT	III
Q <sub>d</sub>	306	2014/16	D	NI	NI	LIGHT	II
T	6	2014/16	15 min.	-22,6833	-43,8177	LDSC	I
CSS/F/V	6	2014/16	V	-22,6833	-43,8177	LDSC	I
GRA	6	2014/16	V	-22,6833	-43,8177	LDSC	I

<sup>(a)</sup> Taxa de amostragem: D - diário, H - horário, V - variável.

<sup>(b)</sup> NI: Não informado.

<sup>(c)</sup> I: Presente estudo; II: IPDO-ONS e ANA; III: Hidroweb-ANA; IV: INEA.

CSS/F/V: Concentração de sólidos suspensos / fixos / voláteis.

GRA: Granulometria.

## 6.4 Materiais e Métodos

### 6.4.1 Cálculo de eficiência (ER) para imputação de dados faltantes na série de CSS

A TPPG dispõe de um conjunto de reservatórios, que podem reter sólidos suspensos. A eficiência de retenção (ER) é a proporção entre as descargas anuais de sólidos suspensos afluente e defluente, em um reservatório (VERSTRAETEN e POESEN, 2000):

$$ER = \frac{Q_{ssa} - Q_{ssd}}{Q_{ssa}} 100, \quad (6.1)$$

onde  $Q_{ssa}$  é a descarga anual de sólidos suspensos afluente (t/ano) e  $Q_{ssd}$  é a descarga anual de sólidos suspensos defluente (t/ano).

## 6.5 Pré-processamento

### 6.5.1 Série de vazão média diária

#### Rio Pirai

A série de vazão média diária do rio Pirai, na estação 2 ( $Q_2$ ), foi extraída da base de dados horários da estação fluviométrica 58350001 disponibilizada na página do Hidroweb . Os 33 registros ausentes, na série da Hidroweb, foram preenchidos com estimativas baseadas no cálculo da vazão artificial do posto n° 317, onde a vazão natural afluente ao reservatório de Tocos (posto n° 201) foi extraída dos boletins diários do IPDO-ONS. Nesse cálculo, quando o resultado era zero, considerou-se um incremento de 1 m<sup>3</sup>/s, referente às potenciais contribuições a jusante da barragem de Tocos (Figura 6.2). De fato, nas 22 visitas à estação 2, a vazão observada nunca foi nula.

#### Tomada da UEL Vigário

A série de vazão média diária bombeada pela UEL Vigário ( $Q_3$ ), foi extraída do banco de dados do Hidroweb, que disponibilizou dados para o período de 13/06/14 a 14/04/16. A vazão bombeada pela UEL Vigário foi, em média, 11 m<sup>3</sup>/s menor do que a vazão afluente total, que corresponde à soma da vazão do rio Pirai ( $Q_2$ ) e da vazão bombeada pela UEL Sta. Cecília ( $Q_1$ ) (Figura 6.3).

A princípio, pela regra do ONS, a barragem de Santana poderia defluir até 10 m<sup>3</sup>/s. Entretanto, após dezenas de visitas de campo, o que se observou foi, que

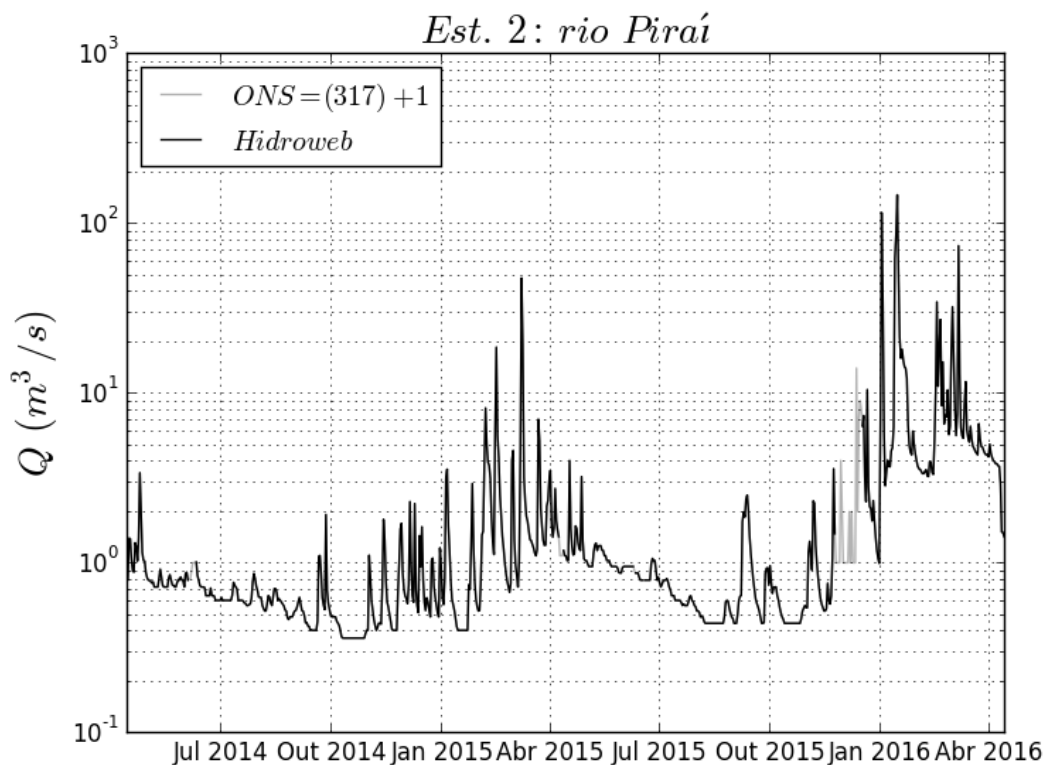


Figura 6.2: Série temporal de vazão média diária para o período de 14/04/14 a 14/04/16 para estação 2, constituída por dados horários do Hidroweb e diário da IPDO-ONS.

na maioria das vezes, a água a jusante da barragem de Santana estava estagnada. Apenas em alguns dias, foi possível observar a água fluir, mas por poucos minutos. Os moradores relataram que esse evento ocorre a cada dois dias, porém por apenas 15 minutos, o que coincide com a regra operativa da barragem para limpeza do canal. Desse modo, a operação da barragem seria incapaz de compensar esse excedente.

Esses fatos apontam inconsistência no balanço hídrico do reservatório de Santana, com mais água entrando do que saindo. Devido à dificuldade de comunicação com a Light Energia, tal inconsistência permanece sem maiores esclarecimentos. Nesse contexto, sobre os 70 dados ausentes na série  $Q_3$  foram imputados valores obtidos subtraindo o valor médio de  $11 \text{ m}^3/\text{s}$  da soma das vazões médias diárias da UEL Sta. Cecília ( $Q_1$ ) e do rio Pirai ( $Q_2$ ) para o mesmo período (Figura 6.4).

### Defluência do reservatório de Lajes

A série de vazão média diária defluente do reservatório de Lajes ( $Q_4$ ) foi extraída do banco de dados do Hidroweb. Deste valor diário foi descontado  $5,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , desviado pelas adutoras da Cedae para fins de abastecimento público. Para os 5 dados ausentes, foi imputado o valor de  $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , valor mais frequente da série (Figura 6.5).

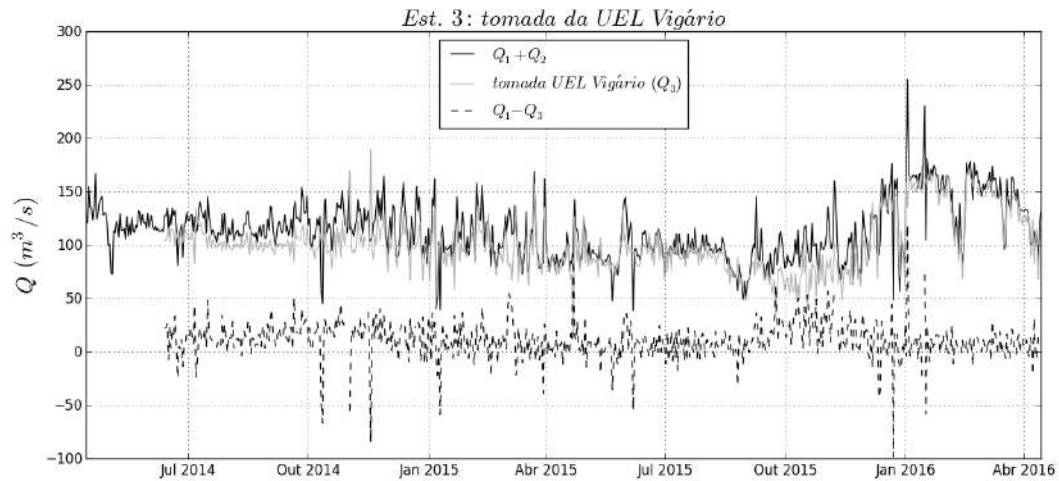


Figura 6.3: Série da vazão média diária para o período de 14/04/14 a 14/04/16 da soma das vazões bombeada pela UEL Sta. Cecília ( $Q_1$ ) e rio Piraí ( $Q_2$ ), série da vazão média diária para o período de 13/06/14 a 14/04/16 da tomada UEL Vigário ( $Q_3$ ) e a diferença entre os dois.

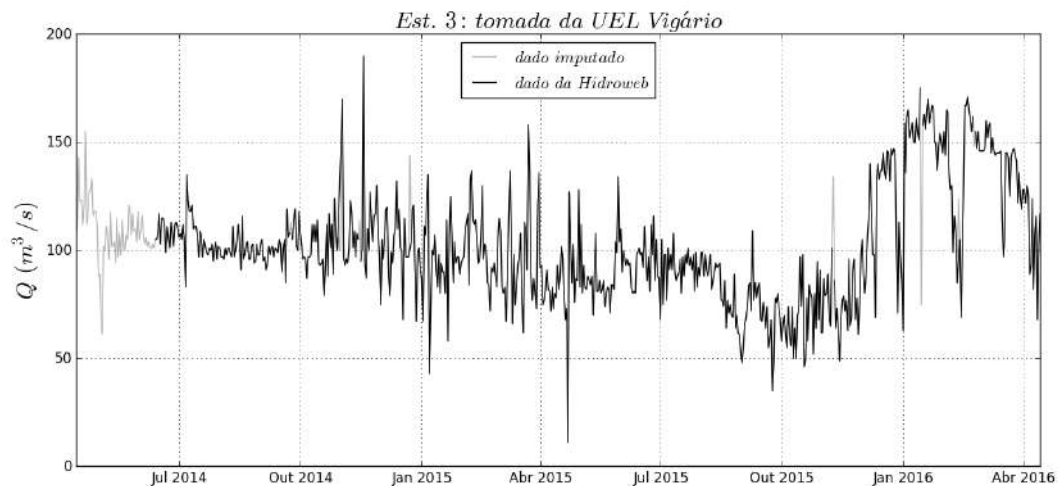


Figura 6.4: Série temporal da vazão média diária bombeada pela UEL Vigário ( $Q_3$ ) para o período de 14/04/14 a 14/04/16 completada com imputação de dados.

### Defluência do reservatório de Vigário

A série de vazão média diária defluente do reservatório de Vigário ( $Q_5$ ) foi extraída do banco de dados do Hidroweb (Figura 6.6). Os 13 registros ausentes foram preenchidos com o mesmo valor bombeado pela UEL Vigário ( $Q_3$ ), baseado no padrão de média nula da série da diferença entre a vazão média diária defluente do reservatório de Vigário ( $Q_5$ ) e a bombeada pela UEL Vigário ( $Q_3$ ) (Figura 6.7).

### Defluência da UHE Pereira Passos

A série de vazão média diária defluente da UHE Pereira Passos ( $Q_6$ ) foi extraída do banco de dados do Hidroweb (Figura 6.8). Desse valor diário foi descontado

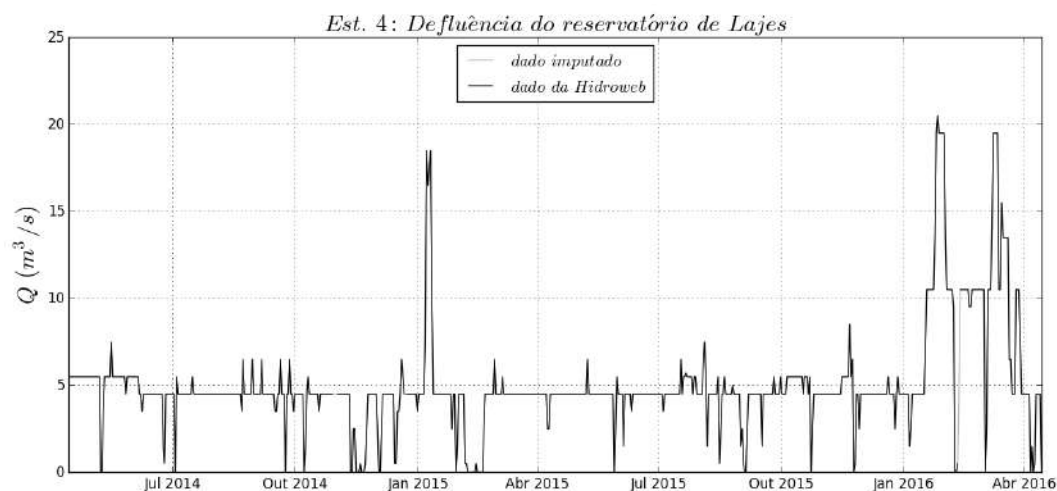


Figura 6.5: Série temporal da vazão média diária defluente do reservatório de Lajes ( $Q_4$ ) para o período de 14/04/14 a 14/04/16 completada com imputação de dados.

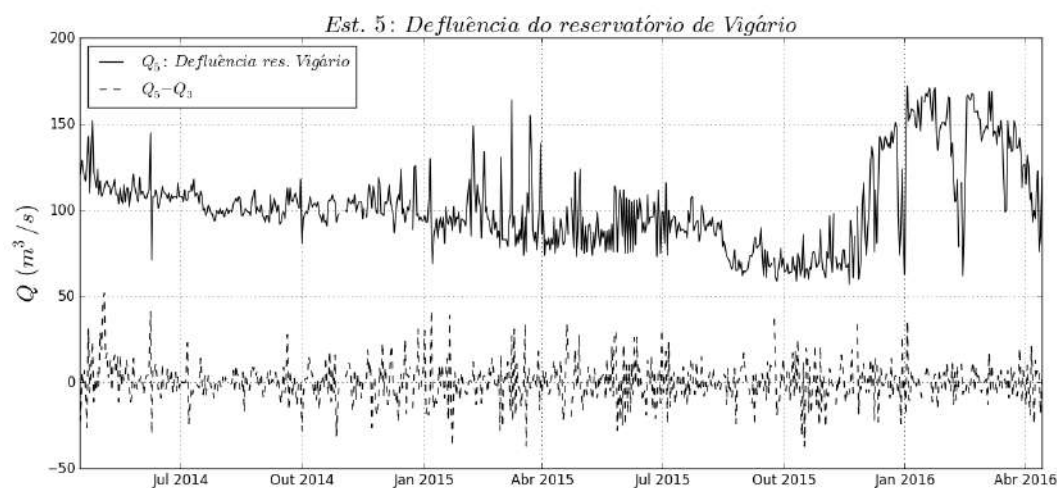


Figura 6.6: Série temporal da vazão média diária defluente do reservatório de Vigário ( $Q_5$ ) para o período de 14/04/14 a 14/04/16 e a sua diferença em relação a vazão bombeada pela UEL Vigário ( $Q_3$ ).

5,5  $m^3/s$ , desviado pelas adutoras da CEDAE, para fins de abastecimento público. Os 11 registros ausentes foram preenchidos pela soma das vazões defluentes dos reservatórios de Lajes ( $Q_4$ ) e Vigário ( $Q_5$ ), seguindo o padrão de média nula da série temporal da diferença entre a vazão afluenta e defluente no reservatório de Ponte Coberta (Figura 6.9).

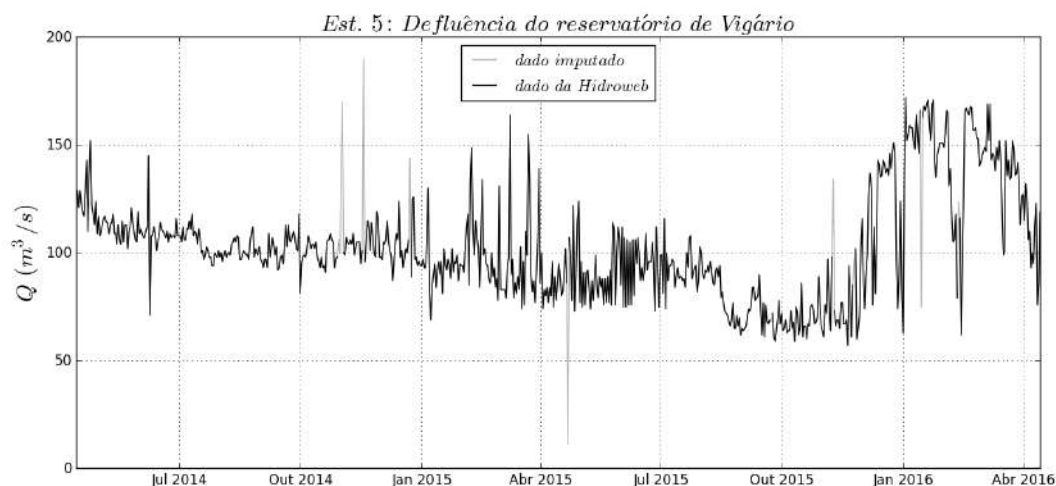


Figura 6.7: Série temporal da vazão média diária defluente do reservatório de Vigário ( $Q_5$ ) para o período de 14/04/14 a 14/04/16 completada com imputação de dados.

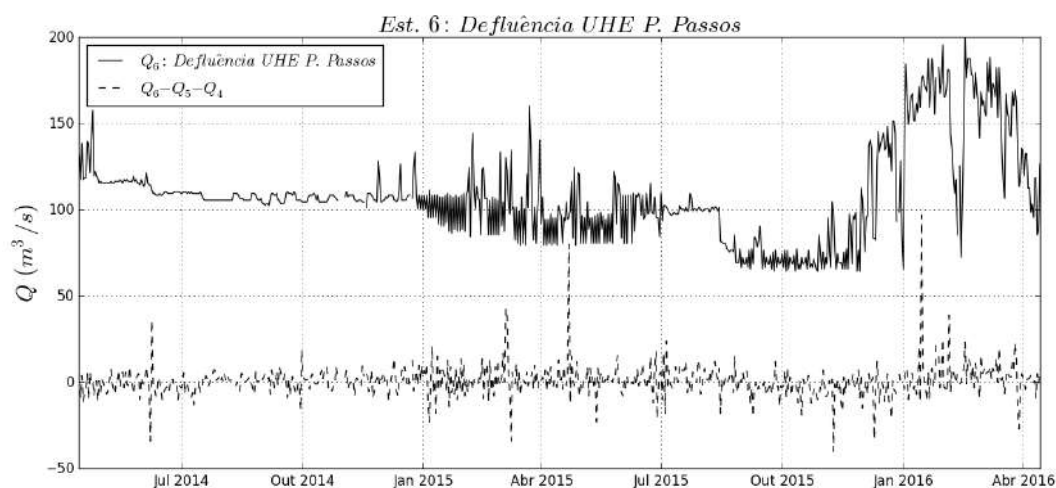


Figura 6.8: Série temporal da vazão média diária defluente da UHE Pereira Passos ( $Q_6$ ) para o período de 14/04/14 a 14/04/16 e a sua diferença em relação ao somatório das vazões defluentes dos reservatórios de Lajes ( $Q_4$ ) e Vigário ( $Q_5$ ).

## 6.5.2 Série de concentração de sólidos suspensos

### Modelo de conversão da concentração de sólidos fixos em sólidos suspensos

A base de dados sedimentológicos, proveniente de amostras de água, está dividida em séries temporais de concentrações de sólidos totais em suspensão (CST), concentração de sólidos fixos em suspensão (CSF), concentração de sólidos suspensos (CSS) e concentração de sólidos voláteis (CSV) (Tabela 6.2). Essas séries apresentam períodos de amostragem variados, sendo que a melhor resolução amostral foi diária. De modo a maximizar o aproveitamento dos registros sedimentológicos, disponíveis em cada estação, as informações de CSF e CST foram convertidas para CSS. Nesse estudo, foi considerado que a participação dos colóides no peso eram

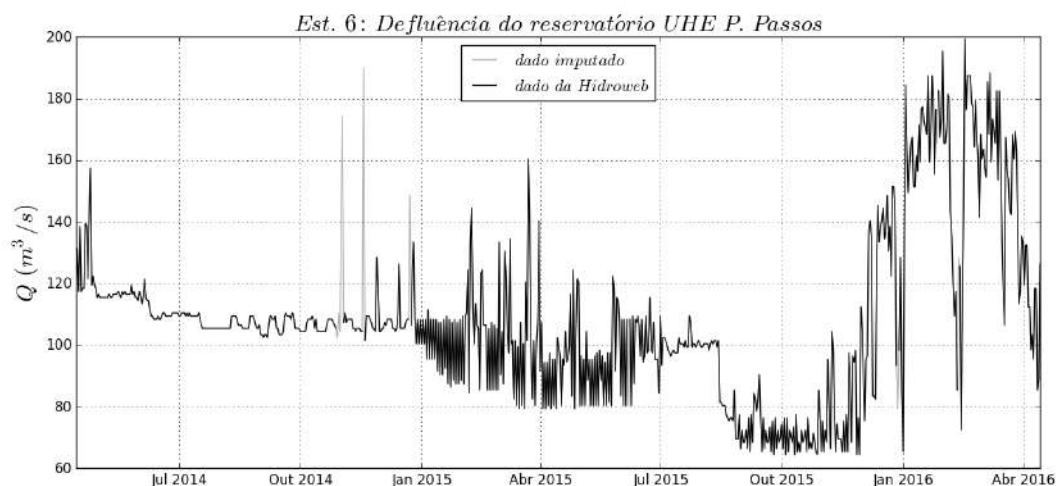


Figura 6.9: Série temporal da vazão média diária defluente da UHE Pereira Passos ( $Q_6$ ) para o período de 14/04/14 a 14/04/16 completada com imputação de dados

desprezíveis, ou seja,  $CST=CSS$ .

Três modelos de regressão linear foram propostos, para converter CSF em CSS, nas estações 2, 3 e 6, respectivamente. Para tal, usou-se uma série de registros coletados nas estações 2, 3 e 6, em dias variados, onde eram conhecidos os valores CSF e CSS (Figura 6.10). Esse conjunto de dados foi usado para ajustar os parâmetros do modelo de regressão linear, através do método dos mínimos quadrados (Tabela 6.3). Os gráficos de correlação do modelo e o histograma de resíduos mostraram que o modelo de regressão linear conseguiu reproduzir satisfatoriamente a relação linear entre os dois parâmetros (Figura 6.11 a Figura 6.17). As avaliações pelo coeficiente de determinação, pelo erro médio absoluto e pela raiz do valor quadrático médio também foram satisfatórias (Tabela 6.3). A incerteza expandida, associada à estimativa do modelo para as estações 2, 3, e 6 foram  $\pm 1,6$ ,  $\pm 1,9$  e  $\pm 2,0$  mg/l, respectivamente (Tabela 6.3)

### Curva-chave de sedimento para o rio Pirai

A série temporal da CSS diária do rio Pirai está incompleta, para o período de 14/04/14 a 14/04/16, sendo que os dados ausentes representam cerca de 85 % da série (Tabela 6.4). A imputação dos dados faltantes foi feita através da construção de uma curva-chave de sedimento, que consistiu de um modelo de Lei de Potência, onde os coeficientes foram determinados pelo MMQ, após a transformação logarítmica dos dados de entrada e saída.

O coeficiente de determinação foi baixo ( $R^2$ ), impactando mais severamente as previsões de CSS associadas a vazões acima de  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Prevendo tal dificuldade, a amostragem de água da observadora de bacias se concentrou no verão de 2015-16, deixando as maiores janelas de dados ausentes, na estação seca e no verão da crise



Tabela 6.2: Estações sedimentológicas usadas no presente estudo. N: número de registros.  $\bar{\mu}$  é a média.  $\sigma$  é o desvio padrão. CST é a concentração de sólidos totais suspensos. CSS é a concentração de sólidos suspensos. CSF é a concentração de sólidos fixos suspensos. CSV é a concentração de sólidos voláteis suspensos.

Sigla	Estação	N	$\bar{\mu}$ mg/l	$\sigma$ mg/l	Mín. mg/l	Máx. mg/l
CSS	1	563	39	$\pm 45$	1,8	373
CSS	2	23	22,8	$\pm 61,6$	1,6	297,2
CSS	3	28	14,3	$\pm 12,3$	4,1	63,6
CSS	4	11	5,0	$\pm 1,8$	2,3	7,9
CSS	5	21	7,2	$\pm 2,5$	3,2	12,4
CSS	6	32	8,4	$\pm 9,1$	2,4	55,1
CST	LG399	160	5,9	$\pm 10,9$	1,0	117,0
CST	VG610	33	16,4	$\pm 11,1$	3,0	50,0
CST	VG370	58	18,0	$\pm 24,6$	1,6	173,0
CSV	2	23	4,1	$\pm 8,0$	0,4	39,6
CSV	3	28	2,7	$\pm 1,5$	0,6	6,9
CSV	4	11	1,5	$\pm 0,8$	0,0	3,0
CSV	5	20	2,1	$\pm 0,7$	0,9	3,5
CSV	6	32	2,2	$\pm 1,3$	0,1	6,9
CSF	2	103	19,1	$\pm 25,8$	0,9	257,6
CSF	3	60	27,3	$\pm 23,2$	2,5	115,7
CSF	4	11	3,5	$\pm 1,7$	1,6	7,5
CSF	5	20	5,0	$\pm 2,0$	2,0	9,8
CSF	6	165	15,6	$\pm 10,5$	0,9	48,3

Tabela 6.3: Avaliação do modelo linear para estimação de CSS ( $\hat{y}_i$ ) a partir da CSF ( $x_i$ ), e estimação da incerteza expandida desse modelo para estações 2, 3 e 6.

	Est. 2 $\hat{y}_2=1,1487x_2+1,3532$	Est. 3 $\hat{y}_3=1,1067x_3+1,5107$	Est. 6 $\hat{y}_6=1,0967x_6+1,5491$
EMQ	0,55	0,77	0,90
RMS	$\pm 0,74$	$\pm 0,88$	$\pm 0,95$
MAE	0,65	0,69	0,72
R <sup>2</sup>	1,00	0,99	0,99
IC			
$\sigma_e$	$\pm 0,78$	$\pm 0,91$	$\pm 0,98$
t <sub>95,d</sub>	2,074	2,052	2,042
$\varepsilon$	$\pm 1,6$	$\pm 1,9$	$\pm 2,0$

Tabela 6.4: Variáveis selecionadas para modelagem do estimador da concentração sólidos suspensos diários na estação 02. NI: não informado.

Série completa		
Início:	14/04/2014	
Fim:	14/04/2016	
Frequência:	Diária	
Registro total:	732	
	<i>x1</i> : Q	<i>y1</i> : CSS
Descritor	m <sup>3</sup> /s	mg/l
Registros presentes	732	103
Registros ausentes	0	629
Média	2,8	23
Desvio Padrão	±9,3	±30
Mínimo	0,4	2
Percentil 25 %	0,6	11
Mediana	0,8	22
Percentil 75 %	1,6	29
Máximo	146,8	297
Incerteza da medição	NI	±9

Tabela 6.5: Avaliação do desempenho e estimação da incerteza expandida da saída do modelo de curva-chave de sedimento para estação 2 no rio Pirai.

Modelo:	CSS=8,9473Q <sup>0,4231</sup>
<b>Avaliação</b>	
EMQ:	744,41
RMS:	±27,3 mg/l
MAE:	12,3
$R^2$ :	0,14
<b>Intervalo de confiança</b>	
$\sigma_{e2,t}$	±27,6
$\sigma_{e2,r}$	±6,6
$t_{95,101}$ :	1,984
$\varepsilon_{2,t}$ :	±54,7 mg/l
$\varepsilon_{2,r}$ :	±13,1 mg/l

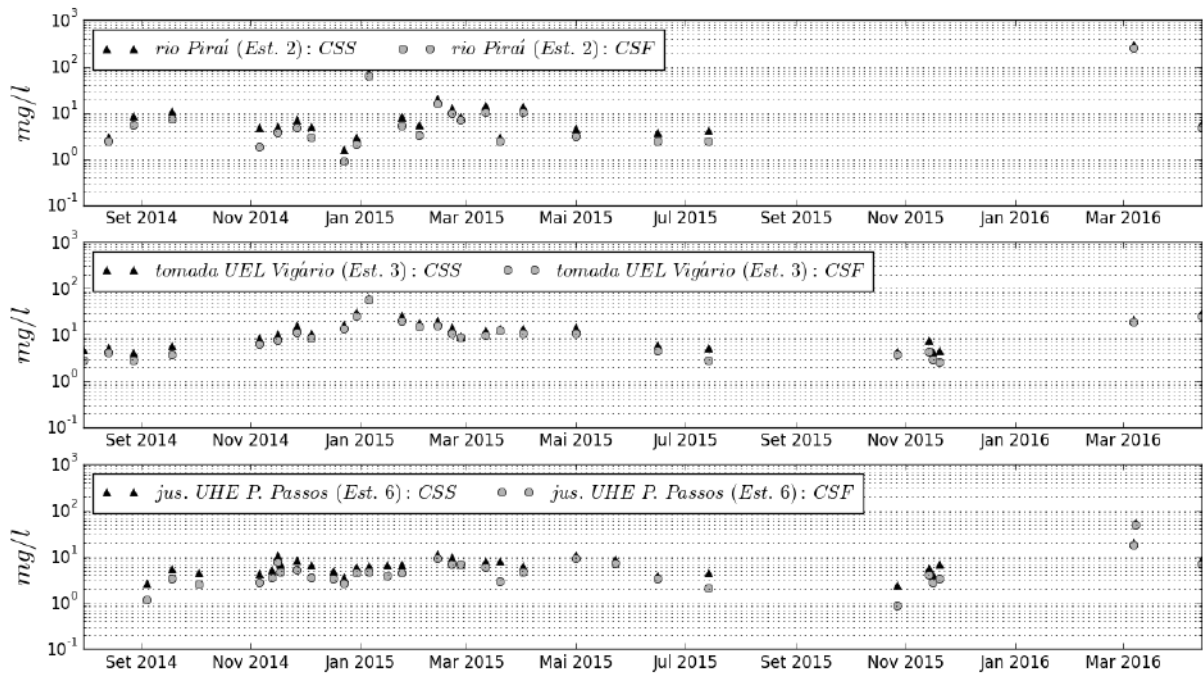


Figura 6.10: Série temporal das amostras coletadas no presente estudo na estação 2, 3 e 6 com CSS e CSF conhecidos

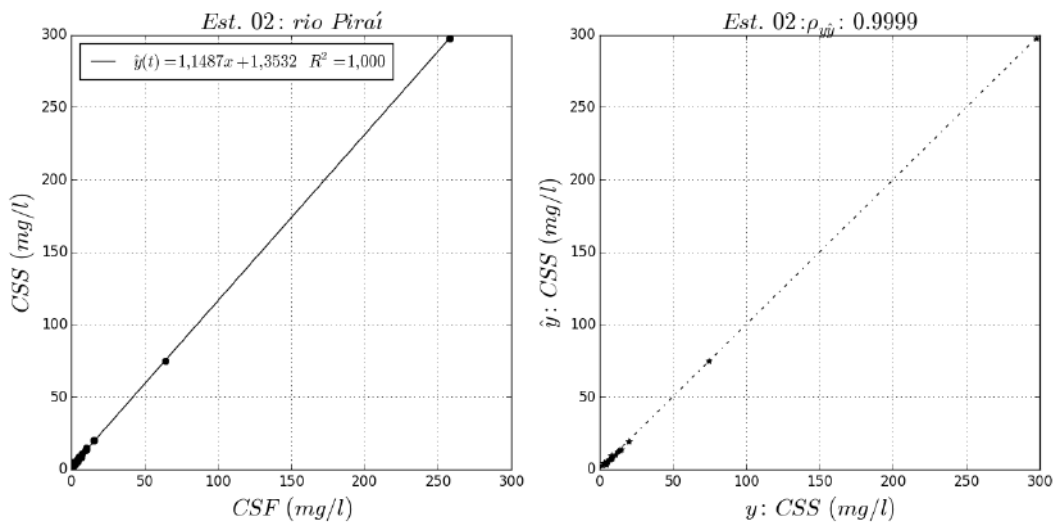


Figura 6.11: Gráfico da reta de calibração e o e gráfico da correlação do real com o predito para o rio Pirai (Est. 2).

hídrica (2014-15), que se caracterizaram por baixa vazão e CSS. Nesse contexto, um segundo cálculo, para incerteza expandida ( $\varepsilon_{2,r}$ ), foi proposto, utilizando apenas dados referentes a vazões menores que  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ . O valor da incerteza expandida com o conjunto reduzido de dados foi bem menor, melhorando a expressão do resultado dos dados imputados para a estação seca e para o ano de crise hídrica.

Os dados de vazão podem ter comprometido a qualidade da curva-chave, em especial, as maiores vazões que, provavelmente, extrapolaram o conjunto de dados usado na construção dessa curva-chave. Entretanto, como não foi possível ter acesso

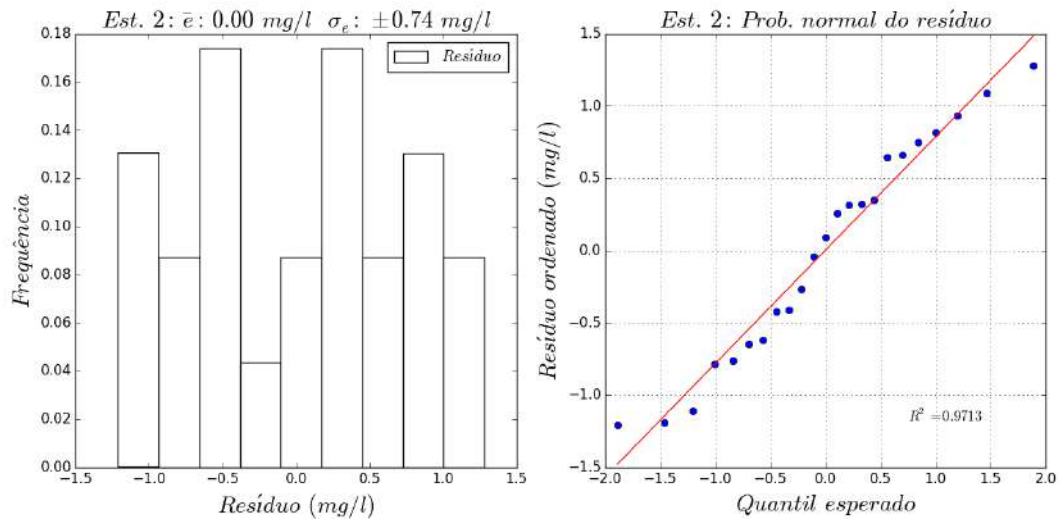


Figura 6.12: Histograma do resíduo e gráfico da probabilidade normal do resíduo para o rio Piraí (Est. 2).

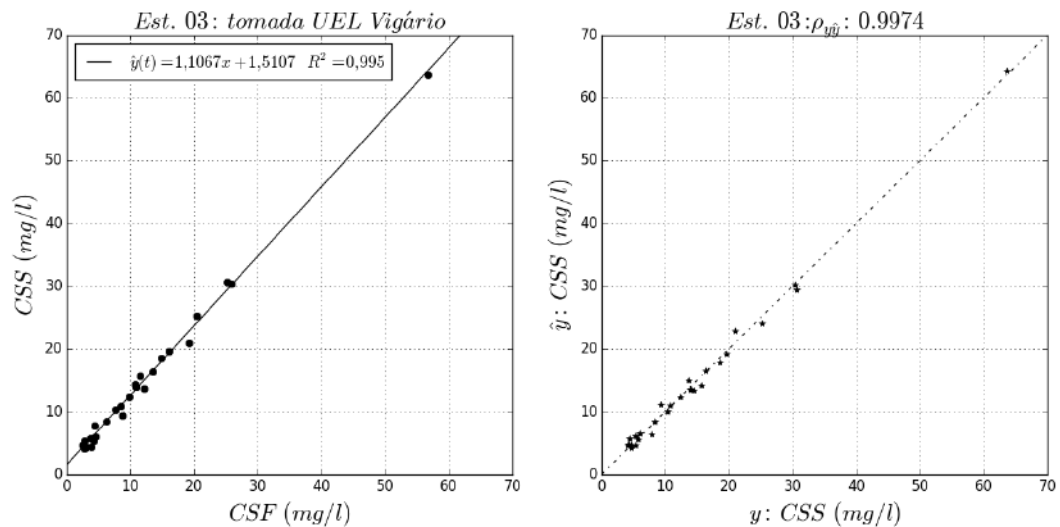


Figura 6.13: Gráfico da reta de calibração e gráfico da correlação do real com o predito para tomada do UEL Vigário (Est. 3)

ao estudo desta curva-chave, essa verificação ficou pendente. Todavia, as leituras de régua, feitas no momento da coleta de água, já demonstraram inconsistência com as cotas disponibilizadas, no Hidroweb, para mesmo dia e hora, reforçando a dúvida sobre a qualidade dos dados de vazão gerados pela estação 58350001.

#### Modelo de imputação de dados na série de CSS da estação 4

O reservatório de Lajes é marcado pela baixa concentração de sólidos suspensos, mesmo na estação chuvosa (Figura 6.22). Por conta da baixa variabilidade, adotaram-se médias mensais calculadas a partir do conjunto de dados formado pelo dados da estação LG 399, extraídos do Inea e das coletas realizadas no presente

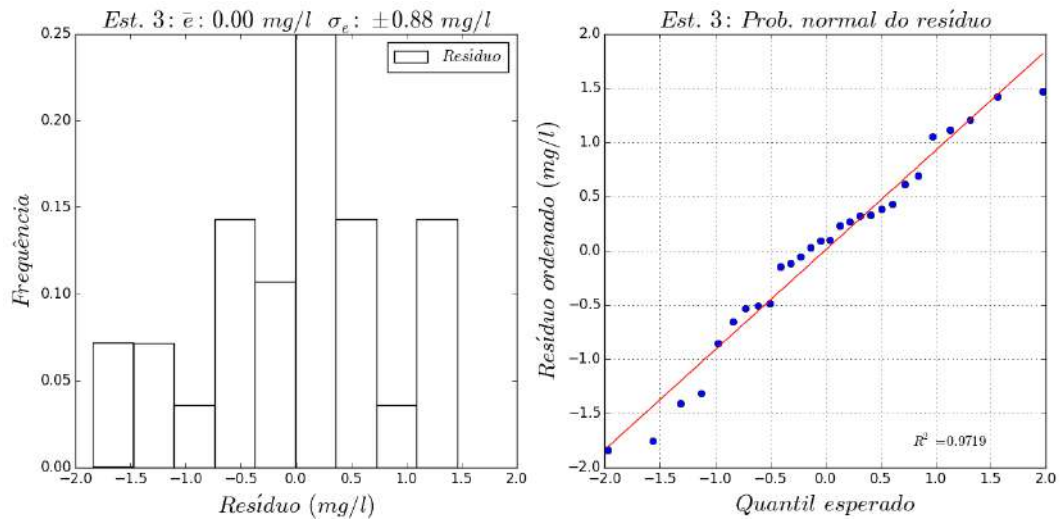


Figura 6.14: Histograma do resíduo e gráfico da probabilidade normal do resíduo para tomada do UEL Vigário (Est. 3).

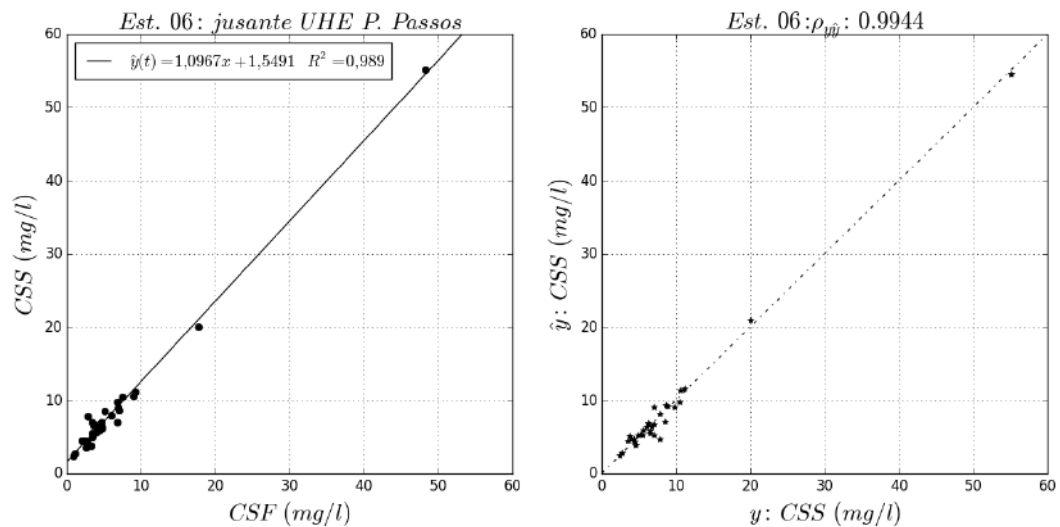


Figura 6.15: Gráfico da reta de calibração e o gráfico da correlação do real com o predito para jusante da UHE P. Passos (Est. 6).

estudo (Figura 6.22).

### Série de turbidez a jusante da UHE Pereira Passos

A série de turbidez, coletada pela sonda RBR Duo (nº 52546), na estação 6, foi convertida em CSS usando a curva-chave de turbidez, obtida no ensaio de bancada no LDSC (ver no Capítulo 3). O valor máximo de 373 mg/l, extraído do conjunto de amostras de água formado pelas estações 1, 2, 3, 4 e 5, mostrou que essa grande quantidade de registros extremos de turbidez está ordens de grandeza acima dessa referência, tratando-se, na realidade, de dados espúrios (Figura 6.23).

Entretanto, mesmo na faixa de medição esperada, o sensor de turbidez apresentou

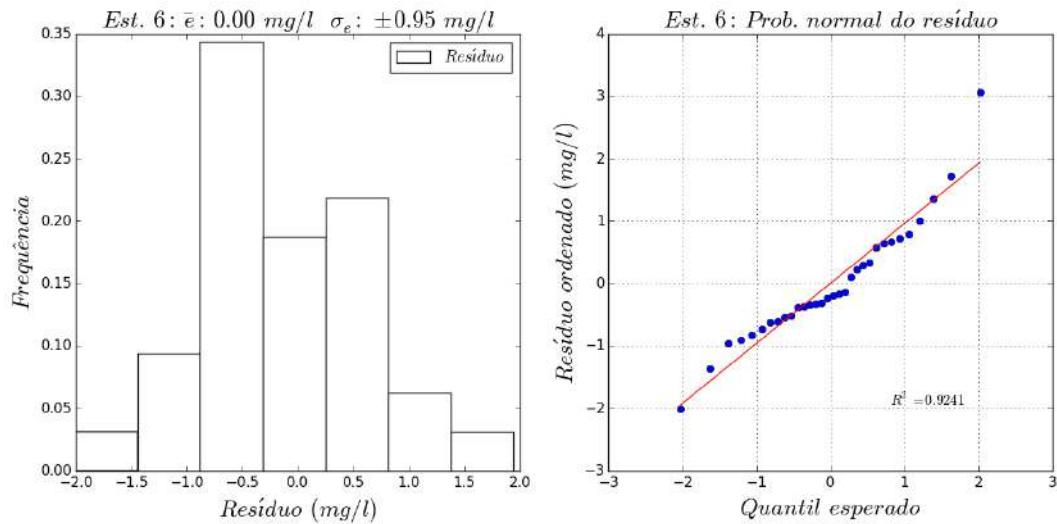


Figura 6.16: Histograma do resíduo e gráfico da probabilidade normal do resíduo para jusante da UHE P. Passos (Est. 6).

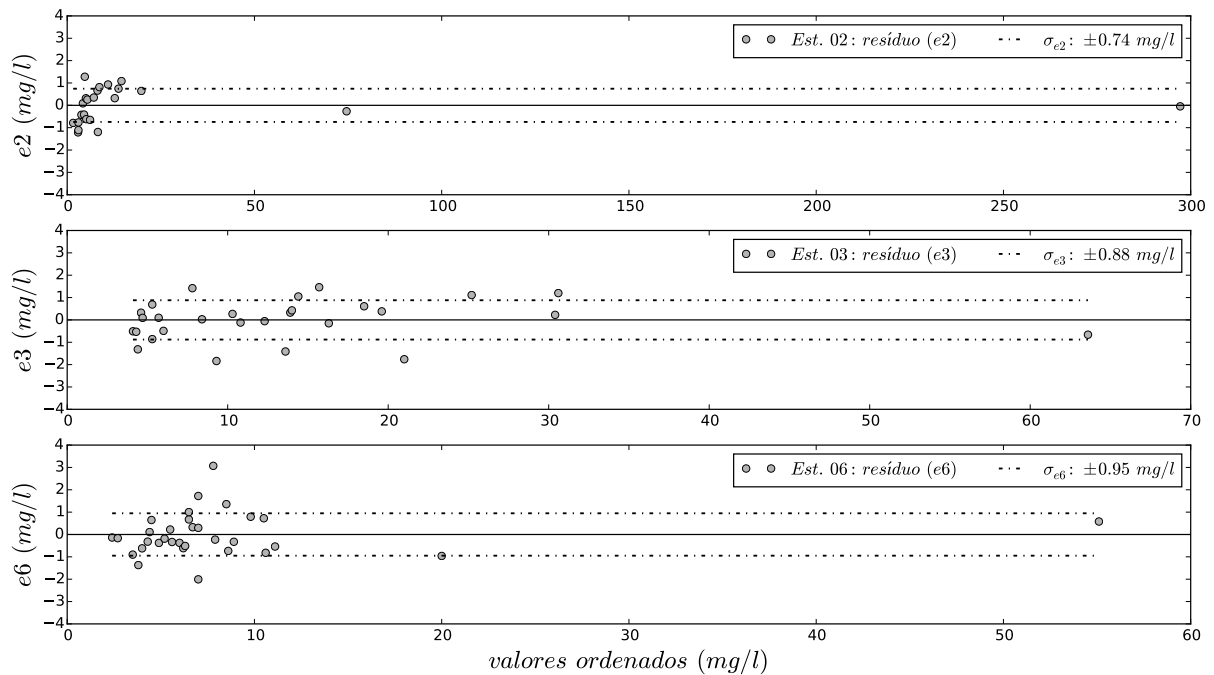


Figura 6.17: Gráfico da variação temporal do resíduo da saída prevista

problemas de medição, associados à presença de biofilme, especialmente na estação chuvosa. Entre dezembro e março, após a limpeza da janela óptica, o valor de turbidez caía significativamente chegando, no caso mais extremo, a uma diferença de até 25 mg/l, em relação ao registro imediatamente anterior à limpeza (Figura 6.24). Mesmo intensificando a periodicidade da visita de campo para semanal, o problema persistiu. Geralmente, a partir do terceiro dia, o biofilme já começava a interferir na medição de turbidez (Figura 6.25). Na estação seca, o turbidímetro obteve uma performance melhor, sendo a diferença entre a amostra e o registro pós-limpeza era

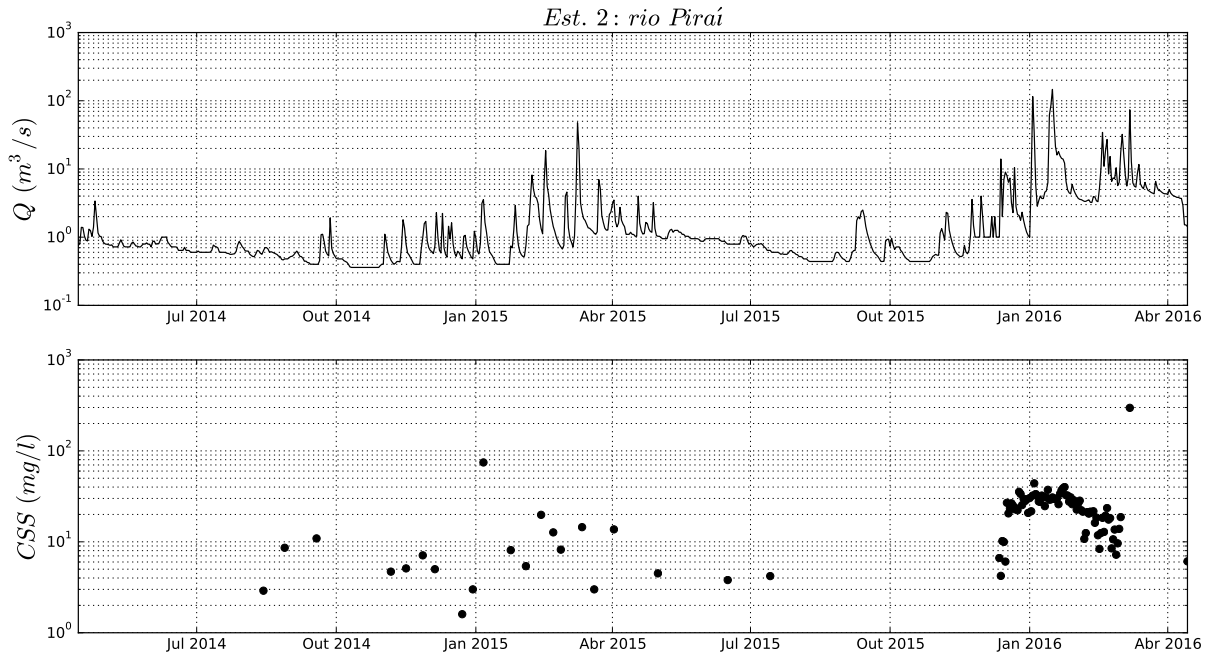


Figura 6.18: Séries temporais de vazão e CSS média diárias da estação 2, rio Pirai.

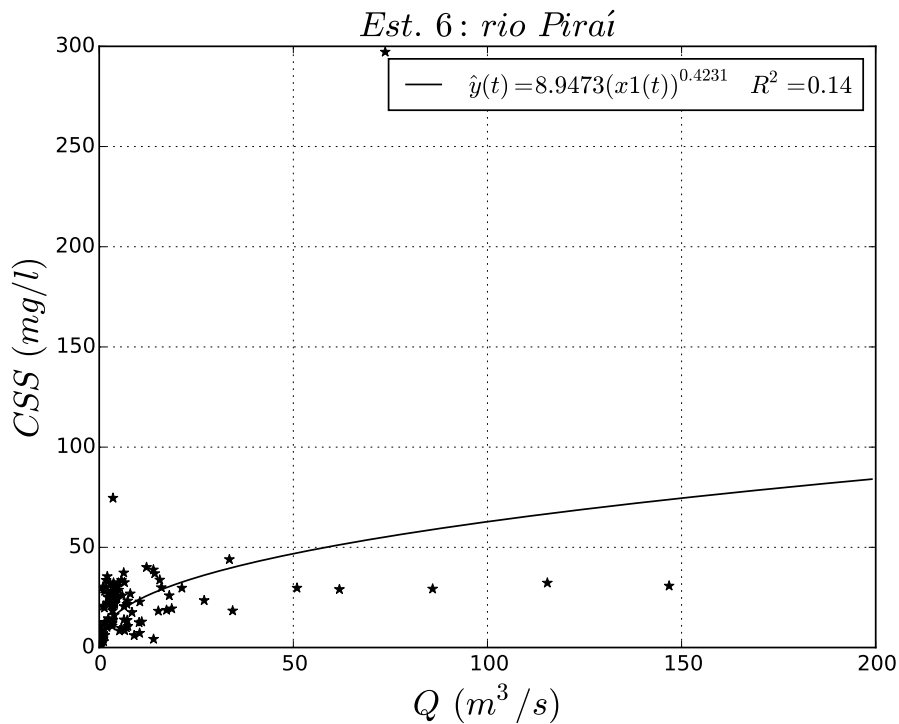


Figura 6.19: Curva-chave de sedimento para estação 2 no rio Pirai.

inferior à incerteza expandida da curva-chave de turbidez ( $\pm 9,4$  mg/l) (ver Capítulo 4) (Figura 6.26).

A primeira fase do tratamento de dados da série de turbidez se dedicou a remover parte dos dados espúrios, que se manifestaram na forma de sobrestimações. Para tal, adotou-se uma regra em que a concentração de sólidos suspensos na estação 6

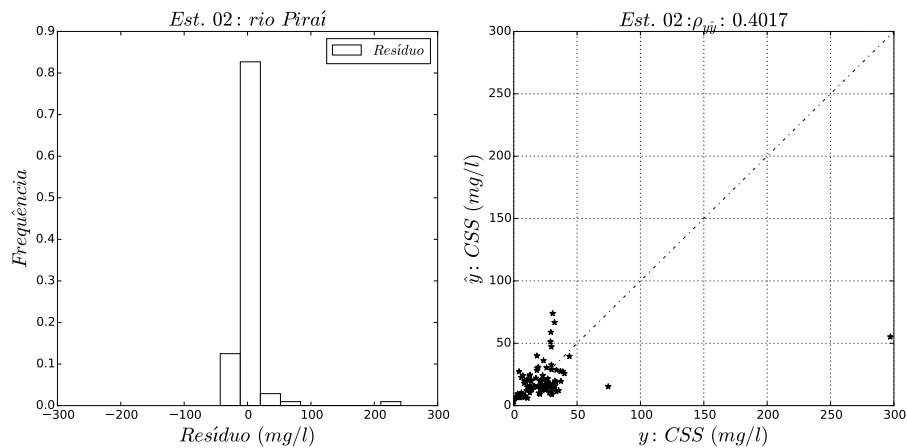


Figura 6.20: Histograma do resíduo e gráfico de correlação do valor real e predito do modelo de curva-chave de sedimento para estação 2 no rio Pirai.



Figura 6.21: Foto da leitura da régua (Est. 58350001) na estação 2 no dia 06/11/2014 as 15:38 e comparação com o dado disponibilizado pela Hidroweb para mesmo dia e hora

( $CSS_6$ ) não poderia estar acima da estimativa obtida na estação 1 ( $CSS_1$ ). Essa regra se baseou nos dados observacionais, nas quais foi possível constatar que, na maioria das vezes, a concentração dos sólidos em suspensão na água diminuía ao passar pelos reservatórios, exceto por alguns poucos registros de CSS, que chegaram a 23 mg/l acima do registrado na estação 1 (Figura 6.27).

Na segunda fase do tratamento da série de turbidez, os trechos da série impactada pelo biofilme foram manualmente removidos, através da inspeção visual referenciada pelas amostra de água (Figura 6.28). Na terceira fase do tratamento, os sinais ruidosos restantes foram removidos, aplicando a média diária à série temporal, tratada na segunda fase, que foi coletada originalmente, a uma taxa de 15 minutos (Figura 6.28). A série resultante desta última fase foi incorporada ao conjunto de



Tabela 6.6: Comparação da leitura da régua e cota disponibilizada pelo Hidroweb na estação 2 (Est. 58350001).

Data hora	leitura da régua (cm)	cota da Hidroweb (cm)	diferença (cm)
14/08/14 11:35	36579	36330	249
06/11/14 15:38	36573	36326	247
27/11/14 14:40	36584	36334	250
05/12/14 13:20	36581	36331	250
23/12/14 09:35	36575	36326	249
06/01/15 13:25	36609	36361	248
24/01/15 11:50	36585	36335	250
03/02/15 17:20	36581	36333	248
13/02/15 15:10	36584	36338	246
21/02/15 12:55	36587	36340	247
26/02/15 11:15	36574	36331	243
20/03/15 12:34	36584	36336	248
02/04/15 14:30	36600	36354	246
01/05/15 12:25	36583	36335	248
16/06/15 16:30	36581	36332	249
média:			248

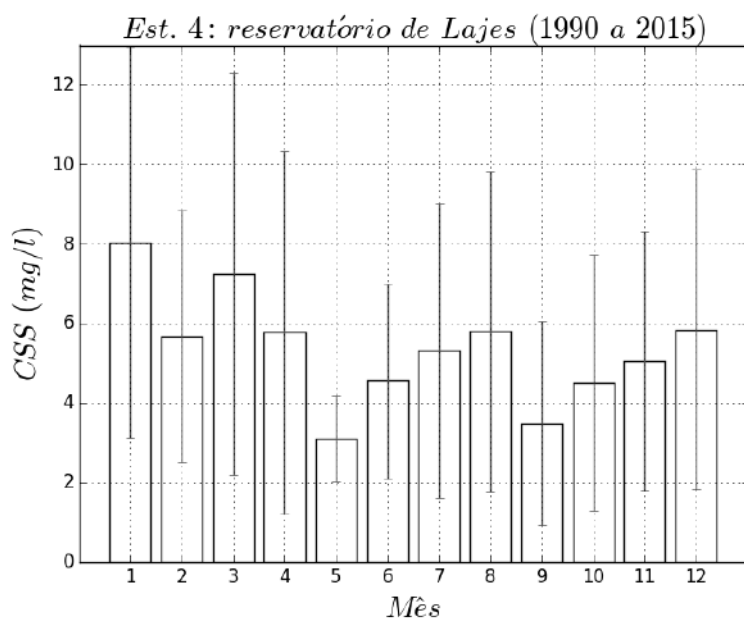


Figura 6.22: Média mensal da CSS na estação 4 no reservatório de Lajes, onde a barra de erro representa o desvio padrão.

treinamento e ao teste para modelagem de um imputador de dados faltantes para série de CSS da estação 6.

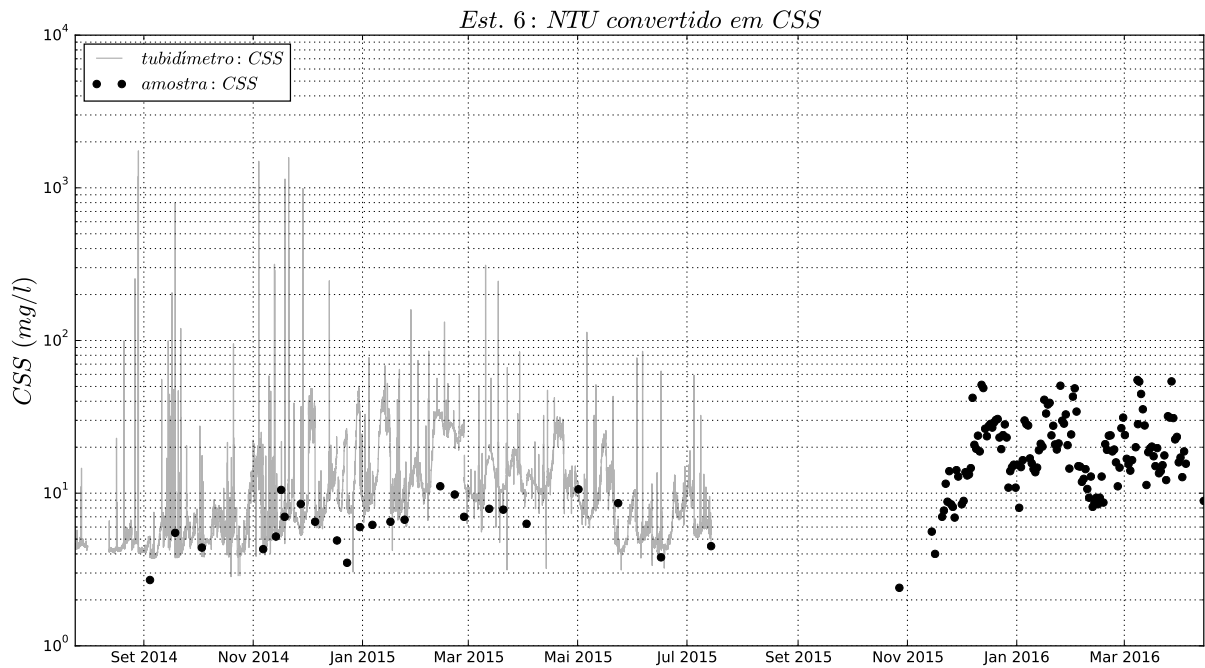


Figura 6.23: Série temporal NTU convertido em CSS na estação 6, jusante da UHE P. Passos.

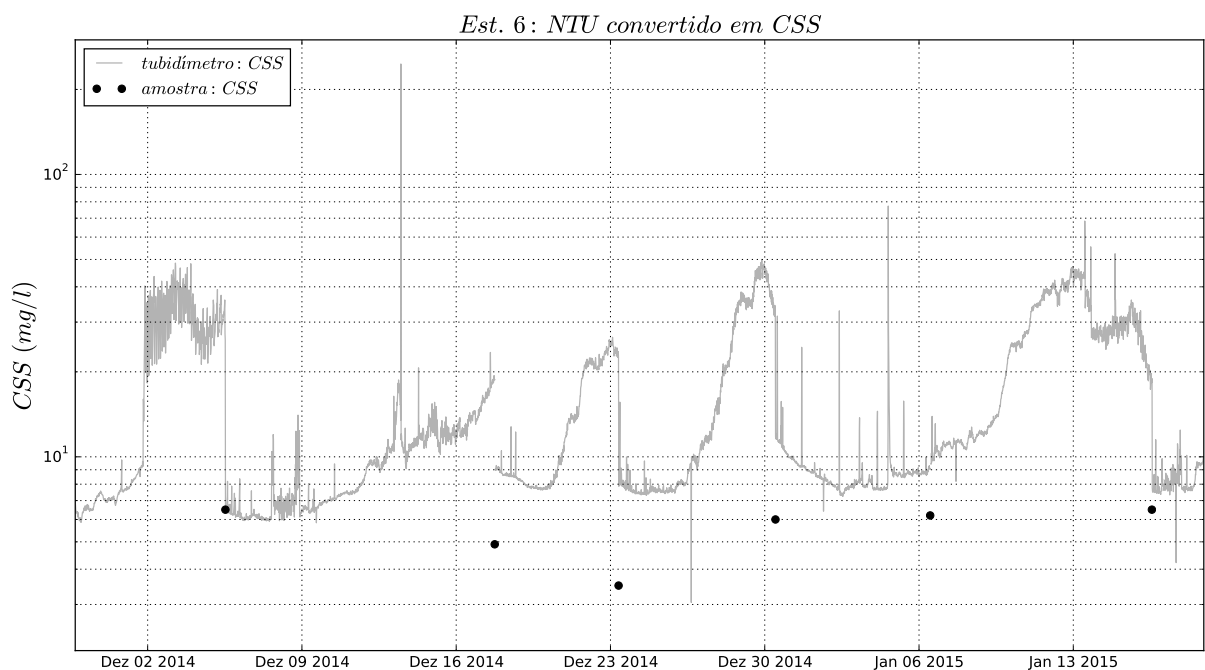


Figura 6.24: Detalhe do impacto da remoção semanal do biofilme na série temporal NTU convertido em CSS na estação 6, jusante da UHE P. Passos.

### Modelo de imputação de dados na série de CSS da estação 6

A modelagem de imputação dos dados de CSS ausentes, na série da estação 6, foi obtida a partir da sua relação de dependência com a série de concentração de sólidos suspensos da estação 1 ( $CSS_1$ ), a mais importante em termos de volume. A primeira



Figura 6.25: Sonda RBR Duo após 7 dias de monitoramento na estação 6.

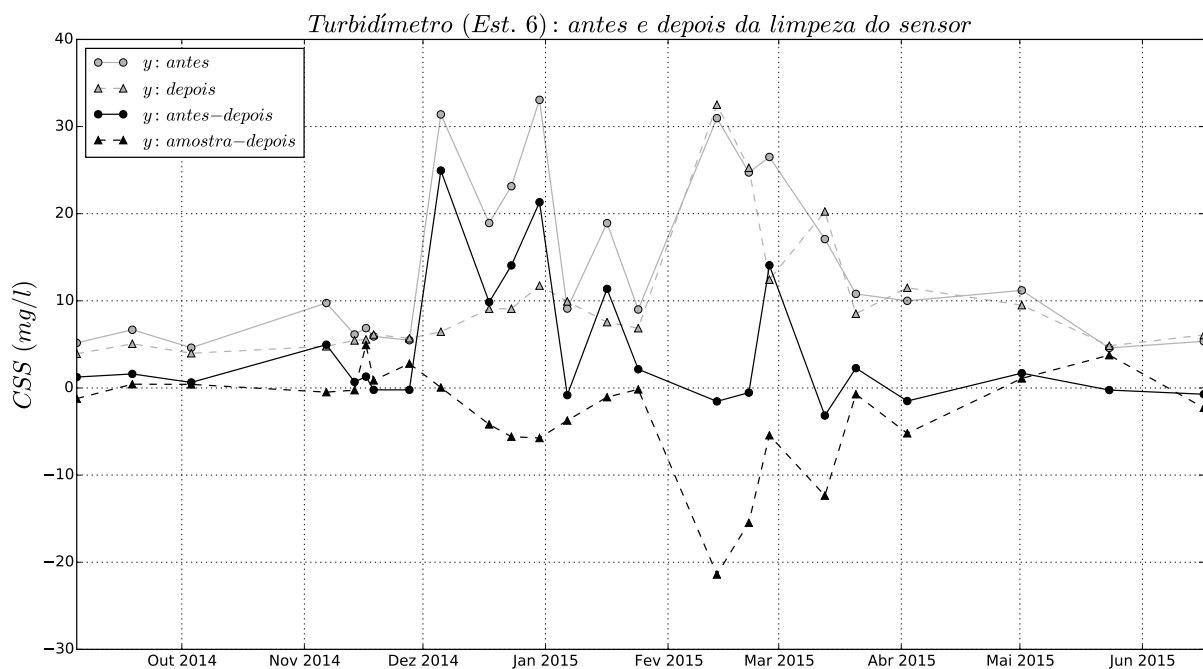


Figura 6.26: Registro do turbidímetro antes (círculo e linha contínua cinza) e depois (triângulo e linha tracejada cinza) da limpeza da janela óptica do sensor, diferença entre o antes e depois (círculo e linha contínua preta) da limpeza e diferença entre a amostra coleta nesse dia e a medição depois da limpeza (triângulo e linha tracejada preta).

etapa correspondeu em encontrar o atraso entre as séries. Nesse caso, a série que apresentou a melhor correlação foi a série de CSS da estação 1, com atraso de dois dias (Tabela 6.7).

A segunda etapa foi o desenvolvimento de um modelo de lei de potências, no qual os parâmetros foram ajustados pelos MMQ, após a transformação logarítmica dos dados de treinamento (Figura 6.29). O baixo desempenho do modelo, resumido na Tabela 6.8, se expressa por um aumento do erro, à medida que se caminha para o trecho superior da curva ajustada (Figura 6.30). Prevendo tal dificuldade, a

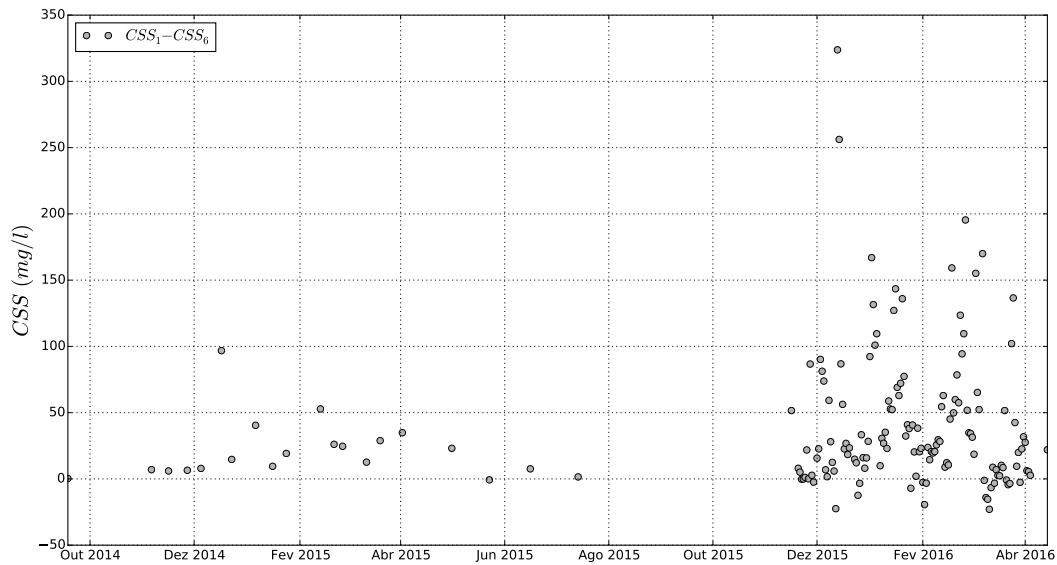


Figura 6.27: Diferença entre dados amostrais de concentração de sólidos suspensos bombeada pela UEL Sta. Cecília ( $CSS_1$ ) e a jusante da UHE Pereira Passos ( $CSS_6$ ).

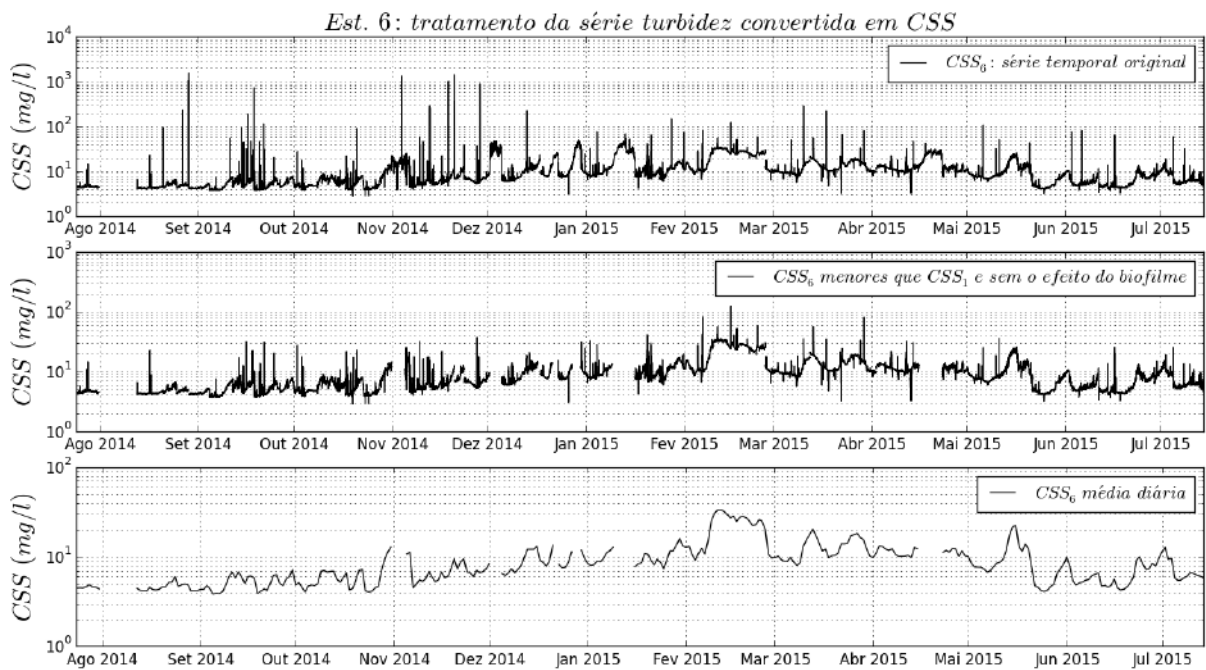


Figura 6.28: Tratamento dos dados série de CSS medidos pelo turbidímetro na estação 6 ( $CSS_6$ ).

amostragem diária de água, feita pelo observador de bacias concentrou-se no verão de 2015-16, deixando as maiores janelas de dados ausentes na estação seca, sendo que estes se caracterizaram por baixa CSS. Como as imputações de dados, com esse modelo, restringiram-se às baixas concentrações da estação seca, seu impacto na estimativa anual foi menor.

Tabela 6.7: Correlação de Pearson da  $CSS_6$  com  $CSS_1$  para 0, 1, 2, 3, 4, e 5 dias de atraso.

	x1:CSS <sub>1</sub>	x2:CSS <sub>1-1</sub>	x3:CSS <sub>1-2</sub>	x4:CSS <sub>1-3</sub>	x5:CSS <sub>1-4</sub>	x6:CSS <sub>1-5</sub>
y1:CSS <sub>6</sub>	0,471	0,491	0,549	0,545	0,548	0,537

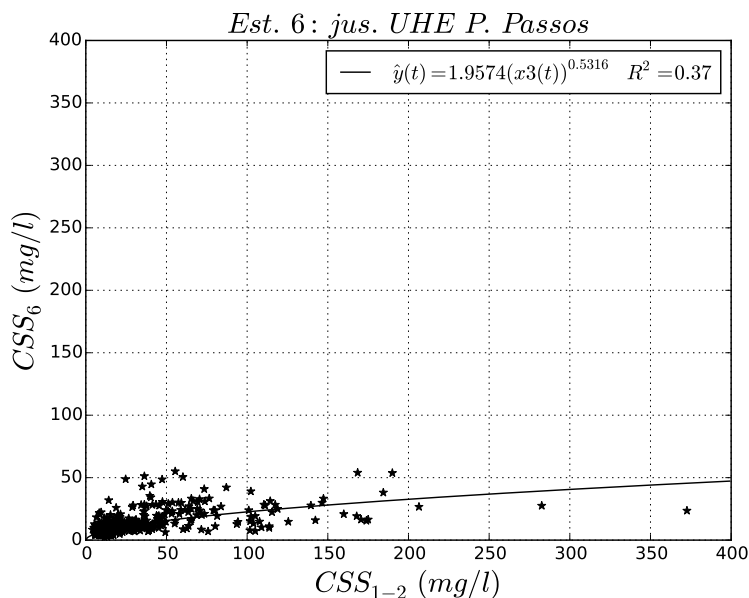


Figura 6.29: Curva ajustada para imputação de dados de CSS para a estação 6.

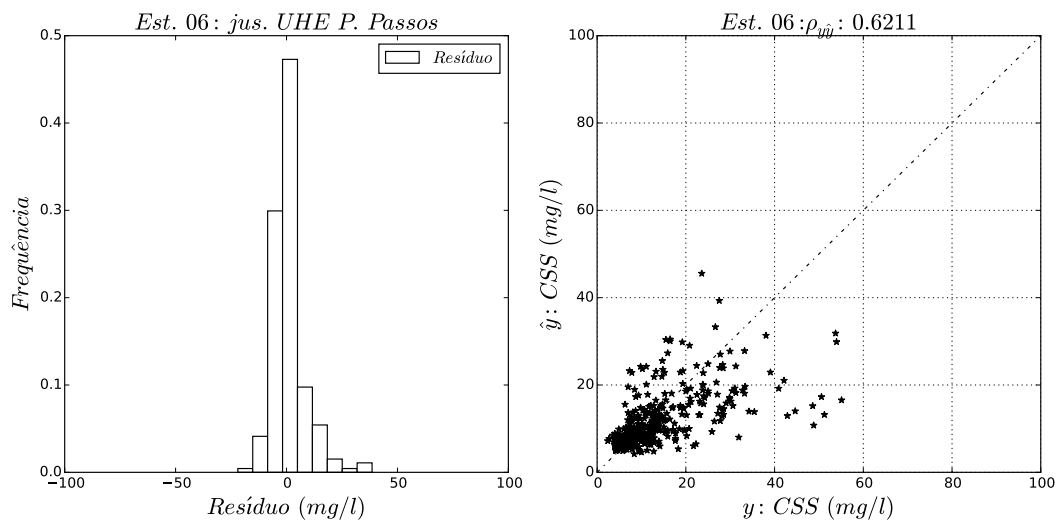


Figura 6.30: Histograma do resíduo e gráfico de correlação do valor real e predito do modelo de curva-chave de sedimento para estação 6 a jusante da UHE Pereira Passos.

Tabela 6.8: Avaliação do desempenho e estimação da incerteza expandida da saída do modelo de imputação de dados de  $CSS_6$  a partir da  $CSS_1$ .

Modelo:	$CSS_6=1,9574CSS_1^{0,5316}$
<b>Avaliação</b>	
EMQ:	54,88
RMS:	$\pm 7,41$ mg/l
MAE:	4,61 mg/l
$R^2$ :	0,37
<b>Intervalo de confiança</b>	
$\sigma_{e6}$	$\pm 7,42$ mg/l
$t_{95,459}$ :	1,960
$\varepsilon_6$ :	$\pm 14,5$ mg/l

## 6.6 Resultado

### 6.6.1 Granulometria

#### Saída do túnel da UEL Sta. Cecília

A estação 1 contou com dez amostras, onde duas foram coletadas na estação seca, com CSS variando entre 7 e 11 mg/l, e oito foram coletadas na estação chuvosa, com CSS variando entre 25 e 45 mg/l (Figura 6.31). A distribuição foi, essencialmente, unimodal. O segundo pico, que surge em algumas amostras na faixa de 0,5 e 1,5  $\mu\text{m}$ , tratava-se de um problema de medição no *Malvern*. Após a solução do problema, algumas amostras foram submetidas novamente ao *Malvern* e perderam esse segundo pico. Entretanto, nem todas as amostras contaram com réplicas para uma segunda rodada, por falta, na época, de geladeira.

O menor e o maior de tamanho observado foram de 0,4 a 158,5  $\mu\text{m}$ , respectivamente. O  $d_{90}$  se mostrou mais variável, respondendo à sazonalidade, com valor extremo de 53  $\mu\text{m}$  (Tabela 6.9). A distribuição das médias das frequências de classes de tamanho de todas as amostras mostrou um  $d_{50}$  de 8  $\mu\text{m}$  e foram classificadas como siltosas.

#### Rio Pirai

A estação 2 contou com sete amostras, onde duas amostras foram coletadas na estação seca, com CSS variando entre 4 e 5 mg/l, e cinco amostras foram coletadas na estação chuvosa, com CSS variando entre 5 e 20 mg/l (Figura 6.32). A distribuição foi essencialmente unimodal. O segundo pico, na faixa entre 0,5 e 1,5  $\mu\text{m}$ , foi tratado como dado espúrio, explicado na seção acima. O menor e o maior de ta-

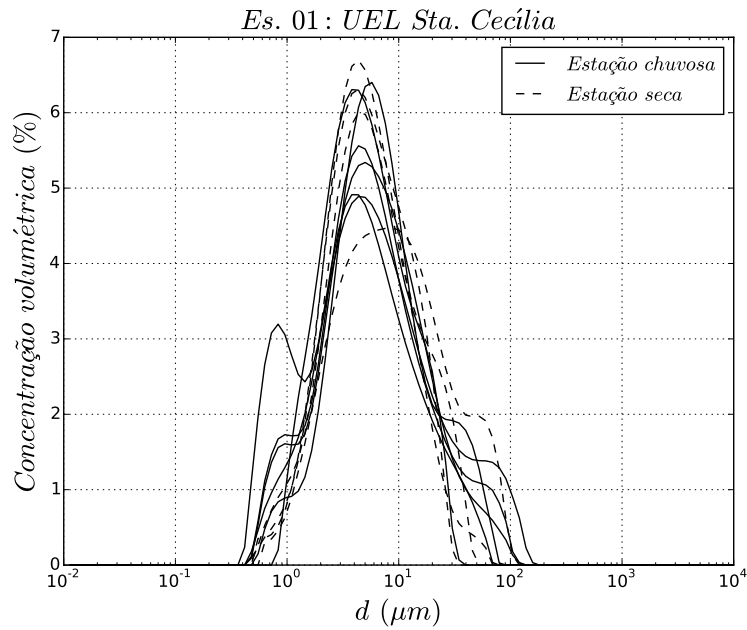


Figura 6.31: Distribuição granulométrica das amostras de água coletadas entre 2014 e 2016 na estação 1, na saída do túnel da UEL Sta. Cecília.

manho observado foram de 0,2 a 158,5  $\mu\text{m}$ , respectivamente. O  $d_{90}$  se mostrou mais variável, respondendo à sazonalidade, com valor extremo de 45  $\mu\text{m}$  (Tabela 6.10). A distribuição das médias das frequências de classes de tamanho de todas as amostras mostrou um  $d_{50}$  de 7  $\mu\text{m}$  e foi classificada como siltosa.

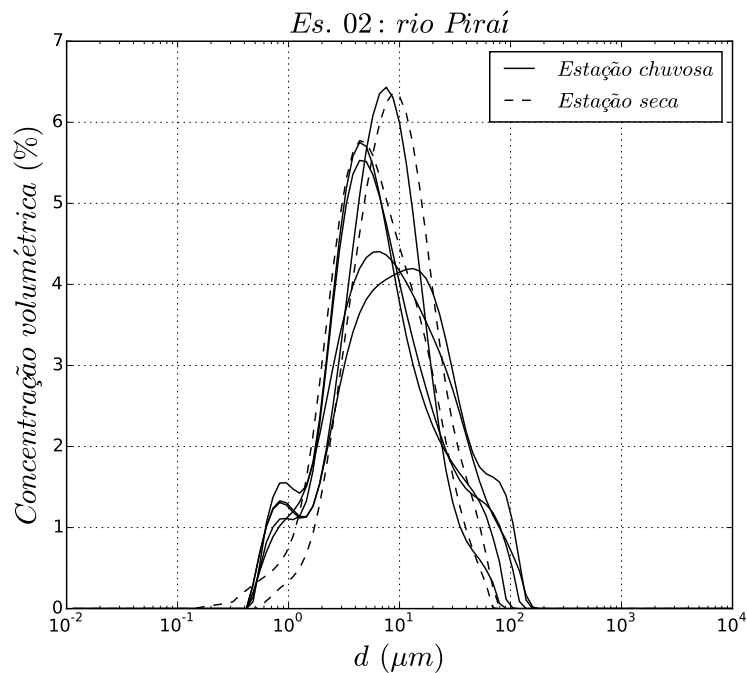


Figura 6.32: Distribuição granulométrica das amostras de água coletadas entre 2014 e 2016 na estação 2, no rio Pirai

Tabela 6.9: Estatística descritiva da granulometria das amostras da estação 1 e comparação com dados de CSS/F/V.

Data	d <sub>10</sub> μm	d <sub>50</sub> μm	d <sub>90</sub> μm	CSS mg/l	CSF mg/l	CSV mg/l
23/12/15	2	8	30	-	29	-
06/01/15	1	7	30	45	49	6
29/01/15	2	9	45	23	19	5
03/02/15	2	11	52	40	32	8
21/02/15	1	7	40	36	30	6
13/03/15	2	8	34	25	20	5
02/04/15	2	7	30	41	33	8
14/07/15	2	8	30	7	4	3
16/06/15	2	8	30	11	9	2
20/03/15	2	7	32	40	36	4
média <sup>(a)</sup> :	2	8	34			

<sup>(a)</sup> Distribuição das médias do percentual de cada classes de tamanho de todas as amostra de uma estação.

Tabela 6.10: Estatística descritiva da granulometria das amostras da estação 2 e comparação com dados de CSS/F/V.

Data	d <sub>10</sub> μm	d <sub>50</sub> μm	d <sub>90</sub> μm	CSS mg/l	CSF mg/l	CSV mg/l
24/01/15	2	7	39	8	5	3
03/02/15	1	6	27	5	3	2
13/02/15	2	9	45	20	16	4
21/02/15	2	6	30	13	10	3
13/03/15	3	8	26	15	11	4
01/05/15	2	6	20	5	3	2
16/06/15	2	5	20	4	3	1
média <sup>(a)</sup> :	2	7	30			

<sup>(a)</sup> Distribuição das médias do percentual de cada classes de tamanho de todas as amostra de uma estação.



### Tomada da UEL Vigário

A estação 3 contou com sete amostras, onde duas amostras foram coletadas na estação seca, com CSS variando entre 6 e 14 mg/l, e cinco amostras foram coletadas na estação chuvosa, com CSS variando entre 12 e 20 mg/l. A distribuição foi, essencialmente, unimodal (Figura 6.33). O segundo pico, na faixa entre 0,5 e 1,5  $\mu\text{m}$ , foi tratado como dado espúrio, explicado na seção acima da estação 1. O menor e o maior de tamanho observado foram de 0,1 a 363,1  $\mu\text{m}$ , respectivamente. O  $d_{90}$  se mostrou menos variável que a estação 1 e 2, com valor extremo de 40  $\mu\text{m}$  (Tabela 6.11). A distribuição das médias das frequências de classes de tamanho de todas as amostras mostrou um  $d_{50}$  de 7  $\mu\text{m}$  e foi classificada como siltosa.

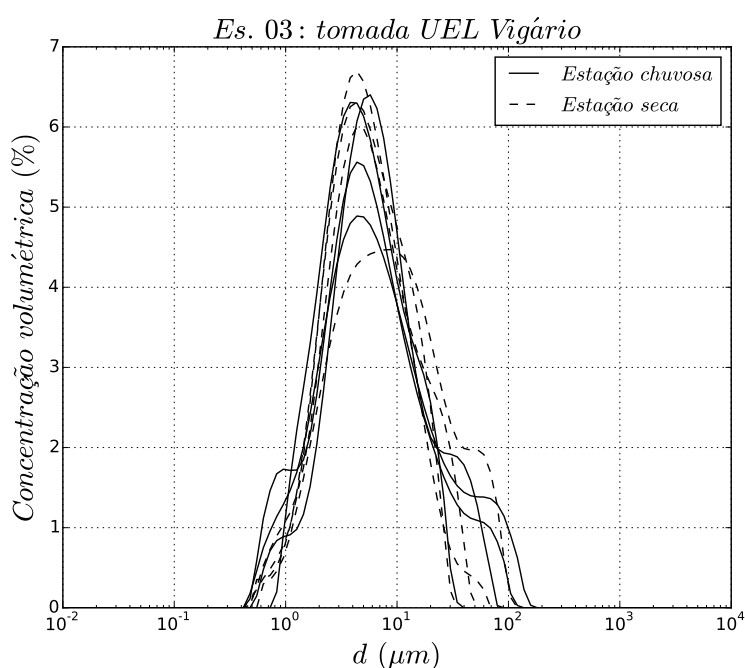


Figura 6.33: Distribuição granulométrica das amostras de água coletadas entre 2014 e 2016 na estação 3, na tomada da UEL Vigário

### Jusante da UHE Pereira Passos

A estação 6 contou com 16 amostras, onde cinco amostras foram coletadas na estação seca, com CSS variando entre 4 e 11 mg/l, e 11 amostras foram coletadas na estação chuvosa, com CSS variando entre 4 e 11 mg/l (Figura 6.34). A distribuição foi, essencialmente, unimodal. O segundo pico, na faixa entre 0,5 e 1,5, foi tratado como dado espúrio, explicado na seção acima. O menor e o maior de tamanho observado foi de 0,4 a 158,5  $\mu\text{m}$ , argila e areia fina, respectivamente. O  $d_{90}$  se mostrou menos variável que a estação 1 e 2, com valor mais extremo de 11  $\mu\text{m}$  (Tabela 6.12). A distribuição das médias das frequências de classes de tamanho de todas as amostras mostrou um  $d_{50}$  de 5  $\mu\text{m}$  e foi classificada como siltosa.

Tabela 6.11: Estatística descritiva da granulometria das amostras da estação 3 e comparação com dados de CSS/F/V.

Data	d <sub>10</sub> μm	d <sub>50</sub> μm	d <sub>90</sub> μm	CSS mg/l	CSF mg/l	CSV mg/l
13/02/15	1	8	35	20	16	4
21/02/15	1	5	20	14	11	3
13/03/15	2	9	40	12	10	2
20/03/15	1	7	40	14	12	2
02/04/15	2	6	23	14	11	3
01/05/15	2	8	35	14	10	4
16/06/15	2	7	23	6	5	1
média <sup>(a)</sup> :	2	7	30			

<sup>(a)</sup> Distribuição das médias do percentual de cada classes de tamanho de todas as amostra de uma estação.

Tabela 6.12: Estatística descritiva da granulometria das amostras da estação 6 e comparação com dados de CSS/F/V.

Data	d <sub>10</sub> μm	d <sub>50</sub> μm	d <sub>90</sub> μm	CSS mg/l	CSF mg/l	CSV mg/l
03/10/14	1	5	15	5	3	2
23/12/14	1	4	12	4	3	1
30/12/14	1	4	17	6	4	2
06/01/15	1	5	23	6	5	1
24/01/15	1	4	15	7	5	2
03/02/15	1	5	26	-	-	-
13/02/15	1	4	18	11	9	2
15/02/15	1	4	20	-	-	-
21/02/15	1	6	23	10	7	3
26/02/15	1	5	23	7	7	0
13/03/15	2	6	40	8	6	2
02/04/15	2	6	26	6	5	1
01/05/15	2	5	20	11	9	2
23/05/15	2	5	15	9	7	2
16/06/15	2	5	15	4	3	1
14/07/15	2	8	40	4	2	2
média <sup>(a)</sup> :	1	5	20			

<sup>(a)</sup> Distribuição das médias do percentual de cada classes de tamanho de todas as amostra de uma estação.

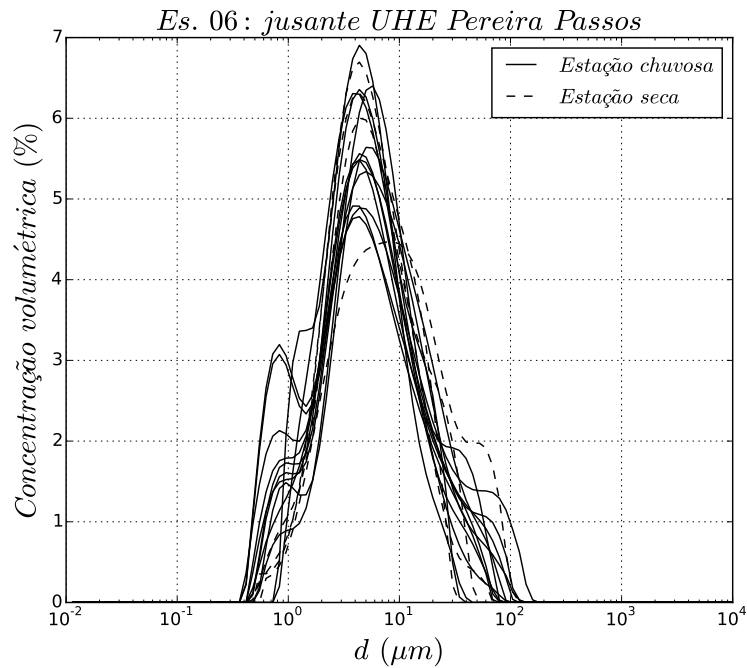


Figura 6.34: Distribuição granulométrica das amostras de água coletadas entre 2014 e 2016 na estação 6, a jusante da UHE Pereira Passos

### 6.6.2 Descrição sedimentológica do TPPG

Em termos de retenção de sedimento, os reservatórios do sistema de transposição de bacias do Paraíba do Sul - Pirai - Guandu (TPPG) foram divididos em reservatórios de transpasse e de retenção de sólidos suspensos. Os reservatórios de transpasse foram aqueles que não expressaram queda significativa na concentração, tamanho do  $d_{50}$  e largura da distribuição granulométrica dos sólidos suspensos. Os reservatórios de retenção foram aqueles em que foi possível notar a queda desses parâmetros descritivos.

Essa distinção pode ser visualizada no diagrama em caixa da Figura 6.35, elaborado com amostras coletadas na tese ou extraídas dos bancos de dados do Inea e do Hidroweb. Vale ressaltar, que as estações 1,2,3 e 6 estão desbalanceadas sazonalmente, com muito mais amostras coletadas na estação chuvosa, período de maior relevância, em termos de retenção de sedimento. Três grupos foram separados em termos de CSS mediana. As estações 1, 2 e 3 se agruparam na faixa mediana de 22 a 25 mg/l. A estação 4 se isolou dos demais, com valor mediano de 4 mg/l e as estações 5 e 6 se agruparam-se na faixa mediana de 9 e 10 mg/l.

O primeiro grupo apresenta o reservatório de Santana como um reservatório de transpasse de sólidos suspensos. Hoje, o reservatório de Santana se encontra tão assoreado que sua eficiência de retenção foi drasticamente reduzida considerando as condições operativas atuais. A CSS, que chega pelo túnel da UEL Sta. Cecília (est. 1) e pelo rio Pirai (est. 2) não tem diferença significativa com a encontrado na

tomada da UEL Vigário (est. 3) .

O reservatório de Lajes foi classificado como reservatório de retenção, pois seu valor mediano baixo de CSS mostrou que quase toda a descarga sólida afluyente, do ribeirão das Lajes e do túnel de Tocos, foi depositada no leito do reservatório. Entretanto, como a relação entrada e volume desse reservatório é muito pequena, os sinais de assoreamentos se tornam discretos e restritos à desembocadura do túnel de Tocos.

O terceiro grupo aponta o reservatório de Vigário como o principal reservatório de retenção de sólidos suspensos do sistema de transposição, enquanto que o reservatório de Ponte Coberta foi reconhecido como um reservatório de transpasse de sólidos suspensos. O reservatório de Vigário apresentou uma queda mediana de 15 mg/l, entre a tomada UEL Vigário (est. 3) e a defluência no canal de Vigário (est. 5). Por outro lado, a diferença entre a CSS mediana afluyente (10 mg/l) e defluente (9 mg/l), no reservatório de Ponte Coberta, foi desprezível.

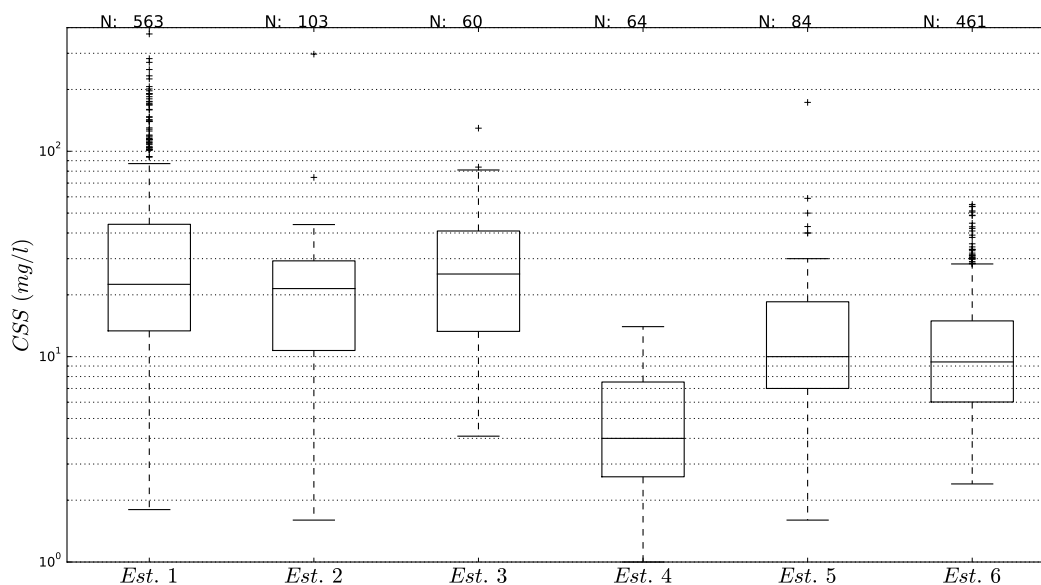


Figura 6.35: Diagrama de caixas da CSS das amostras coletadas na tese e extraídas do banco de dados do Inea das estações 1, 2, 3, 4, 5 e 6. A barra do meio representa a mediana (50 %) e a caixa representam os quartis superior (75 %) e inferior (25 %).

No gráfico da distribuição granulométrica média, a migração do  $d_{50}$ , para valores menores e o estreitamento da forma da distribuição granulométrica foram indicadores da retenção de determinadas classes de tamanhos no sistema de transposição (Figura 6.36). No reservatório de Santana, observou-se que entre a saída do túnel da UEL Sta. Cecília (est.1) e a tomada da UEL de Vigário (est. 3), houve uma perda relativa de 25 %, na faixa que abrange as classes de tamanhos entre 20  $\mu\text{m}$  e 120  $\mu\text{m}$  (Figura 6.36). Entretanto, o valor do  $d_{50}$  se manteve quase o mesmo, apenas ganhando mais relevância relativa entre as demais classes de tamanho que se man-

tiveram em suspensão (Figura 6.36, Tabela 6.9 e Tabela 6.11). Essas características corroboraram para um reservatório dominado pelo transpasse, onde, apesar da sedimentação parcial das classes de maior tamanho, a maioria das outras classes de tamanho se mantiveram em suspensão.

A mudança mais relevante ocorreu após a passagem pelo reservatório de Vigário, onde o  $d_{50}$  declinou de  $7 \mu\text{m}$ , na tomada da UEL de Vigário, para  $5 \mu\text{m}$ , a jusante da UHE Pereira Passos (Figura 6.36, Tabela 6.11 e Tabela 6.12). Esse declínio no  $d_{50}$  foi acompanhado pela retenção das classes maiores do que o  $d_{50}$ , que resultaram no aumento da concentração volumétrica do  $d_{50}$  e em um visível estreitamento na forma da distribuição granulométrica, onde o  $d_{90}$  recuou de  $30 \mu\text{m}$  para  $20 \mu\text{m}$ . Na faixa entre as classes  $7$  e  $120 \mu\text{m}$ , a perda relativa foi de  $28 \%$ . Tal qual na comparação da CSS entre as estações, mais uma vez, o reservatório de Vigário apareceu como o principal reservatório na retenção de sólidos suspensos do sistema de transposição.

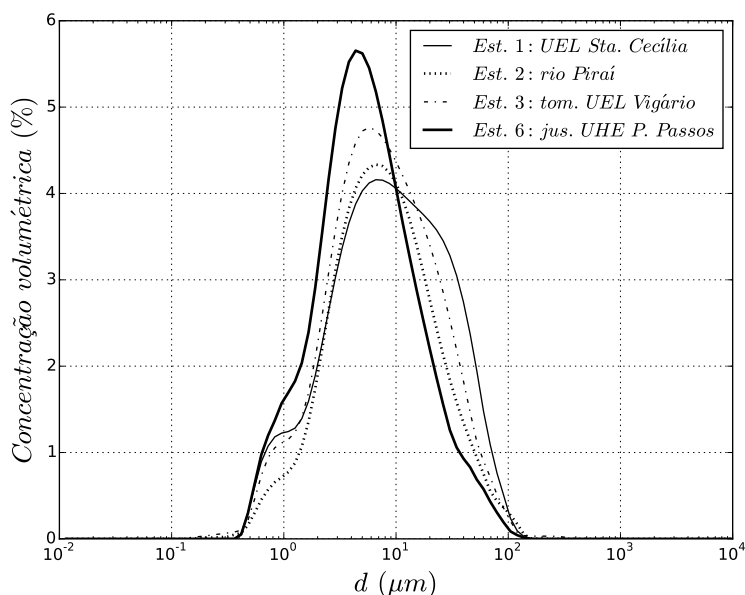


Figura 6.36: Distribuição granulométrica média das amostras de água coletadas entre 2014 e 2016 na estação 1, 2, 3 e 6

Em todas as estações da TPPG, as classes de tamanho acima de  $63 \mu\text{m}$  encontradas nas amostras, foram diagnosticadas como material floculado persistente ao tratamento com ultrassom. De fato, nenhum material acima de  $63 \mu\text{m}$  ficou retido na peneira. Entretanto, quando se voltou o material ao *Marvern*, frações floculadas maiores que  $63 \mu\text{m}$  reapareceram na leitura do instrumento.

A mediana das concentração de sólidos voláteis (CSV) em suspensão, nas seis estações, foram menores que  $5 \text{ mg/l}$  (Figura 6.37). Apesar do crescimento generalizado de macrófitas nos reservatórios de Vigário e Santana, os registros não apontaram reflexos nas CSV.

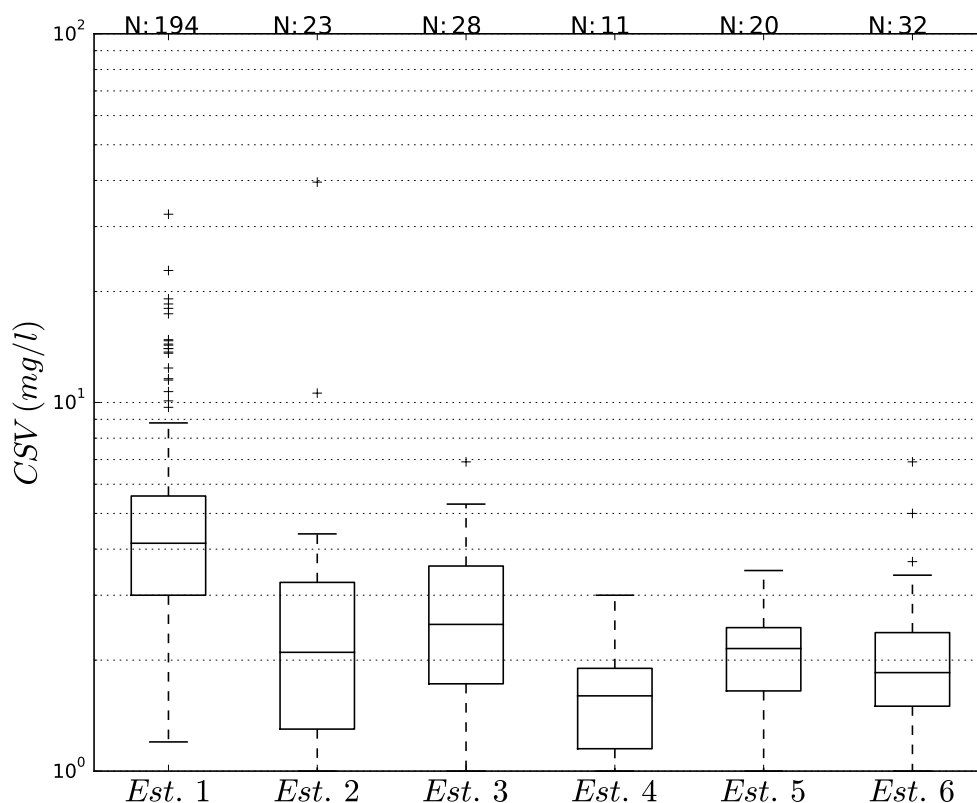


Figura 6.37: Diagrama de caixas da CSV das amostras coletadas na tese das estações 1, 2, 3, 4, 5 e 6. A barra do meio representa a mediana (50 %) e a caixa representam os quartis superior (75 %) e inferior (25 %).

### 6.6.3 Impacto da operação horária da UHE Pereira Passos na CSS

A operação horária da UHE Pereira Passos responde por variações bruscas na vazão que pode chegar 350 m<sup>3</sup>/s. Entretanto, por conta da crise hídrica, em geral, as vazões mínimas foram menores que os 120 m<sup>3</sup>/s e as máximas, menores que 150 m<sup>3</sup>/s (Figura 6.38). Inclusive, nos meses críticos, o mínimo de 120 m<sup>3</sup>/s, definida pela resolução ANA n° 211, converteu-se em valor máximo. Nessas condições operacionais atípicas, o impacto dos picos de vazão isolados de mais de 300 m<sup>3</sup>/s produziram perturbações pontuais na turbidez, envolvendo um único registro, ou seja, com duração menor que 15 minutos (Figura 6.39). Variações da ordem de 50 m<sup>3</sup>/s, entre o pico e a base, causaram apenas ruídos de curta duração e intensidade na turbidez (Figura 6.40).

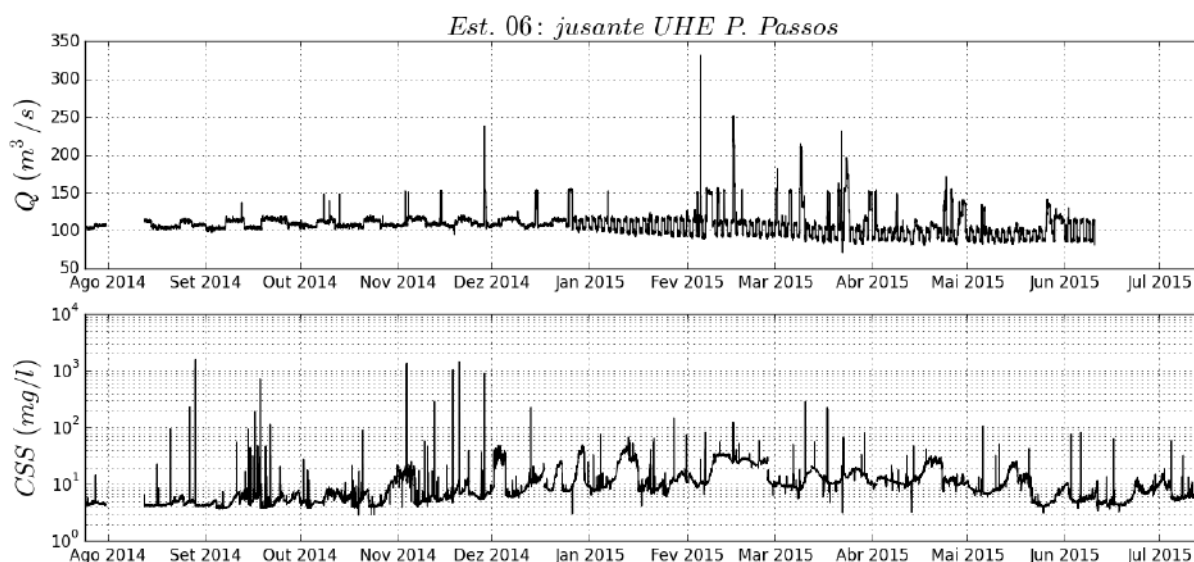


Figura 6.38: Séries de vazão e concentração de sólidos suspensos sem tratamento coletados a cada 15 minutos na estação 6, a jusante da UHE Pereira Passos.

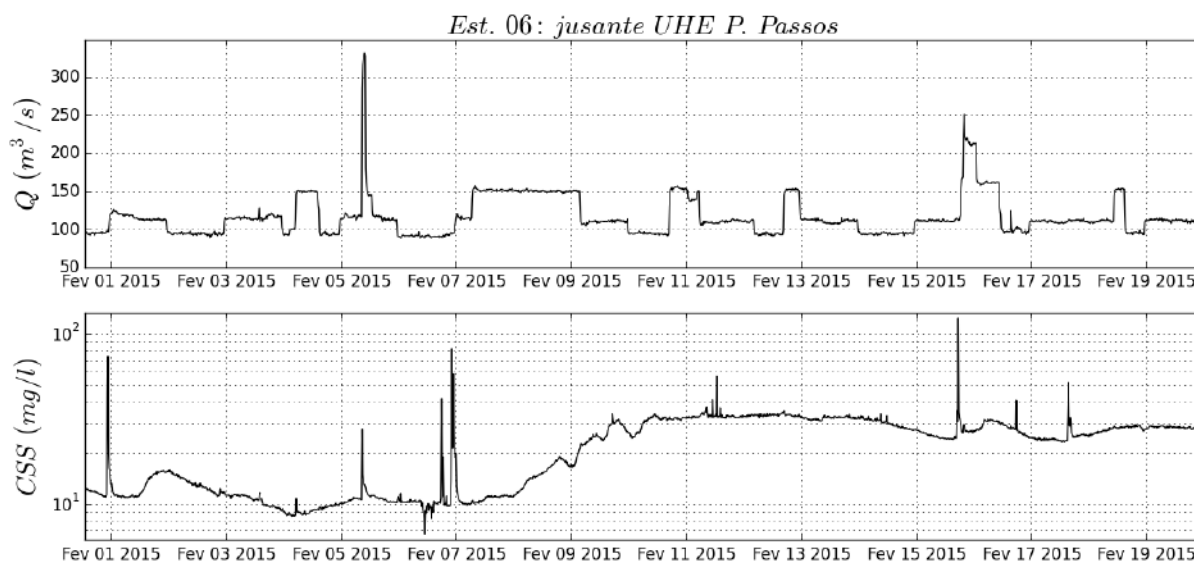


Figura 6.39: Detalhe mostrando o impacto de um pico máximo de vazão na concentração de sólidos suspensos sem tratamento coletados a cada 15 minutos na estação 6, a jusante da UHE Pereira Passos.

#### 6.6.4 Estimativa da descarga anual de sólidos suspensos e eficiência de retenção da TPPG

A estimativa da descarga anual de sólidos suspensos foi baseada em um balanço anual entre três entradas e uma saída. As entradas são o túnel da UEL Sta. Cecília (est. 1), o rio Piraí (est. 2) e a defluência do reservatório de Lajes (est. 4). A saída é a defluência da UHE Pereira Passos (est. 6) (Figura 5.26, Figura 6.41, Figura 6.43 e Figura 6.45).

A descarga de sólidos suspensos estimada, afluente pelo rio Piraí, mostrou-se

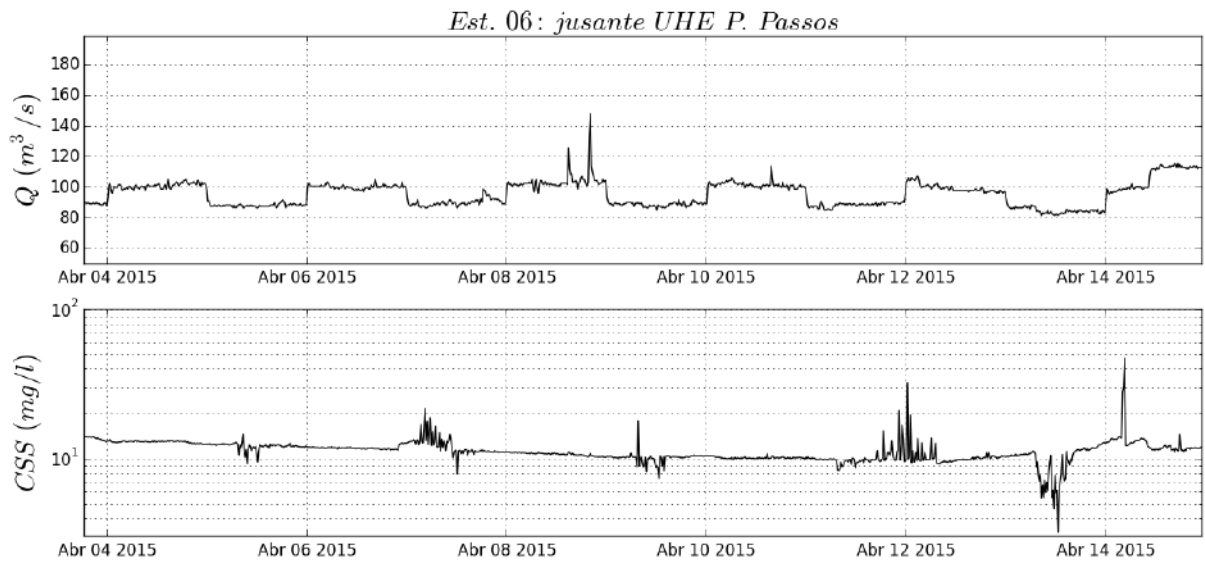


Figura 6.40: Detalhe mostrando o impacto da picos menores de vazão na concentração de sólidos suspensos sem tratamento coletados a cada 15 minutos na estação 6, a jusante da UHE Pereira Passos.

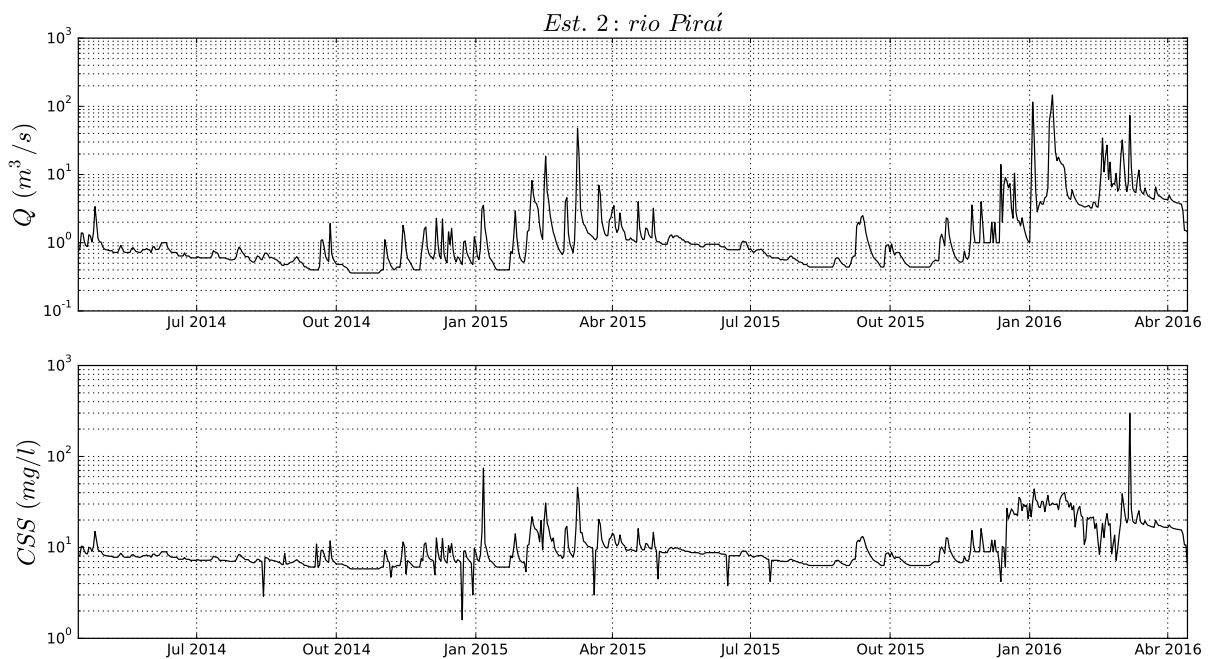


Figura 6.41: Séries completas da vazão média diária e concentração média diária de sólidos suspensos para estação 2, no rio Pirai, para o período de 15/04/14 a 14/14/16.

desprezível na maior parte do tempo, sendo que mesmo os eventos mais expressivos, não ultrapassaram 2.000 t/d (Figura 6.42). No caso do reservatório de Lajes, a descarga de sólidos suspensos é ainda menor, tornando-se, na prática, desprezível, durante todo ano (Figura 6.44). Na realidade, a produção de sedimento suspenso da bacia do Pirai e do Ribeirão Lajes foram retidas via túnel de Tocos ou diretamente



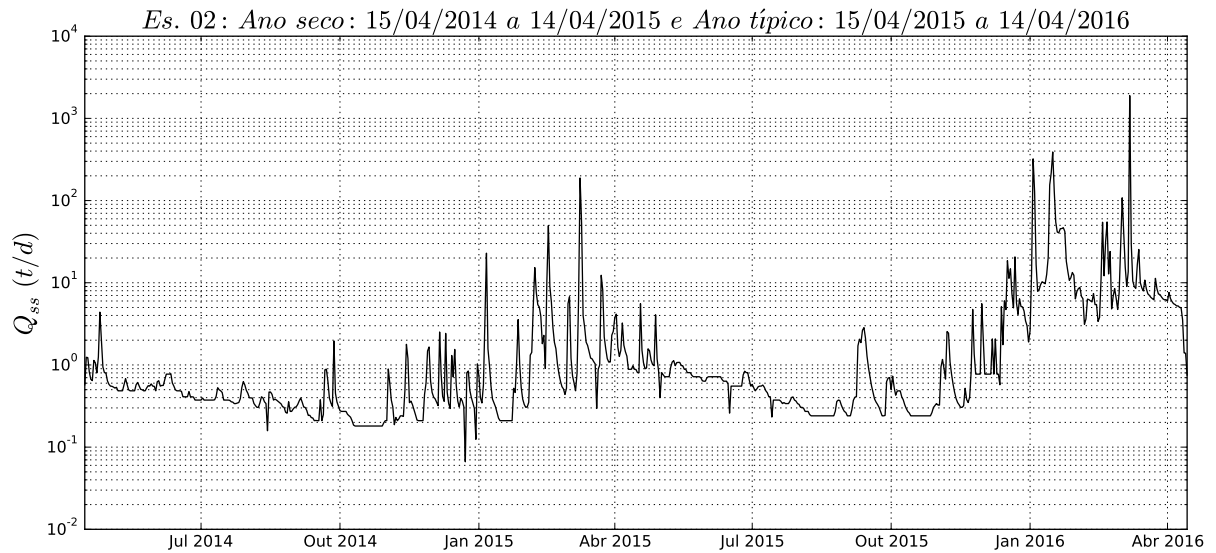


Figura 6.42: Série temporal da descarga de sólidos suspensos  $Q_{ss}$  do rio Piraí (Est. 2) para o ano seco extremo (2014/15) e ano típico (2015/16).

no reservatório de Lajes.

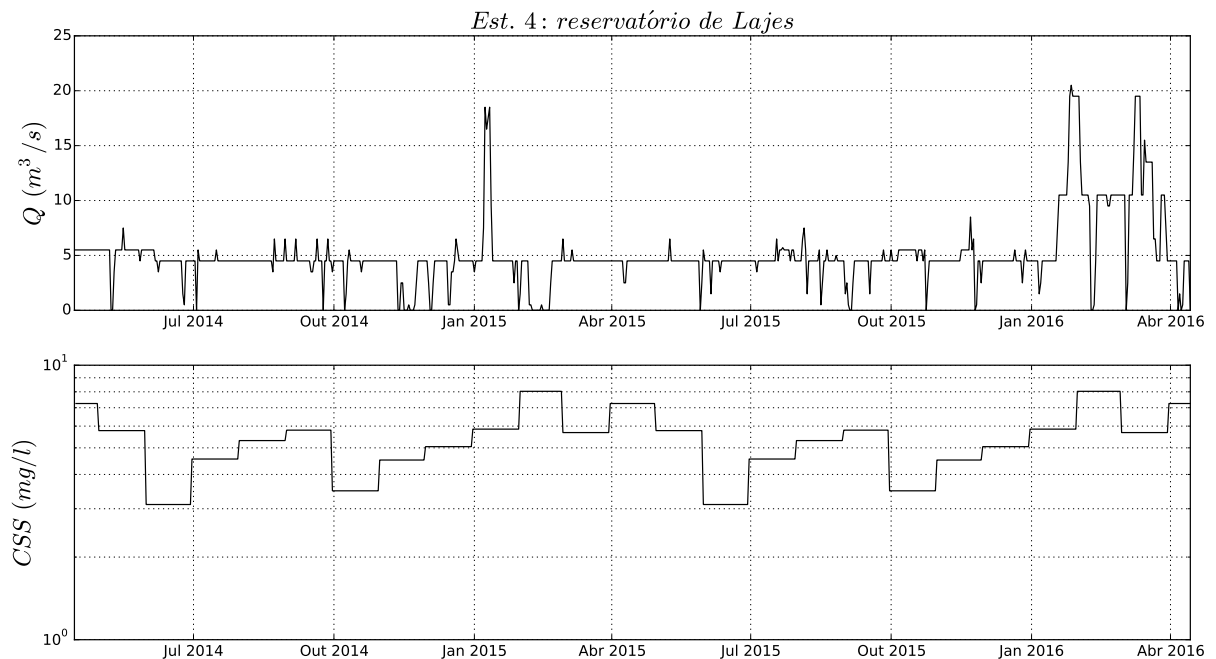


Figura 6.43: Séries completas da vazão média diária e concentração média diária de sólidos suspensos para estação 4, no Clube de Pesca Piraí do reservatório de Lajes, para o período de 15/04/14 a 14/14/16.

Devido à crise hídrica e à posterior necessidade de recuperação do volume dos reservatórios a montante de Santa Cecília, esses dois anos foram caracterizados por vazões médias anuais abaixo da média de longo termo correspondente. Por outro lado, em termo de CSS os anos são bem distintos, sendo que a estação chuvosa do verão 2015-2016 se aproximou dos padrões médios observados nas estações plu-

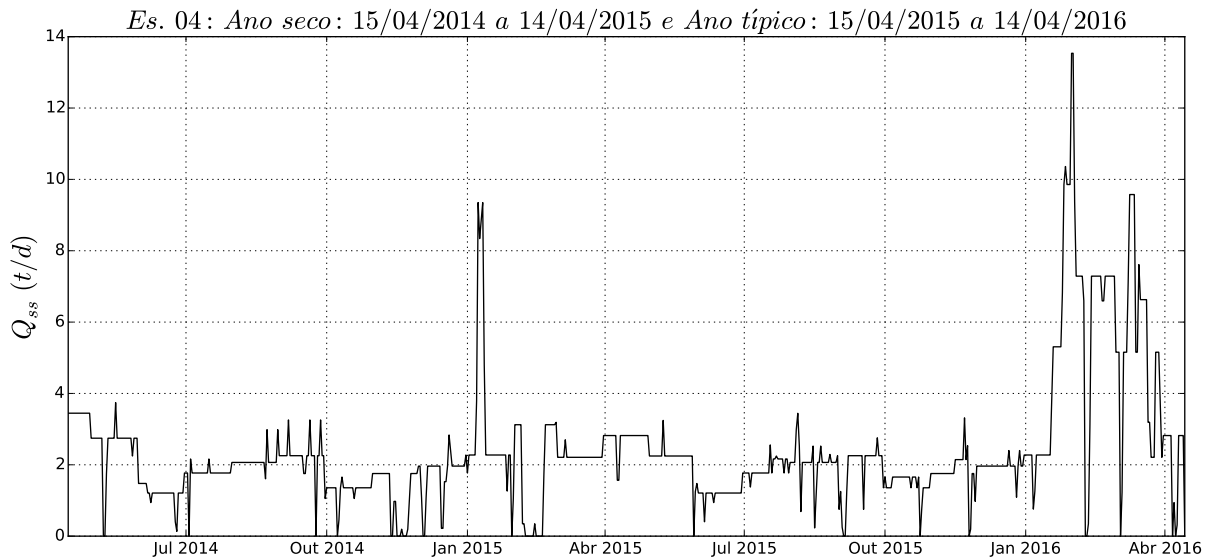


Figura 6.44: Série temporal da descarga de sólidos suspensos  $Q_{ss}$  do reservatório de Lajes (Est. 4) para o ano seco extremo (2014/15) e ano típico (2015/16).

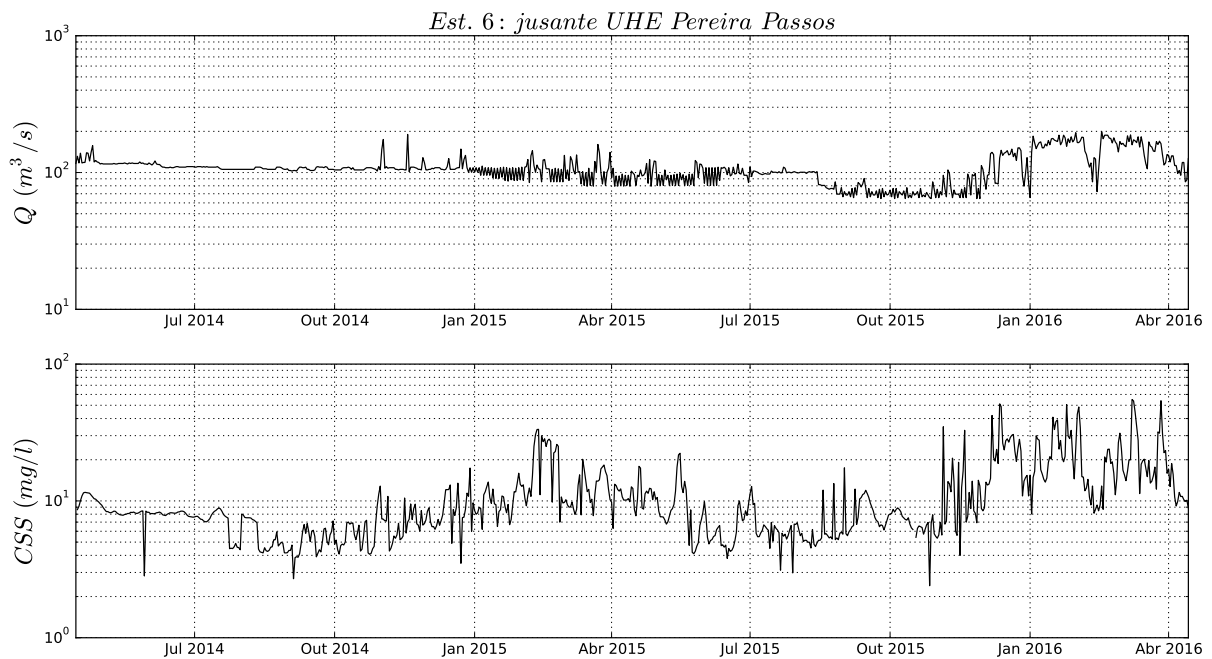


Figura 6.45: Séries completas da vazão média diária e concentração média diária de sólidos suspensos para estação 6, a jusante da UHE Pereira Passos, para o período de 15/04/14 a 14/14/16.

viométricas da região (Figura 6.46). A diferença mais expressiva ocorreu nos meses de dezembro de 2015 e janeiro de 2016 (Figura 6.47).

A descarga anual de sólidos suspensos foi calculada pela Equação 5.11. No ano historicamente seco, entre 15/04/2014 e 14/04/2015, o  $Q_{ss}$  do túnel da UEL Sta. Cecília foi de  $72.701 \pm 5.402$  t/ano; do rio Piraí foi de  $646 \pm 384$  t/ano; e da defluência de Lajes foi de  $727 \pm 627$  t/ano. Juntos somaram uma entrada de  $74.074 \pm 5.452$

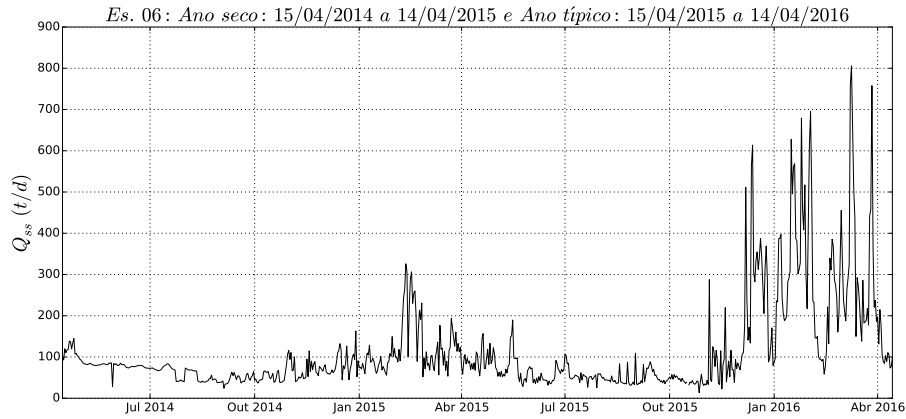


Figura 6.46: Série temporal da descarga de sólidos suspensos  $Q_{ss}$  a jusante UHE Pereira Passos (Est. 6) para o ano seco extremo (2014/15) e ano típico (2015/16).

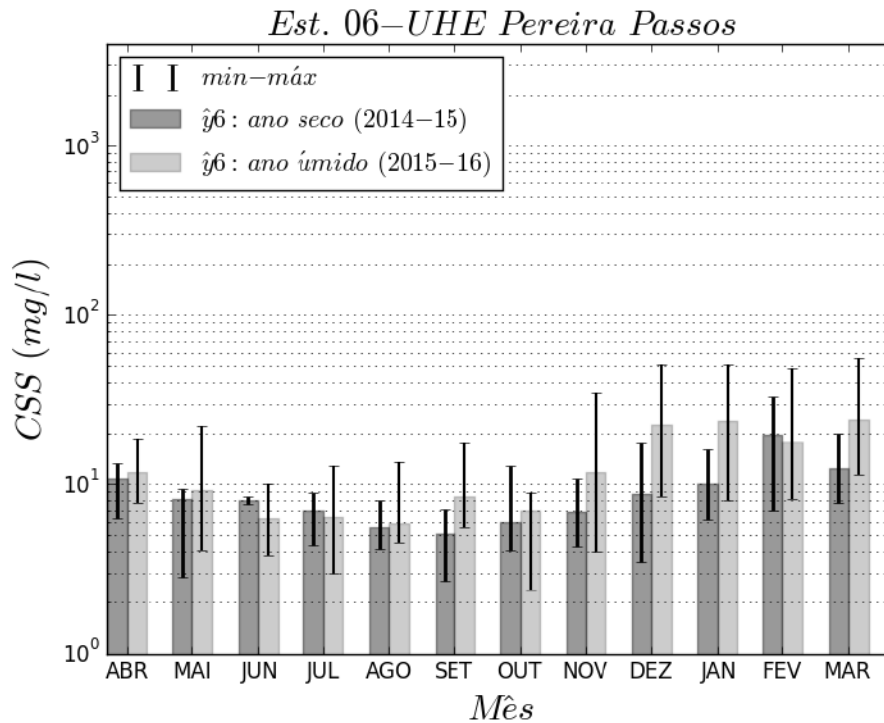


Figura 6.47: Gráfico em barra da CSS média mensal a jusante da UHE Pereira Passos (Est. 6) para o ano seco extremo (2014/15) e ano úmido típico (2015/16).

t/ano no sistema de transposição (Tabela 6.13). A saída pela UHE Pereira Passos, por sua vez, apresentou uma descarga anual de  $30.411 \pm 4.716$  t/ano (Tabela 6.13).

No ano típico, entre 15/04/2015 e 14/04/2016, a  $Q_{ss}$  foi de  $128.634 \pm 3.877$  t/ano, do rio Piraí foi de  $4.914 \pm 681$  t/ano e da defluência de Lajes foi de  $1.005 \pm 712$  t/ano. Juntos somaram uma entrada de  $134.553 \pm 4.000$  t/ano ao sistema de transposição (Tabela 6.13). A saída pela UHE Pereira Passos, por sua vez, apresentou uma descarga anual de  $51.244 \pm 3.961$  t/ano (Tabela 6.13). O maior incremento, em relação ao ano seco, ocorreu nos meses de dezembro, janeiro e março (Figura 6.48).

Tabela 6.13: Resumo das descargas anuais de sólidos suspensos ( $Q_{ssi}$ ) das estações 1, 2, 4, 6 e somatório afluente ( $Q_{ssa}$ ), retenção anual ( $S_{ss}$ ) e eficiência de retenção (ER).

	Ano seco	Ano típico
$Q_{ss1}$ (t/ano)	72.701±5402	128.634±3.877
$Q_{ss2}$ (t/ano)	646±384	4.914±681
$Q_{ss4}$ (t/ano)	727±627	1.005±712
$Q_{ssa}$ (t/ano)	74.074±5.452	134.553±4.000
$Q_{ss6}$ (t/ano)	30.411±4.716	51.244±3.961
$S_{ss}$ (t/ano)	43.663±7.209	83.310±5.629
ER (%)	59±17	62±7

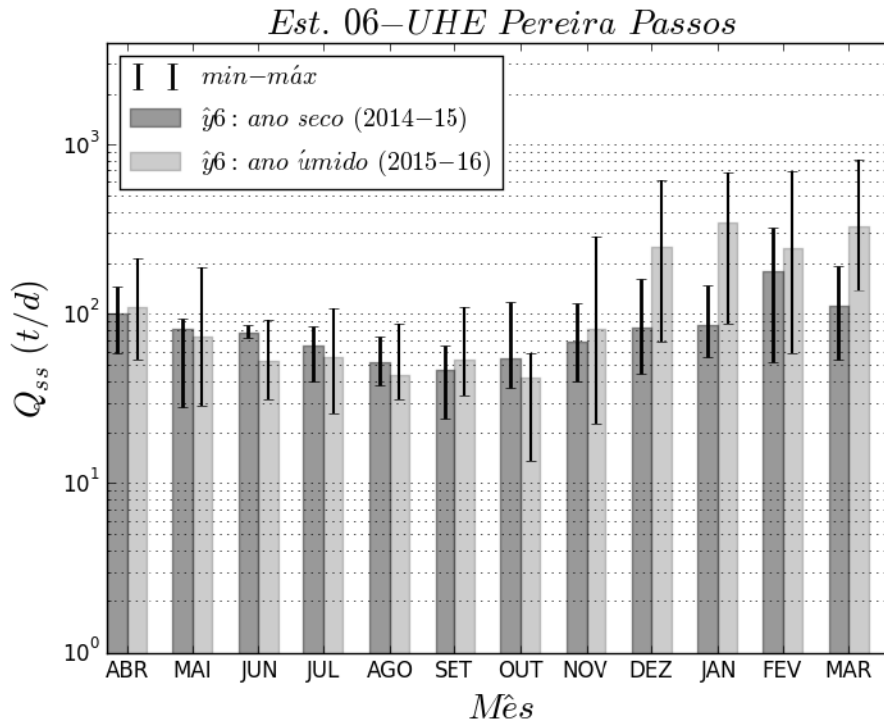


Figura 6.48: Gráfico em barra da  $Q_{ss}$  média mensal a jusante da UHE Pereira Passos (Est. 6) para o ano seco extremo (2014/15) e ano típico (2015/16).

As Figura 6.49 e Figura 6.50 mostraram o impacto mensal da retenção dos sólidos suspensos, pelos reservatórios da transposição, que tende a ser mais intensa nos primeiros meses da estação chuvosa, quando o volume desses reservatórios ainda está preenchido por água com baixas concentrações de sólidos suspensos da estação seca. Para o ano seco, a retenção de sólidos suspensos, nos reservatórios do sistema de transposição, foi de  $43.663 \pm 7.209$  t/ano, resultando em uma eficiência de retenção de sólidos suspensos de  $59 \pm 17\%$  (Tabela 6.13). Para o ano típico, a retenção de sólidos suspensos nos reservatórios do sistema de transposição, foi de

$83.310 \pm 5.629$  t/ano, resultando em uma eficiência de retenção de sólidos suspensos de  $62 \pm 7\%$  (Tabela 6.13). O ano histórico, marcado pela crise hídrica, apresentou uma redução na retenção de sedimento no sistema de transposição, de 48%.

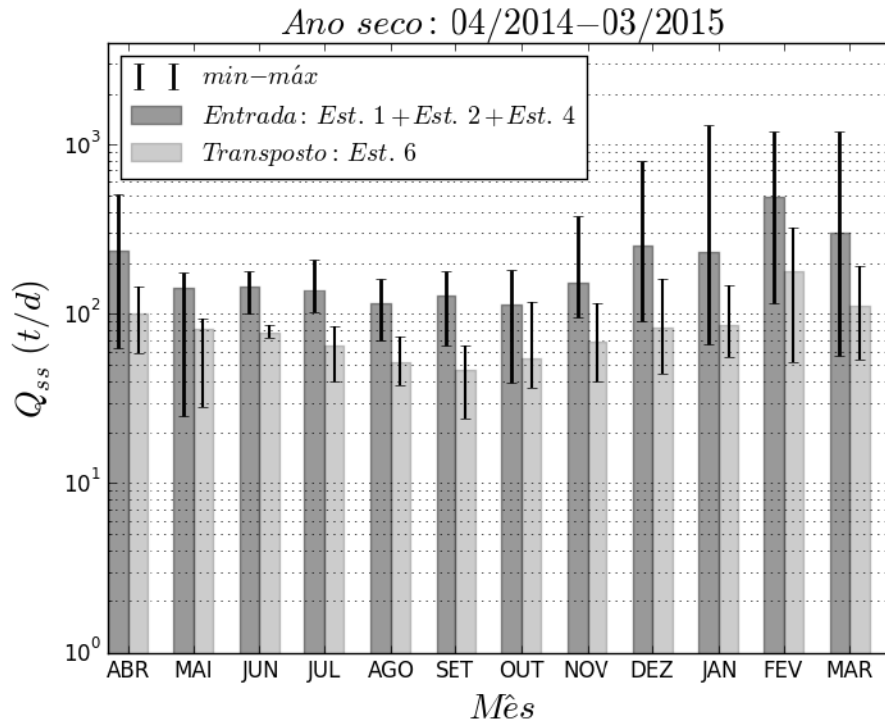


Figura 6.49: Gráfico em barra da  $Q_{ss}$  média mensal comparando a entrada ( $Q_{ss1} + Q_{ss2} + Q_{ss4}$ ) e a saída ( $Q_{ss6}$ ) do sistema TPPG para o ano seco extremo (2014/15).

### 6.6.5 Discussão

A estimativa de descarga de sólidos suspensos defluentes, pela UHE Pereira Passos, obtida por MOLISANI *et al.* (2006), foi cinco vezes maior do que a encontrada entre 15/04/15 e 14/04/16. No caso da estimativa obtida pela BIRD-MPO/SEPURB/PQA-ABC-PNUD (1997), o valor foi 6 vezes maior do que o encontrado no presente estudo. Essa diferença se torna ainda maior se considerarmos o ano histórico de crise hídrica, entre 15/04/14 e 14/04/15, em que o valor sobe nove vezes, para a estimativa de MOLISANI *et al.* (2006) e 11 vezes, para a estimativa de BIRD-MPO/SEPURB/PQA-ABC-PNUD (1997). A falta de detalhamento, em relação às fontes de dados, dificulta uma análise mais criteriosa sobre a razão dessas sobrestimativas. No caso do estudo de MOLISANI *et al.* (2006), a estimativa é penalizada pelo valor de CSS média, usado na entrada da transposição (118 mg/l), um valor muito acima do esperado. O ano típico e o ano seco obtiveram valores de ER menores do que o estimado pelo estudo de MOLISANI *et al.* (2006) (Tabela 6.14).

Os reservatórios de Tocos e Santana são os mais críticos quanto ao assorea-

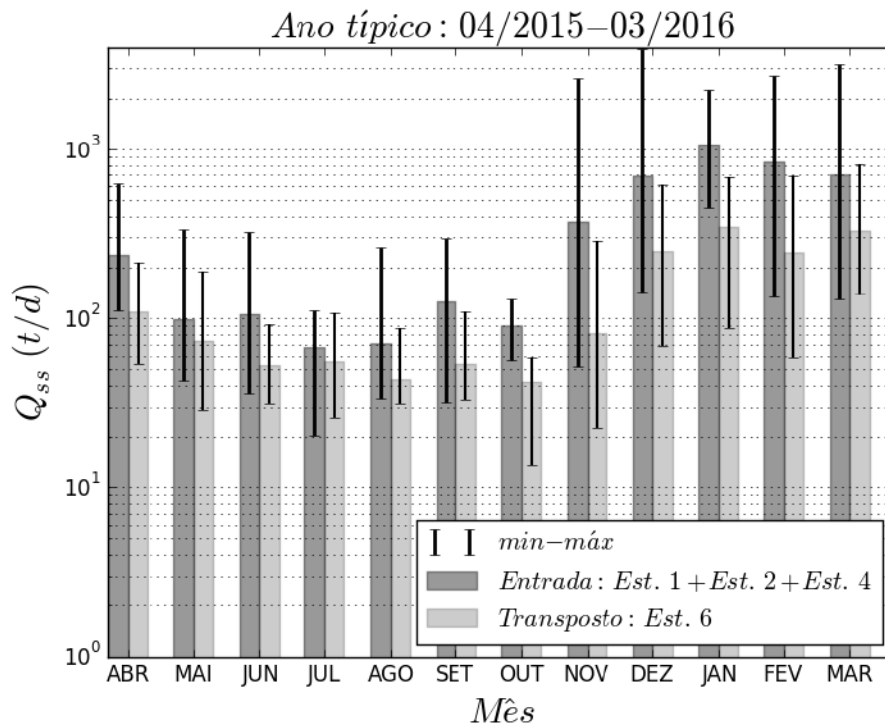


Figura 6.50: Gráfico em barra da  $Q_{ss}$  média mensal comparando a entrada ( $Q_{ss1} + Q_{ss2} + Q_{ss4}$ ) e a saída ( $Q_{ss6}$ ) do sistema TPPG para o ano seco extremo (2014/15).

mento (Figura 3.5). Segundo comunicação feita pela FEEMA (1985), com a Light Energia, o reservatório já havia perdido, na época, 50% do seu volume para o assoreamento (Figura 6.51). Segundo apresentação técnica da Light sobre manejo de macrófita, entre 1975 e 1995, foram realizadas algumas campanhas de dragagem em função, principalmente, da perda de carga no reservatório de Santana (FERREIRA e R.O., 2014). Ao todo, foram dragados em torno de 5 milhões de  $m^3$  de sedimentos (FERREIRA e R.O., 2014). Além dos sedimentos, o reservatório sofre ainda com o crescimento elevado de plantas aquáticas, que obriga a manter serviços permanentes de contenção, com barreiras e remoções com guinchos (Figura 6.52).



Figura 6.51: Pontos assoreados no reservatório de Santana (extraído de Ferreira e Ferreira (2014) FERREIRA e R.O. (2014))

Tabela 6.14: Comparação das estimativas de descarga de sólidos suspensos defluente da UHE P. Passos, retenção e eficiência de retenção obtidas pela BIRD-MPO/SEPURB/PQA-ABC-PNUD (1997), Molisani *et al* (2006) e tese (seco e típico). NI: não informado.

	BIRD... (1997)	Molisani <i>et al.</i> (2006)	Ano seco 2014-15	Ano típico 2015-16
$\bar{Q}_1$ (m <sup>3</sup> /s):	NI	160	114	107
$\bar{Q}_2$ (m <sup>3</sup> /s):	NI	7	1	4
$\bar{Q}_4$ (m <sup>3</sup> /s):	NI	9	4	6
$\bar{Q}_6$ (m <sup>3</sup> /s):	168	175	108	108
$Q_{ss6}$ (t/ano):	322.000	270.000	30.411±4.716	51.244±3.961
$S_{ss}$ (t/ano):	NI	980.000	43.663±7.209	83.310±5.629
ER (%):	NI	78	59±17	62±7



Figura 6.52: Remoção de macrófitas no trecho médio do reservatório de Santana (foto a esquerda) e na tomada da UEL Vigário (foto a direita) (extraído de FERREIRA e R.O. (2014))

A bacia do Piraí é marcada pelas pastagens e pelos loteamentos, em avançado estado erosivo, especialmente a jusante do reservatório de Tocos. Durante as campanhas de campo, foi possível registrar a ocorrência de obras de corte e de terraplanagem nas encostas próximas à margem do rio Piraí, expondo grandes quantidades de terra desagregada que foram facilmente transportadas durante os eventos de chuva (Figura 6.53).

Um impacto desse tipo foi registrado durante a campanha de campo do dia 27/11/14, às 14 horas, no rio Piraí. Na noite anterior, entre as 18 horas do dia 26/11/14 e a 0 horas do dia 27/11/14, choveu 34 mm, segundo a estação pluviométrica de Mendes (31955). Apesar da estação 2 ser atendida pela estação pluviométrica Fazenda Nova Esperança (34750000), a última não estava funcionando corretamente nesse período, registrando valor zero durante os dois dias sabidamente chuvosos. No momento da coleta, sob chuva leve (1 mm/h), a CSS, na estação 2, era de apenas 7 mg/l e, logo depois da obra erodida, que se localizava cerca de 1 km a jusante da estação 2, a CSS subia para 48 mg/l (Figura 6.53 e Figura 6.54).



Eventos erosivos do tipo produzido por chuva intensa que aumenta a CSS, geralmente, coincidem com a cheia no rio Pirai (Figura 6.55). Nessas condições, por recomendação do ONS, a operação do sistema é alterada, reduzindo o bombeamento na UEL Sta. Cecília. A diminuição do bombeamento, na UEL Sta. Cecília, gera deplecionamento do reservatório, resultando na diminuição ou desaparecimento do longo remanso ( 7,5 km), que normalmente separa o trecho fluvial do rio Pirai e a tomada da UEL Vigário. Nessas condições excepcionais, um percentual maior de sólidos suspensos da cheia do Pirai chega ao rio Guandu.



Figura 6.53: Erosão por chuva agindo na obra de corte e terraplanagem de uma encosta às margens direita do rio Pirai, a cerca de 1 km a jusante da estação 2, foto tirada em 27/11/14, as 14 horas, na beira da estrada RJ-145.



Figura 6.54: Fotos tiradas em 27/11/14 mostrando impacto na CSS no rio Pirai devido a erosão de uma obra na encosta próxima a margem direita: (a) estação 2, logo a montante da obra (7 mg/l) (b) logo a jusante da obra (48 mg/l).

Na sedimentação diferencial, as colisões entre partículas são ocasionadas pelas diferentes velocidades de sedimentação, em que as partículas ou flocos maiores e mais velozes colidem e se agregam com as menores e mais lentas (LICK *et al.*, 1993). Este mecanismo de floculação é especialmente relevante em reservatórios





Figura 6.55: Fotos mostrando uma condição típica do rio Pirai e uma condição de cheia após um pico de chuva de 35 mm/h entre 21:00 e 22:00.

com baixos gradientes de velocidades e de turbulência (TSAI *et al.*, 1987; LI *et al.*, 2014).

Apesar da dificuldade em se conservar flocos, em amostras de água durante a coleta, os resultados obtidos no presente estudo, parecem corroborar com a hipótese de que o fenômeno da sedimentação diferencial esteja agindo sobre as partículas em suspensão. De fato, observou-se que, quando a mistura passava pelos reservatórios de Santana, Vigário e P. Coberta, a participação relativa das classe maiores que 63  $\mu\text{m}$ , correspondentes aos flocos, foi diminuindo (Figura 6.36). Além disso, os flocos maiores foram observados no maior dos três reservatórios, o reservatório de Vigário (363,1  $\mu\text{m}$ ), possivelmente, devido ao maior tempo de exposição ao fenômeno de sedimentação diferencial. Estudos complementares futuros, com sensores capazes de medir flocos *in situ*, podem avaliar mais precisamente essa hipótese.

Além das condições hidrodinâmicas, a floculação sofre influência de parâmetros de qualidade de água, tais como pH e matéria orgânica. O aumento do tamanho de floco devido à diminuição dos valores de pH, é reportado em experimentos em laboratório (MIETTA *et al.*, 2009; MIETTA, 2010). O efeito positivo da presença da matéria orgânica e da atividade microbológica, no aumento do tamanho dos flocos, também é conhecido (MIETTA *et al.*, 2009; MIETTA, 2010; MAGGI e TANG, 2015).

Em termos de qualidade de água, sabe-se que os reservatórios de Santana e P. Coberta tendem a ser ácidos, chegando a valores de pH de até 5,4 (Tabela 6.15). Os experimentos de MIETTA *et al.* (2009) mostraram que valores de pH, a partir da faixa de 6, induzem a um forte aumento da floculação. Logo, o pH é um potencial candidato, no controle da floculação, a ser investigado, principalmente nos reservatórios de Santana e P. Coberta.

Outra variável causal relevante é a presença das macrófitas, que se proliferam intensamente nos reservatórios de Santana e Vigário. Suas raízes se tornam substrato para biofilmes, ricos em polissacarídeos que podem adsorver partículas em

Tabela 6.15: Parâmetros de qualidade de água coletados nos reservatórios entre janeiro e fevereiro 2008. Mediana e [mín.- máx.] (extraído de ARAÚJO e ROCHA (2012))

Variável	res. Santana	res. Vigário	res. P. Coberta
pH	6,9 [6,7-8]	7,1 [6,8-8,6]	5,8 [5,4-8,1]

suspensão. A retirada quase diária de grandes quantidades de macrófitas pela Light é um potencial mecanismo de remoção desse material particulado aderido às raízes (Figura 6.52). A produção microbiológica, em um meio rico em nutrientes, também pode ser uma importante fonte de cadeias de polissacarídeos, que ao se aderirem à superfície das partículas em suspensão aumentam sua capacidade de formar agregados (MIETTA *et al.*, 2009; MIETTA, 2010; MAGGI e TANG, 2015). Entretanto, os valores baixos de CSV parecem indicar que a floculação por essa via, não foi significativa nos três reservatórios.

## 6.7 Conclusões

A transposição de bacias do Paraíba do Sul - Piraí - Guandu (TPPG) é responsável pela transposição para bacia do Guandu de  $51.244 \pm 3.961$  t/ano de sólidos, entre 15/04/15 e 14/04/16. Durante a crise hídrica, entre 15/04/14 e 14/04/15, esse valor caiu para  $30.411 \pm 4.716$  t/ano.

A eficiência de retenção do conjunto de reservatórios, formado por Santana, Vigário e Ponte Coberta, foi de 59 %, durante a crise hídrica, e de 62 %, no ano seguinte.

Atualmente, o reservatório de Vigário é o principal responsável pela retenção de sólidos suspensos no sistema TPPG.

Em termos de CSS mediana, as principais descargas afluentes ao sistema, UEL Sta. Cecília e rio Piraí, foram caracterizadas por CSS entre 22 e 25 mg/l e a saída pela UHE Pereira Passos foi caracterizada por CSS mediana de 9 mg/l.

Em termos granulométricos, as principais descargas afluentes ao sistema, UEL Sta. Cecília e rio Piraí, foram caracterizadas por  $d_{50}$  entre 7 e 8  $\mu\text{m}$ , com  $d_{90}$  igual ou maior que 30  $\mu\text{m}$  e a saída pela UHE Pereira Passos foi caracterizada por  $d_{50}$  igual a 5  $\mu\text{m}$  e  $d_{90}$  igual a 20  $\mu\text{m}$ . A faixa de classe de tamanho mais retida nos reservatórios, estava entre 8 e 120  $\mu\text{m}$ .

Práticas como terraplanagem, desmatamento, estradas rurais e corte no talude, encontradas nos recentes loteamentos, localizados próximos à margem do rio Piraí, estão modificando os padrões de CSS no rio, chegando a produzir variações de uma ordem de grandeza na CSS durante um evento de chuva intensa.

# Capítulo 7

## Estimativa da descarga de sólidos suspensos afluente ao canal de São Francisco

### 7.1 Introdução

O desconhecimento sobre uma estimativa precisa da descarga fluvial de sólidos suspensos, que chega na baía de Sepetiba, resultou em intervenções de engenharia ineficientes, como no caso da recuperação ambiental da praia de Sepetiba.

Em termos de estudos prévios, destacam-se os estudos realizados por VINZON e CASSAR (1998) e GALLO *et al.* (2012), na década de 90. Nesses estudos nota-se que, no trecho de captação da ETA-Guandu, ocorriam variações horárias na turbidez (Figura 7.35). A principal hipótese levantada, nesses estudos, seria a ressuspensão do leito de Ponte Coberta ou da calha do Guandu, devido aos picos da vazão, na ordem de 300 m<sup>3</sup>/s, resultantes da operação UHE Pereira Passos. ETEP/ECOLOGUS/SM (1998) e MOLISANI *et al.* (2006) a partir de modelos empíricos estimaram que na baía de Sepetiba, chegavam, por ano, respectivamente, 573.000 t e 851.000 t de sólidos pelo canal de São Francisco. Estimativas atualizadas e mais precisas, baseadas na medição sistemática de CSS em uma resolução temporal adequada seriam uma relevante contribuição para a compreensão do aporte fluvial de sólidos suspensos na baía de Sepetiba.

### 7.2 Objetivo

O objetivo deste capítulo é estimar, a partir de dados observacionais coletados em um ano historicamente seco (15/04/14 - 14/04/15) e em um ano com regime de chuvas típico (15/04/15 - 14/04/16), o percentual de colaboração da TPPG, na

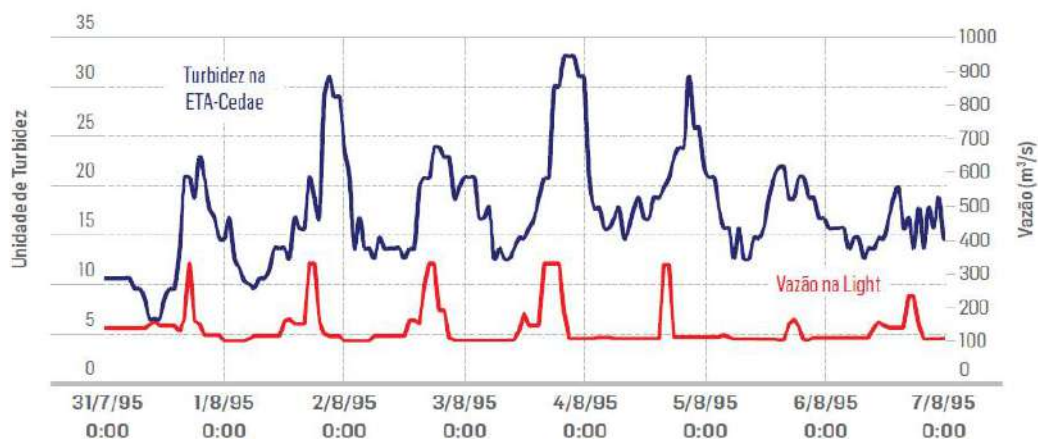


Figura 7.1: Série de vazão defluente da UHE Pereira Passos e turbidez na captação da ETA-Guandu para o período de 31/07/1995 a 07/08/1995 (extraído de GALLO *et al.* (2012))

descarga anual de sólidos suspensos, que chega à baía de Sepetiba, pelo canal de São Francisco. Essa estimativa deve considerar também o impacto de outros usuários na distribuição dessa descarga afluyente para as três fozes da bacia do Guandu.

### 7.3 Seleção e coleta de dados

As variáveis selecionadas para o pré-processamento se encontram resumidas na Tabela 7.1 e georreferenciados na Figura 7.2. Este capítulo contou com seis estações, monitoradas no presente estudo. A descrição das estações 6, 7, 8, 9, 10, 11 se encontra no capítulo 4.

## 7.4 Pré-processamento

### 7.4.1 Série de vazão média horária

As séries de vazões médias horárias, a jusante da UHE Pereira Passos (est. 6) e da ETA-Guandu (est. 9) foram obtidas através da medição de nível feitas pelas sondas RBR, e, convertidas em vazão pelas curvas-chave descritas no capítulo 4 (Figura 7.3 e Figura 7.4). As falhas nas medições da estação 6, foram preenchidas com dados da estação 59311000, extraídos do Hidroweb. Na estação 9, as falhas foram preenchidas com medições de nível da estação Guandu-Seropédica (Inea), convertidos em vazão pela curva-chave descrita no capítulo 4 (Figura 7.4).

Para preencher os trechos com falha de medição, que persistiram à imputação de dados do Inea, foi necessária a criação de um modelo de imputação de dados. Esse modelo se baseou na dependência e na correlação positiva da vazão da estação

Tabela 7.1: Estações selecionadas (INMET e INEA) e estação criada no presente estudo (LDSC). P: precipitação (mm/d). Nível: nível da água (m). Q: vazão (m<sup>3</sup>/s). CST: concentração de sólidos totais suspensos (mg/l). CSS/F/V: concentração de sólidos suspensos, fixos e voláteis (mg/l). GRA: granulometria ( $\mu$ m). Qss: descarga de sólidos suspensos (t/d).

Dado	Código	Início/Fim	$\Delta t^{(a)}$	Lat.	Lon.	Oper.	Fonte <sup>(b)</sup>
P	86878	2014/16	H	-22,7579	-43,6848	INMET	III
P	NI	2014/16	15 min.	-22,8144	-43,6264	INEA	II
Nível	6	2014/16	15 min.	-22,6833	-43,8177	LDSC	I
Nível	NI	2014/16	15 min.	-22,8144	-43,6264	INEA	II
Nível	9	2014/16	15 min.	-22,8144	-43,6264	LDSC	I
Q	11	2014/16	V	-22,8425	-43,6088	LDSC	I
Q	12	2015	V	-22,8404	-43,6225	LDSC	I
Q	13	2015	V	-22,8727	-43,6762	LDSC	I
CST	LG350	1990/14	V	-22,6824	-43,8167	INEA	II
CST	LG351	1980/14	V	-22,6922	-43,7843	INEA	II
CST	GN201	1980/14	V	-22,6572	-43,6644	INEA	II
CST	GN200	1986/14	V	-22,8144	-43,6264	INEA	II
CST	SF080	1980/14	V	-22,8839	-43,7189	INEA	II
CST	GM180	1980/13	V	-22,8727	-43,6762	INEA	II
CSS/F/V	6	2014/16	V	-22,6833	-43,8177	LDSC	I
CSS/F/V	7	2014/16	V	-22,6413	-43,7131	LDSC	I
CSS/F/V	8	2014/16	V	-22,7278	-43,6408	LDSC	I
CSS/F/V	9	2014/16	V	-22,8144	-43,6264	LDSC	I
CSS/F/V	10	2015	V	-22,8839	-43,7189	LDSC	I
CSS/F/V	11	2015	V	-22,8425	-43,6088	LDSC	I
CSS/F/V	12	2015	V	-22,8404	-43,6225	LDSC	I
CSS/F/V	13	2015	V	-22,8727	-43,6762	LDSC	I
Turbidez	6	2014/16	15 min.	-22,6833	-43,8177	LDSC	I
Turbidez	9	2014/16	15 min.	-22,8144	-43,6264	LDSC	I
GRA	1	2014/16	V	-22,5104	-43,8253	LDSC	I
GRA	6	2014/16	V	-22,6833	-43,8177	LDSC	I
GRA	9	2014/16	V	-22,8144	-43,6264	LDSC	I
Qss	1	2014/16	D	-22,5104	-43,8253	LDSC	I
Qss	6	2014/16	D	-22,6833	-43,8177	LDSC	I

<sup>(a)</sup> Taxa de amostragem: D - diário, H - horário, V - variável.

<sup>(b)</sup> I: Presente estudo; II: INEA; III: INMET.

NI: Não Informado.

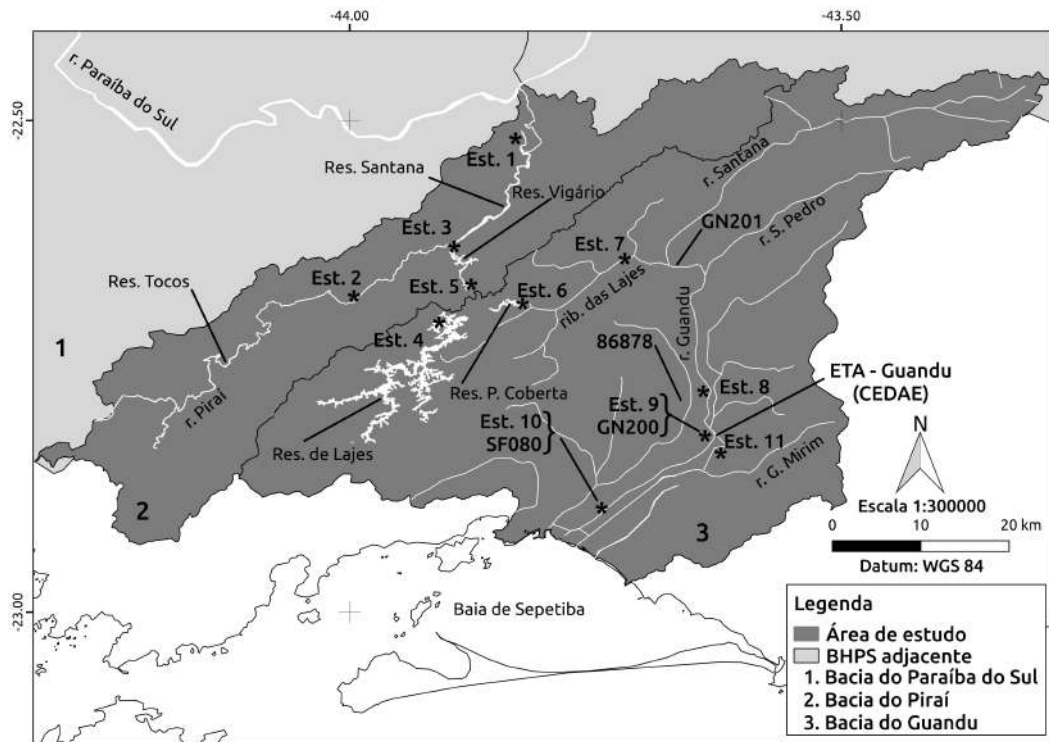


Figura 7.2: Área de estudo.

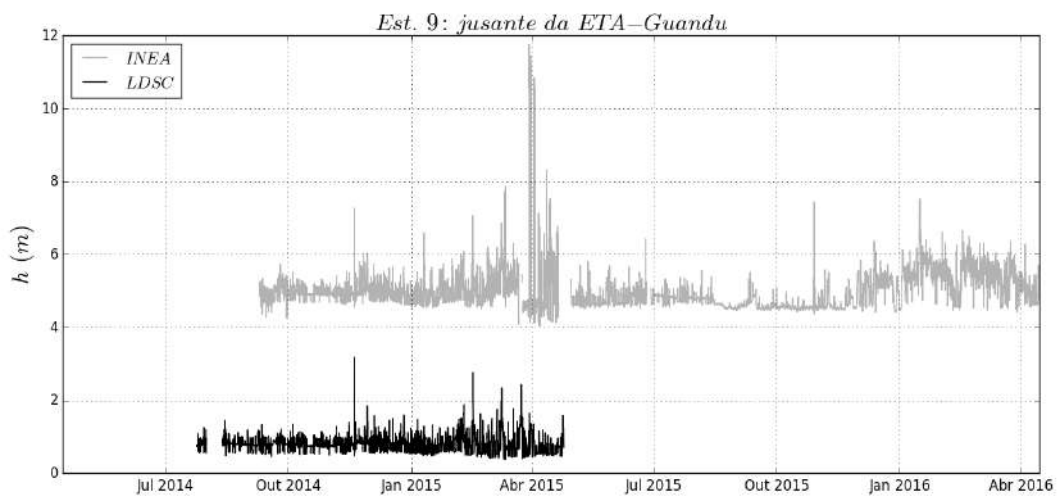


Figura 7.3: Série de nível da estação 9 e estação Guandu-Seropédica (Inea).

9, em relação à estação 6. Primeiramente, foi necessário identificar o atraso entre as duas séries, que, pela correlação cruzada dos dados normalizados, foi de 8 horas (Figura 7.5 e Figura 7.6). Corrigido o atraso, a série da diferença entre as estações 6 e 9 foi calculada (Figura 7.7). A visível estacionalidade da série da diferença aponta uma diferença média constante de  $45,12 \text{ m}^3/\text{s}$ , que seria um valor esperado e compatível com a captação da Cedae, somada a outros pequenos usuários a montante da estação 9. Essa relação foi aplicada na imputação de dados, nesses trechos, que não foram cobertos pelas medições do presente estudo e pelas do Inea, consistindo

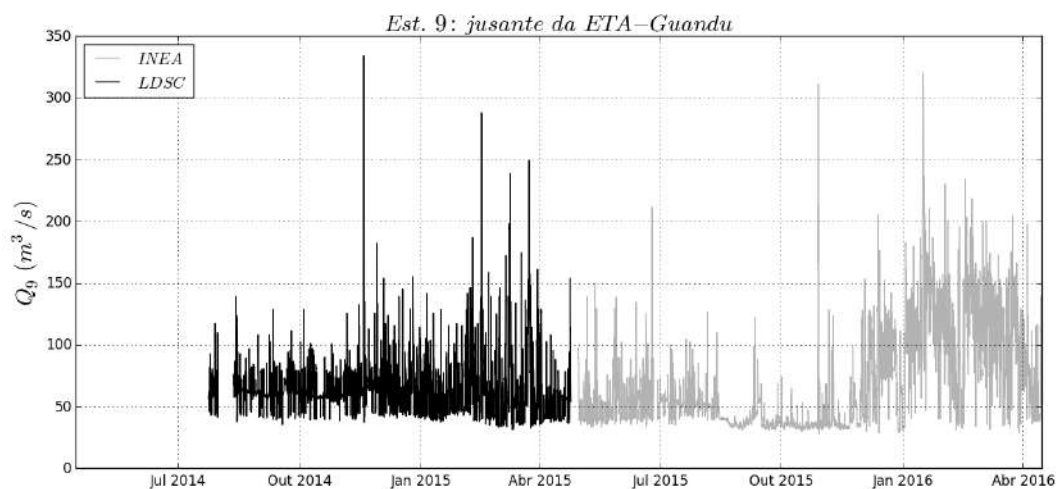


Figura 7.4: Série de nível da estação 9 e estação Guandu-Seropédica (Inea) convertida em vazão.

em um modelo que imputou dados de vazão horária da estação 6, descontados da média da diferença entre a série horária das estações 6 e 9 ( $45,12 \text{ m}^3/\text{s}$ ) (Figura 7.4).

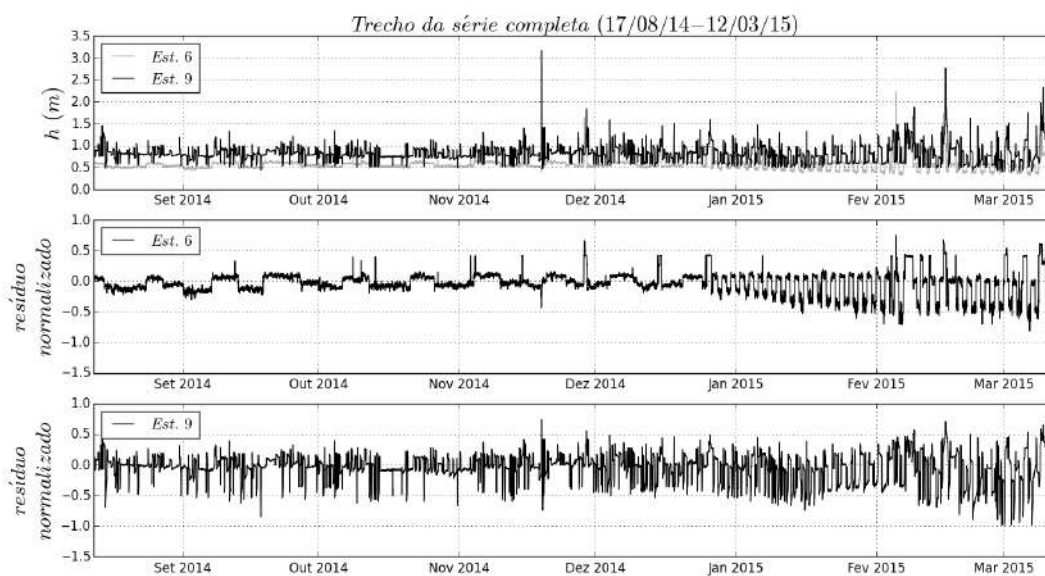


Figura 7.5: Normalização pelo método  $z$ -score da série de nível ( $h$ ) medida nas estações 6 e 9.

## 7.4.2 Série de concentração de sólidos suspensos

O trecho da bacia do Guandu, a jusante da UHE Pereira Passos é composto por cinco estações principais de medição de concentração de sólidos suspensos (Tabela 7.3). Além dessas, foram incorporadas seis estações do Inea (Tabela 7.3).

Os conjuntos de dados de CSS, coletados em cada estação no presente estudo, encontram-se enviesados tanto na própria estação, com maior esforço amostral re-

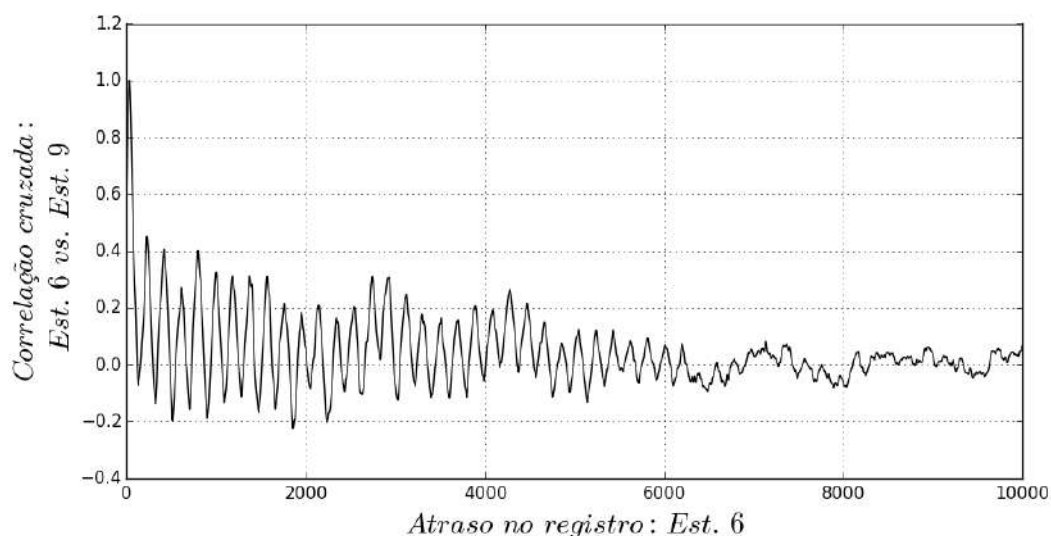


Figura 7.6: Correlação cruzada da série normalizada de nível da estação 6 ( $Q_6$ ) e da estação 9 ( $Q_9$ ).

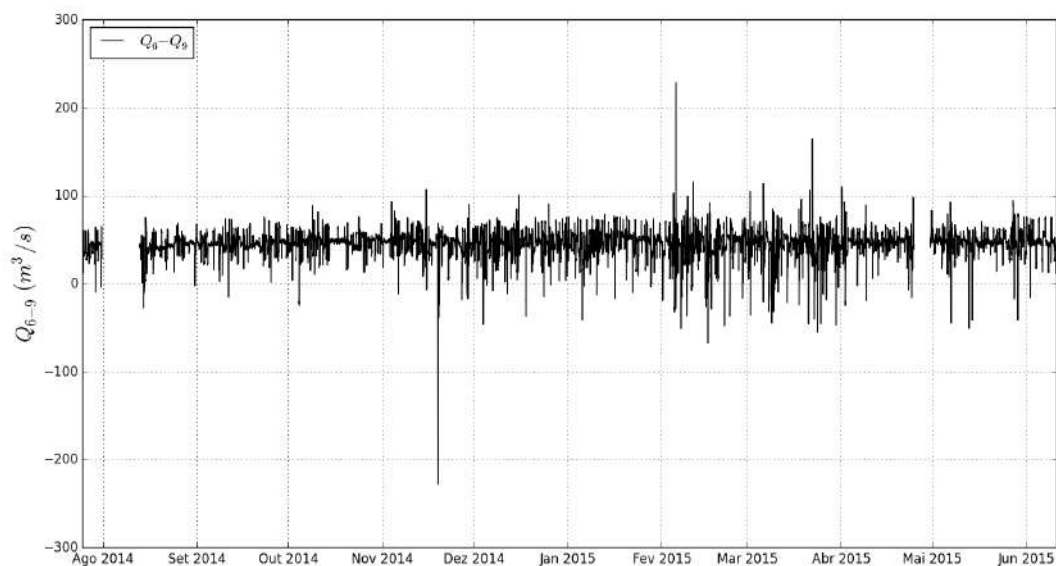


Figura 7.7: Diferença entre a série de vazão média horária da estação 6 ( $Q_6$ ) e estação 9 ( $Q_9$ ).

alizado no período chuvoso, quanto entre as estações, com algumas estações mais amostradas (est. 6 e 9) do que outras (est. 7, 8 e 10)(Figura 7.9). Em relação aos dados disponibilizados pelo Inea, esse conjunto se diferencia pelo longo período amostrado, iniciando seus registros na década de 80, o que reflete condições operativas da transposição distintas das atuais. Tais aspectos devem ser considerados ao comparar as estatísticas descritivas entre as estações, como média, mediana, quartis e valores extremos.

Na estação 9, foi desenvolvido um modelo de regressão linear para conversão de CSF em CSS. Essa modelagem foi treinada com 39 registros com CSS e CSF conhecidos para estação 9 (Figura 7.10). Os coeficientes da regressão foram ajustados pelos



Tabela 7.2: Descrição do conjunto de teste e resultado da avaliação do modelo de previsão de CSS diária na estação 9 a partir de CSS diária na estação 6.

Conjunto treinamento-teste		
Descritor	x:Q <sub>6</sub>	y:Q <sub>9</sub>
N	29051	29051
$\bar{\mu}$ (m <sup>3</sup> /s)	107,8	62,6
$\sigma$ (m <sup>3</sup> /s)	15,0	21,4
Mínimo (m <sup>3</sup> /s)	68,8	31,7
1° Quartil 25% (m <sup>3</sup> /s)	100,5	47,3
Mediana (m <sup>3</sup> /s)	107,0	59,5
3° Quartil 75% (m <sup>3</sup> /s)	113,7	71,0
Máximo (m <sup>3</sup> /s)	331,6	334,3

Avaliação: $\hat{y}(t)=x(t)-45,12$		
EMQ:	264,71	
RMS:	16,27	
MAE:	10,71	
MAPE:	0,17	
Bias:	-0,00	
R <sup>2</sup> log:	0,40	
R <sup>2</sup> :	0,42	

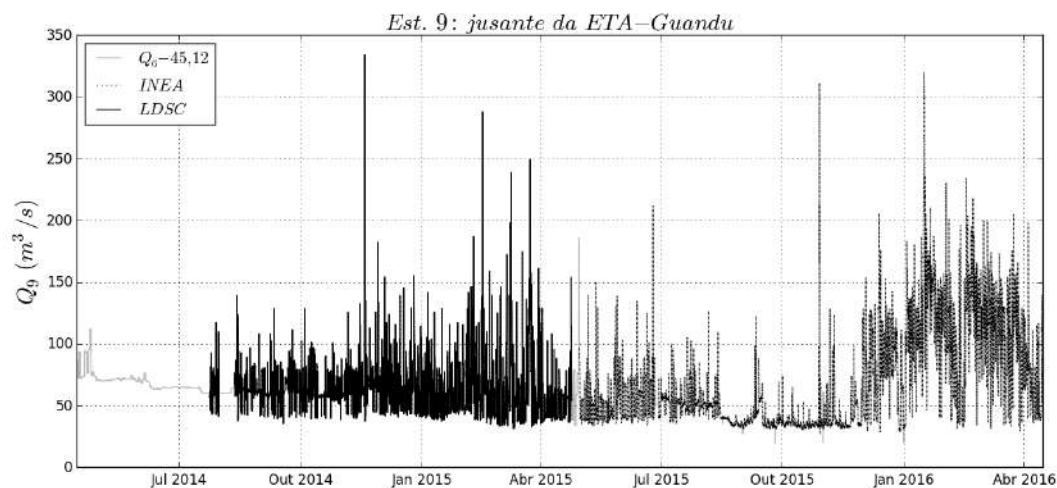


Figura 7.8: Série de vazão média horária completa para estação 9, jusante da ETA-Guandu.

MMQ. O modelo apresentou uma distribuição normal dos resíduos (Figura 7.11). As previsões tiveram correlação de 0,9998 em relação aos registros de treinamento-teste, e coeficiente de determinação de 1,00 (Figura 7.12).

A estação 9 contou também com medições de turbidez a cada 15 minutos, feitas pela sonda RBR Duo, entre os dias 24/07/14 e 14/07/15. Os dados de turbidez

Tabela 7.3: Descrição estatísticas das estações criadas no presente estudo e do Inea.

Sigla	Código	N	$\bar{\mu}$ mg/l	$\sigma$ mg/l	Mín. mg/l	Máx. mg/l
CST	LG350	227	15,2	13,9	1	93
CST	LG351	283	16,3	17,2	0,5	170
CST	GN201	288	24,7	32,2	1	308
CST	GN200	155	26,9	33,9	1,8	250
CST	SF080	119	35,3	48,2	3	478
CST	GM180	116	187,6	393,1	10	2700
CSS	7	23	6,8	3,7	3,4	21,7
CSS	8	22	10,2	8,5	3,2	45,3
CSS	9	174	18,5	29,5	2,1	255,1
CSS	10	18	10,6	3,9	5,0	19,1
CSS	11	23	593	1090,7	37,7	4480,2
CSF	7	22	4,9	3,5	1,6	18,4
CSF	8	22	8,0	7,6	2,1	39,5
CSF	9	326	32,6	64,4	1,0	738,2
CSF	10	18	8,2	3,4	2,9	15,3
CSF	11	23	434,6	861,3	23,5	3748,1
CSV	7	22	2,0	0,8	0,9	4,2
CSV	8	22	2,2	1,2	0,1	5,9
CSV	9	167	3,6	4,3	0,2	41,5
CSV	10	18	2,5	0,9	0,5	4,1
CSV	11	23	159,1	251,8	11,3	804,6

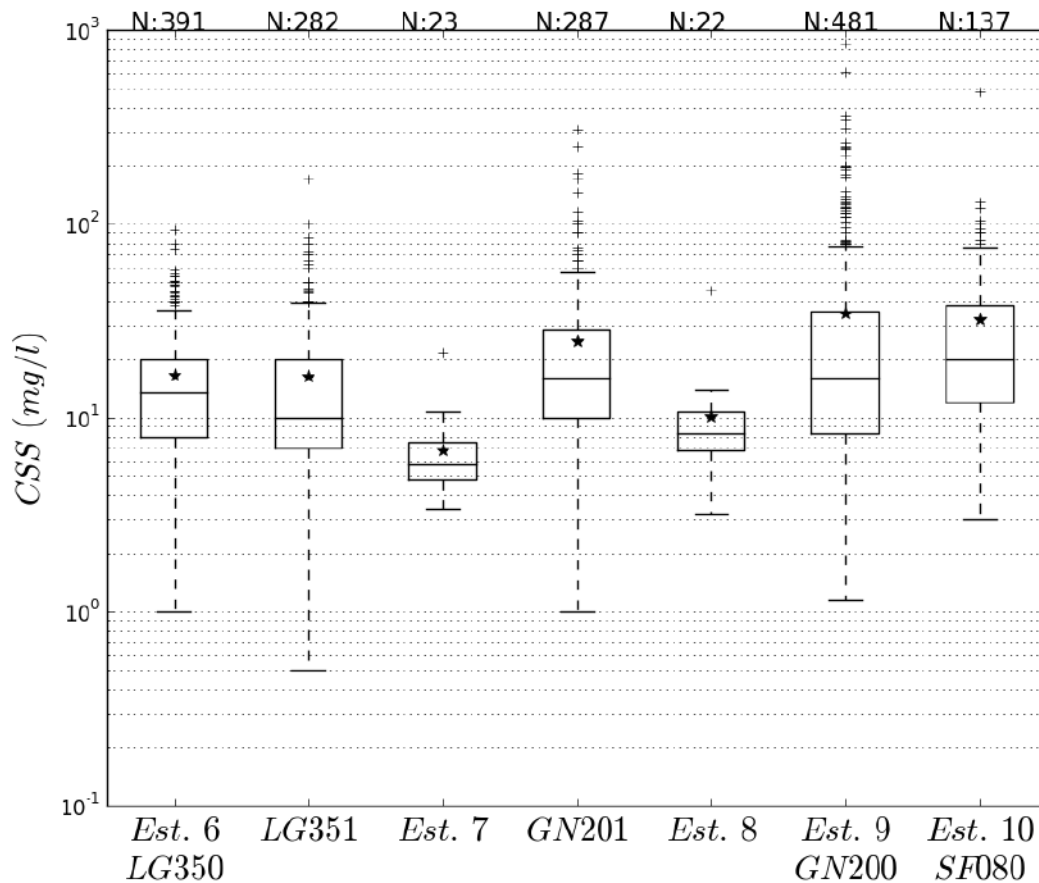


Figura 7.9: Diagrama em caixa com o conjunto total de registros de CSS coletados no trecho a jusante da UHE Pereira Passos nas estações do presente estudo e do Inea, onde N é o número de amostras.

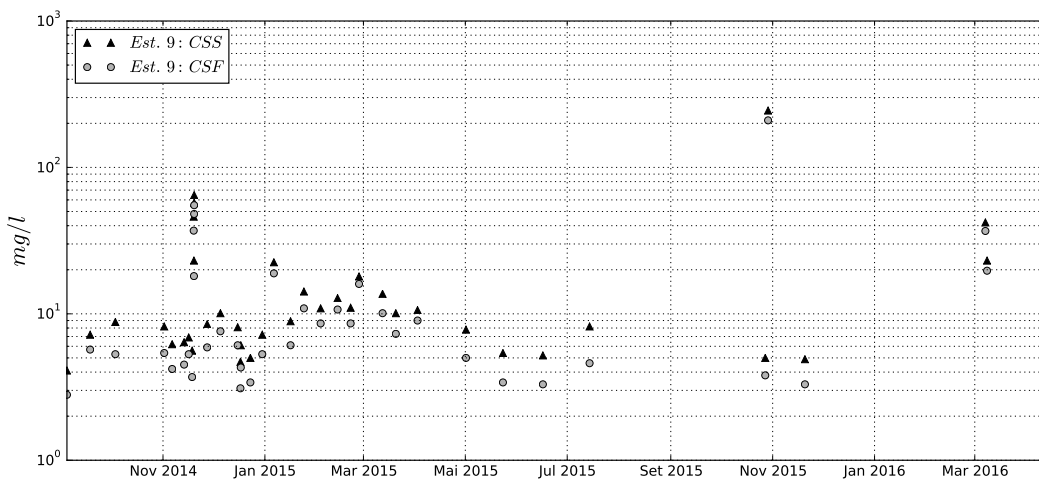


Figura 7.10: Série de dados com informações simultâneas de CSS e CSF para estação 9, a jusante ETA-Guandu.

foram convertidos em CSS pela curva de calibração de turbidez, descrita no capítulo 4. Na Figura 7.14, é possível notar, por diversas vezes, picos de curta duração, que ultrapassam 500 mg/l. Como na maioria dos casos, esses valores sobrestimam a

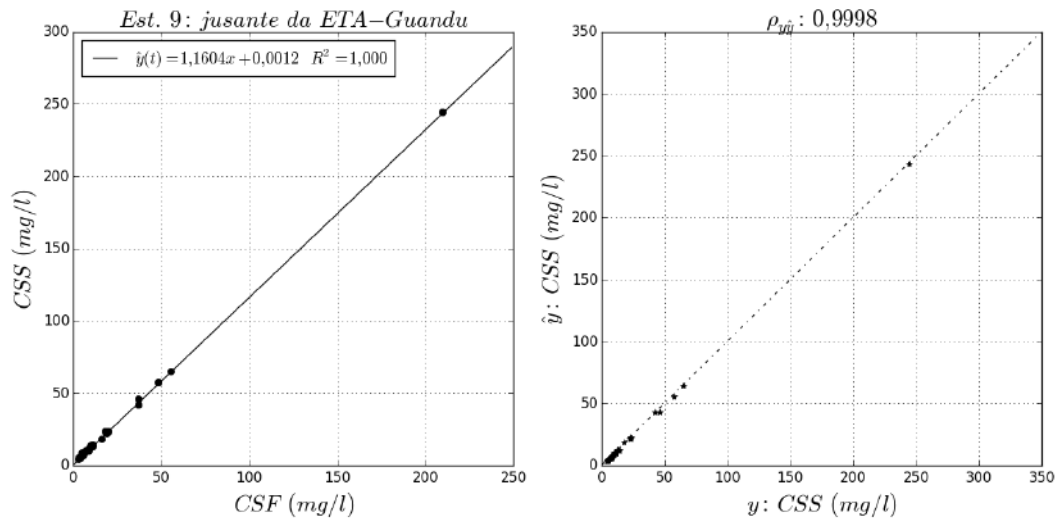


Figura 7.11: Curva de ajuste do modelo conversão de CSF em CSS e correlação do dado CSS predito e real para a estação 9, a jusante da ETA-Guandu.

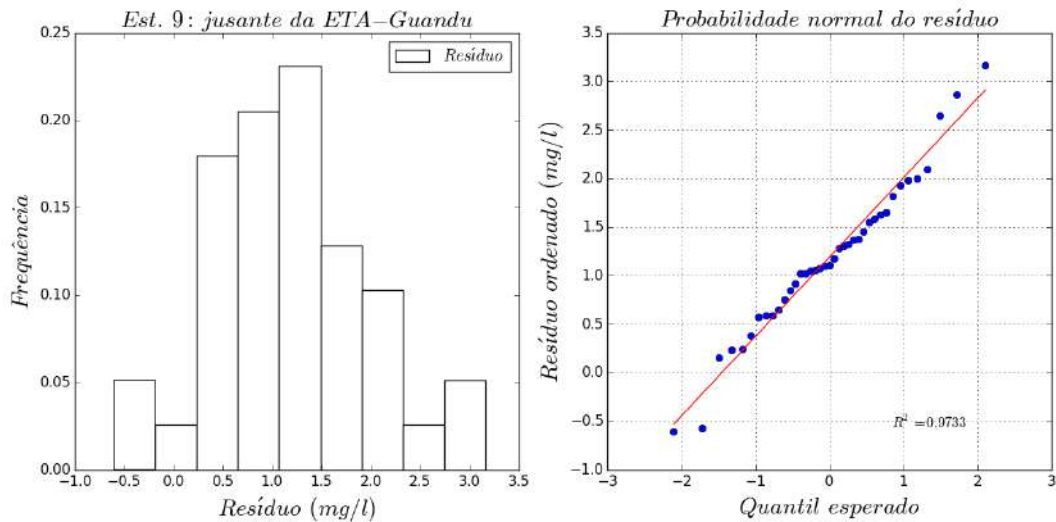


Figura 7.12: Histograma e probabilidade normal do resíduo do modelo para conversão de CSF em CSS para a estação 9, a jusante da ETA-Guandu.

medição CSS, feita no mesmo dia, despertou-se a dúvida sobre a validade desses picos. Inicialmente, foram listadas as principais causas que poderiam gerar picos reais de turbidez: precipitação intensa na bacia, transposição de um evento de cheia no rio Paraíba do Sul ou no rio Pirai e mudanças bruscas no regime hidráulico, por atividades operativas na UHE Pereira Passos ou na ETA Guandu.

A comparação com a série temporal de precipitação da estação 86878, no município de Seropédica mostrou que os eventos de precipitação intensa não ocorreram com a mesma frequência em que se registraram picos de CSS (Figura 7.15). Ao se comparar com a CSS defluente da UHE Pereira Passos, a correspondência foi mais fraca ainda (Figura 7.16). A vazão no próprio ponto foi um pouco mais relevante, apesar da baixa correlação (Figura 7.17). A combinação da variação brusca

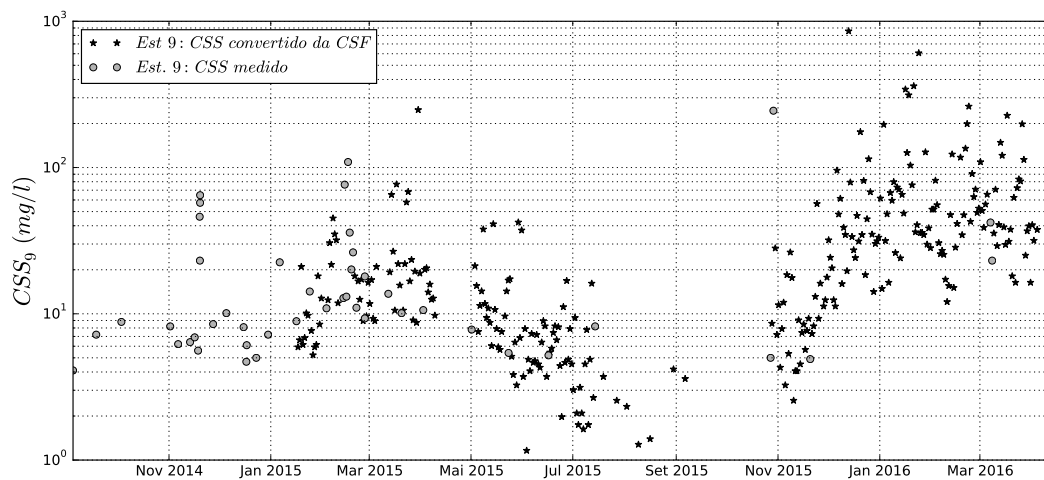


Figura 7.13: Série de CSS medido e convertido da CSF pelo modelo linear para estação 9, a jusante da ETA-Guandu.

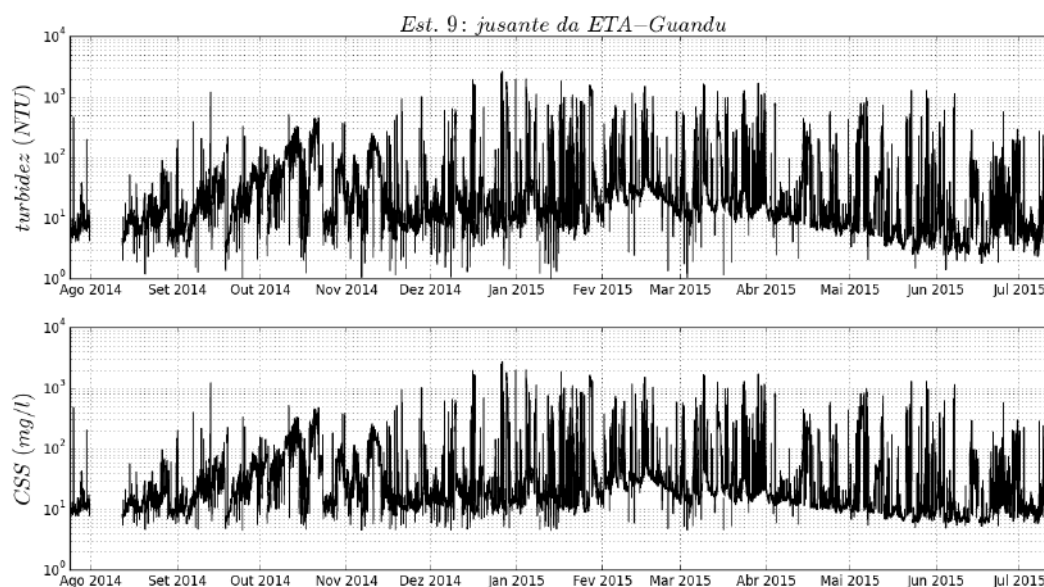


Figura 7.14: Série de turbidez medido pelo RBR Duo na estação 9 e sua conversão em CSS pela curva-chave de turbidez.

de pressão no leito, devido à chegada desse pico de cheia, produzido pela UHE Pereira Passos e a operação das comportas da barragens da Cedae em resposta a essa onda, podem ser responsáveis pela ressuspensão dos sedimentos finos, acumulados nas porções rasas da lagoa da Cedae.

A dificuldade de descrever precisamente esses picos reside no fato de que a ordem de grandeza desses picos de CSS se misturam aos abundantes registros espúrios, gerados por efeitos indesejados, na falta de dados sedimentológicos, topobatímetros e operativos da barragem da Cedae. Durante as campanhas de limpeza da sonda, foram encontradas, por diversas vezes, ilhas de macrófitas e lixo, presos na estrutura que suportava o sensor, podendo obstruir a leitura óptica do turbidímetro

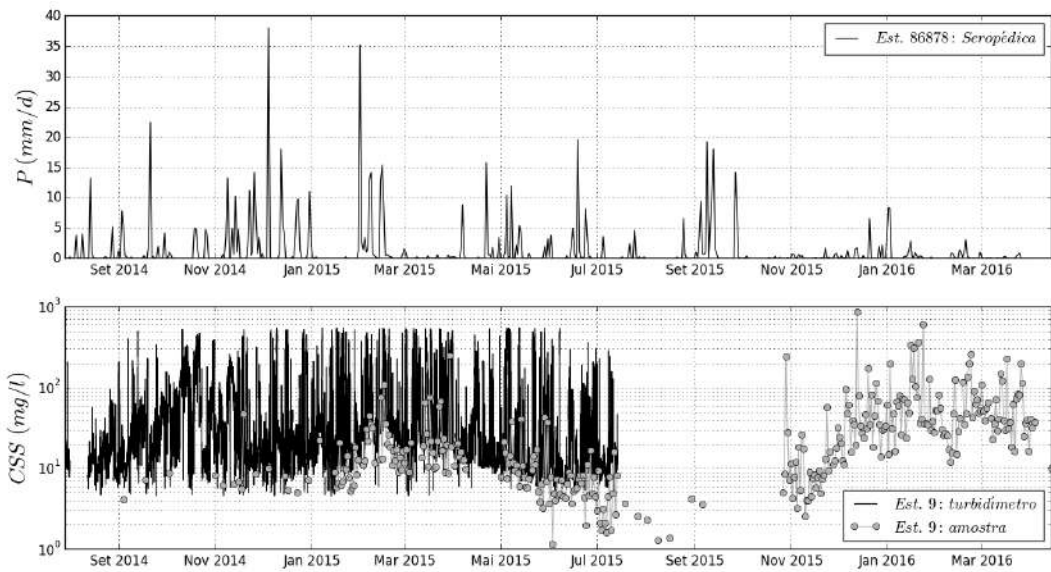


Figura 7.15: Comparação da série temporal de precipitação em Seropédica e a série de turbidez convertida em CSS na estação 9, a jusante da ETA-Guandu.

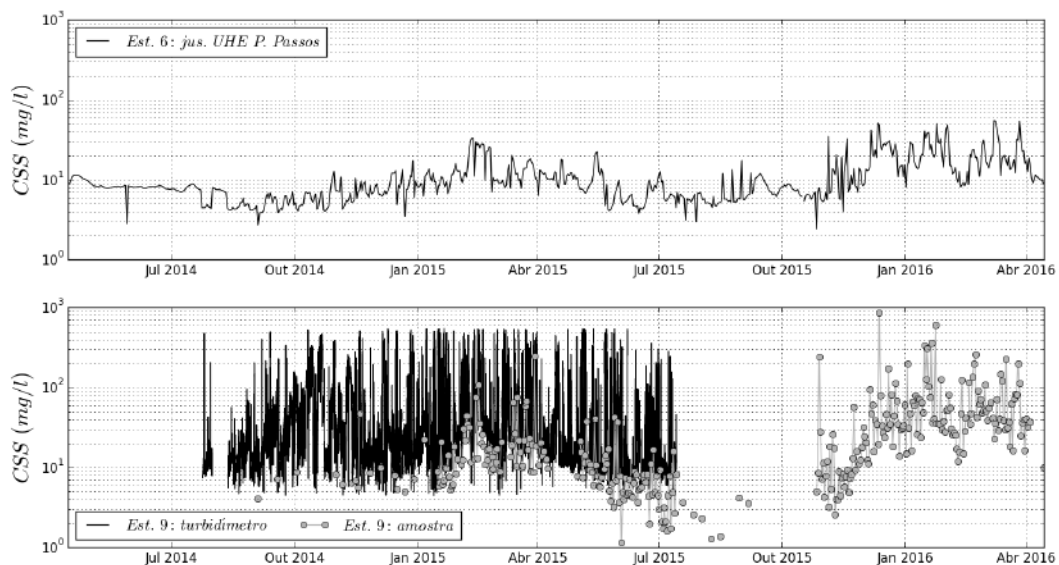


Figura 7.16: Comparação da série temporal de CSS na estação 6 e a série de turbidez convertida em CSS na estação 9, a jusante da ETA-Guandu.

(Figura 7.18). Outro efeito negativo foi o crescimento rápido de biofilme na janela óptica de medição (Figura 7.19). Inclusive, a queda brusca na medição, após limpeza do sensor, denunciava que muitos desses valores extremados são efeitos do biofilme, como descrito na estação 6 (ver capítulo 5).

Diante da dificuldade de separar os picos reais dos picos espúrios e do potencial impacto que esses dados espúrios podem gerar, na estimativa da descarga de sólidos suspensos, adotou-se uma regra baseada em um evento extremo, conhecido e presenciado em campo durante a parada programada anual da Cedae em 19/11/14, para fins de manutenção preventiva. Nesse evento, a captação da ETA-Guandu foi

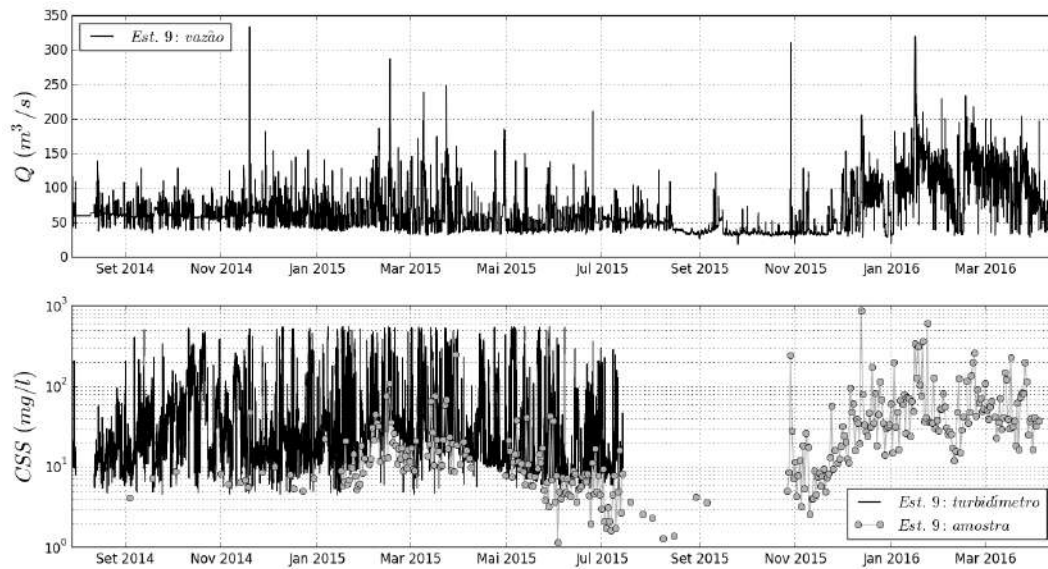


Figura 7.17: Comparação da série temporal de vazão e a série de turbidez convertida em CSS na estação 9, a jusante da ETA-Guandu.



Figura 7.18: Foto tirada em 16/06/2015 mostrando a remoção de uma ilha de macrófitas flutuantes presa na estrutura de madeira que suportava a sonda RBR Duo na estação 9, a jusante da ETA-Guandu.



Figura 7.19: Sonda RBR Duo após 7 dias de monitoramento na estação 9 (esquerda) e após a limpeza (direita).

interrompida e as comportas da barragem da lagoa da Cedae foram abertas de modo a liberar o lodo acumulado no fundo. No momento mais crítico, a vazão chegou a  $334 \text{ m}^3/\text{s}$  e a turbidez chegou a  $506 \text{ NTU}$  ou  $515 \text{ mg/l}$ . Porém, após poucas horas, a CSS voltou a patamares médios (Figura 7.20). Entretanto, esse evento foi único durante o ano da crise hídrica. Via de regra, o que se observou no resto do ano foi que as comportas não foram operadas com frequência. Houve, inclusive, a necessidade de alteá-las em 30 cm, de modo a garantir o nível mínimo para captação da ETA-Guandu. Considerando essas ponderações, exceto o dia 19/11/14, adotou-se para os demais dias o valor mínimo diário medido pelo turbidímetro (Figura 7.24).

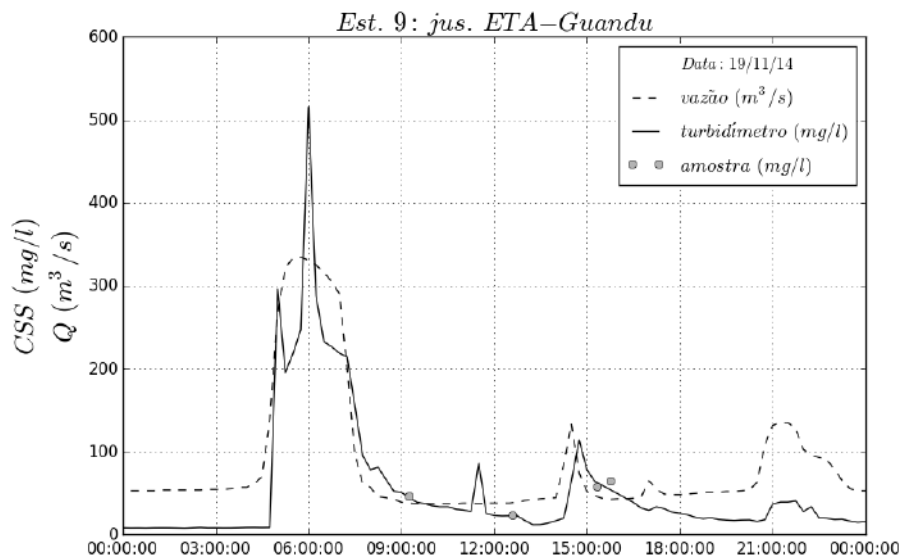


Figura 7.20: Série de vazão e CSS amostra e medida pela turbidímetro na estação 9 durante a parada programada anual do dia 19/11/14 para manutenção preventiva da ETA-Guandu e lagoa Cedae.

Nessa fase do pré-processamento a série de CSS, para a estação 9, é composta pelas amostra coletadas de CSS e CSF, convertidas em CSS, com imputação de dados ausentes pelo modelo de mínimo valor diário da série de turbidez. Entretanto, ainda sobraram falhas na série, que precisaram ser preenchidas por outro modelo de imputação de dados. Para esses dados faltantes que restaram, foi desenvolvido um modelo exponencial, ajustado pelo MMQ, usando como dado de entrada a CSS da estação 6. Como essas lacunas restantes encontram-se na estação seca, o erro na estimacão foi até menor do que no modelo anterior. A Figura 7.24 mostra a série de CSS já completa para estação 9.



Tabela 7.4: Descrição do conjunto de teste e resultado da avaliação do modelo de mínimo valor diário para estimação CSS a partir de dados de CSS medidos pelo turbidímetro da estação 9, a jusante ETA-Guandu.

Conjunto treinamento-teste		
Descritor	x:Sonda RBR Duo	y:Amostra de água
N	139	139
$\bar{\mu}$ (mg/l)	10,6	10,7
$\sigma$ (mg/l)	6,2	6,6
Mínimo (mg/l)	4,6	1,2
1° Quartil-25% (mg/l)	6,4	5,9
Mediana (mg/l)	8,4	8,9
3° Quartil-75% (mg/l)	12,1	14,1
Máximo (mg/l)	33,7	35,1
Avaliação: $\hat{y}(t)=\min(x(t))$		
EMQ:	32,64	
RMS:	5,71	
MAE:	4,22	
MAPE:	0,56	
Bias:	0,13	
R <sup>2</sup> log:	0,19	
R <sup>2</sup> :	0,25	

Tabela 7.5: Descrição do conjunto de teste e resultado da avaliação do modelo de predição de CSS diária na estação 9 a partir de CSS diária na estação 6.

Conjunto treinamento-teste		
Descritor	x:CSS <sub>6</sub>	y:CSS <sub>9</sub>
N	27	27
$\bar{\mu}$ (mg/l)	7,1	9,3
$\sigma$ (mg/l)	3,5	7,1
Mínimo (mg/l)	2,4	4,1
1° Quartil 25% (mg/l)	4,7	5,9
Mediana (mg/l)	6,5	7,8
3° Quartil 75% (mg/l)	8,6	10,1
Máximo (mg/l)	20,0	42,1
Avaliação: $\hat{y}(t)=3,0943e^{0,1036x(t)}$		
EMQ:	10,75	
RMS:	3,28	
MAE:	2,17	
MAPE:	0,23	
Bias:	0,53	
R <sup>2</sup> log:	0,60	
R <sup>2</sup> :	0,78	

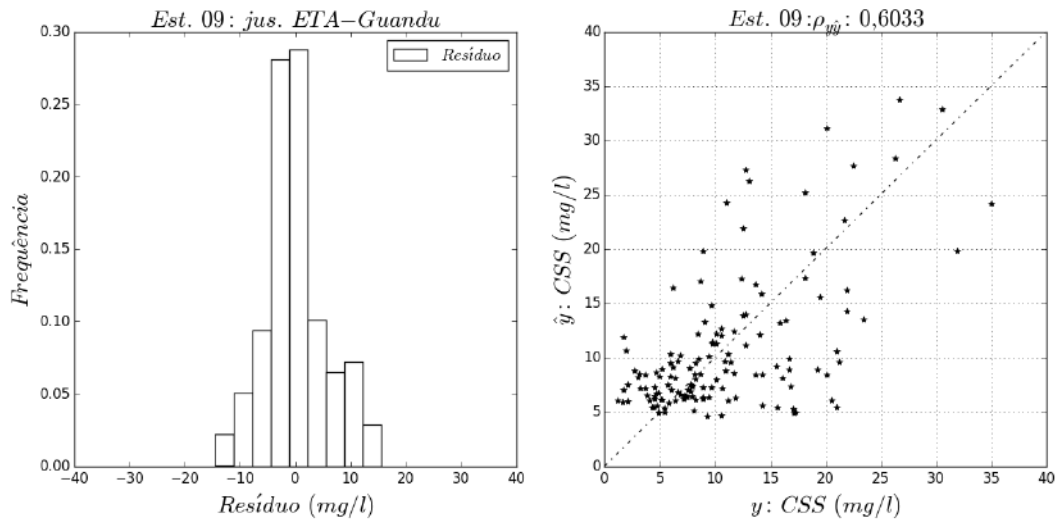


Figura 7.21: Histograma do resíduo e correlação entre o dado real e o dado predito pelo modelo de mínimo valor diário para estimação CSS a partir da série de dados de CSS medidos pelo turbidímetro da estação 9, a jusante ETA-Guandu.

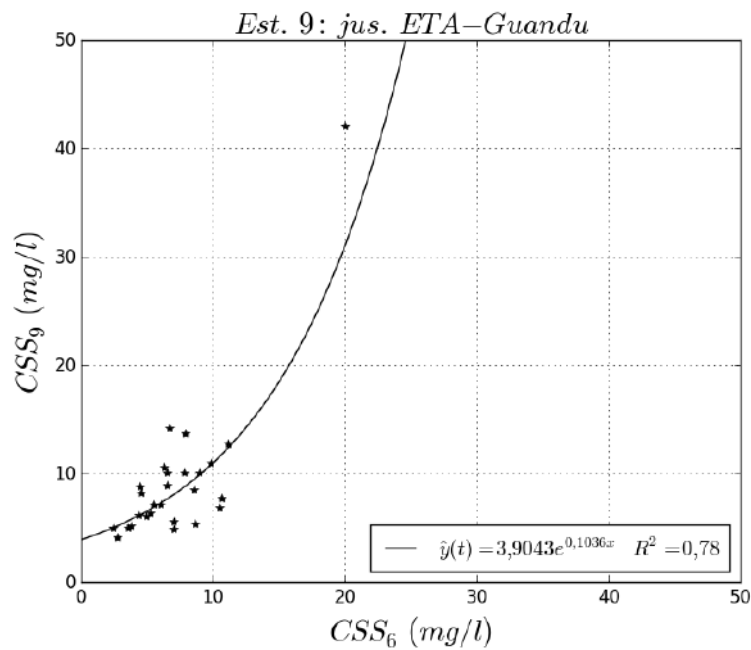


Figura 7.22: Curva ajustada pelo MMQ para modelo de predição de CSS diária na estação 9 a partir de CSS diária na estação 6.

## 7.5 Resultado

### 7.5.1 Lançamento da ETA-Guandu, no rio Capenga, na sub-bacia do Guandu Mirim

Na Figura 7.25, é possível observar a notória distinção entre os valores de CSS captado e lançado pela ETA-Guandu. Os valores de lançamento muitas vezes ultrapassaram o limite máximo de tolerância (500 mg/l), para lançamentos em corpos

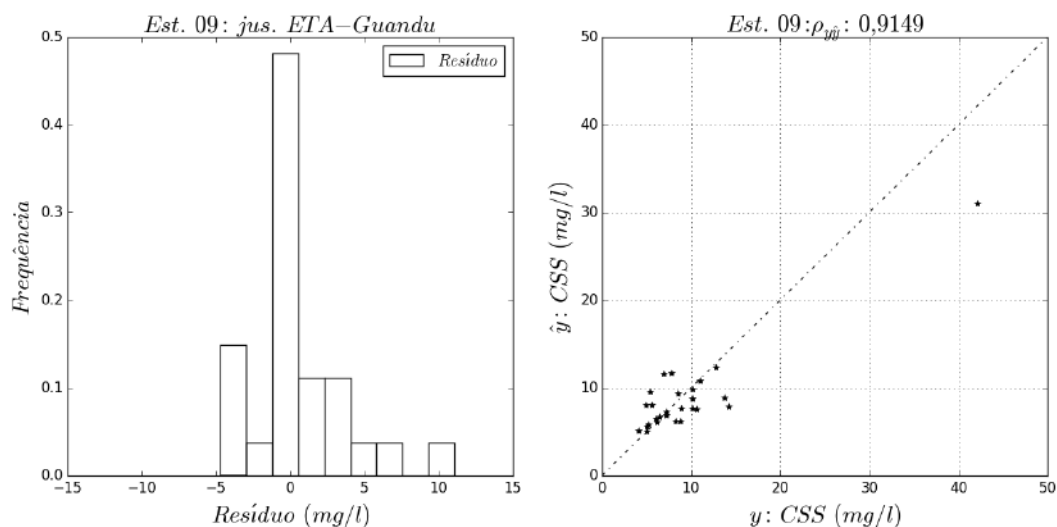


Figura 7.23: Histograma do resíduo e correlação entre o dado real e o dado previsto pelo modelo de previsão de CSS diária na estação 9 a partir de CSS diária na estação 6.

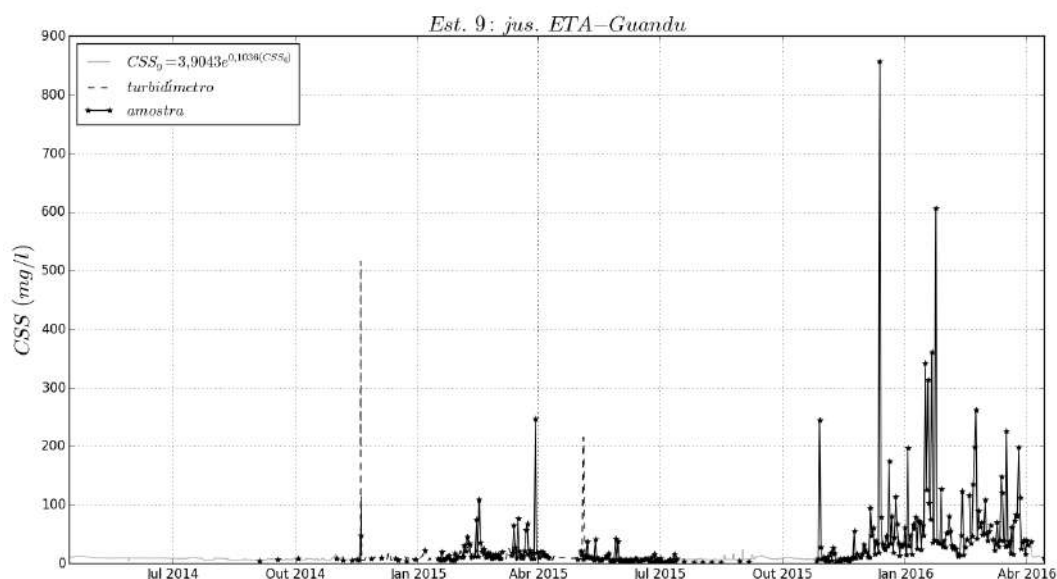


Figura 7.24: Série CSS completa para estação 9, a jusante da ETA-Guandu.

hídricos (Figura 7.26). O impacto das regras operativas de defluência da cheia do rio Piraí para o rio Guandu é igualmente visível (Figura 7.27).

## 7.5.2 Granulometria

### Rio Guandu a jusante da ETA-Guandu

A estação 9 contou com 22 amostras durante dois anos hidrológicos, onde 6 amostras foram coletadas na estação seca, com CSS variando entre 5 e 9 mg/l, e 16 amostras foram na estação chuvosa, com CSS variando entre 6 e 65 mg/l. A distribuição foi,



Figura 7.25: Comparação entre a CSS na estação 9 e estação 11: a foto à direita mostra o lançamento da ETA-Guandu e a esquerda a comparação visual das amostras da estação 9 e estação 11.

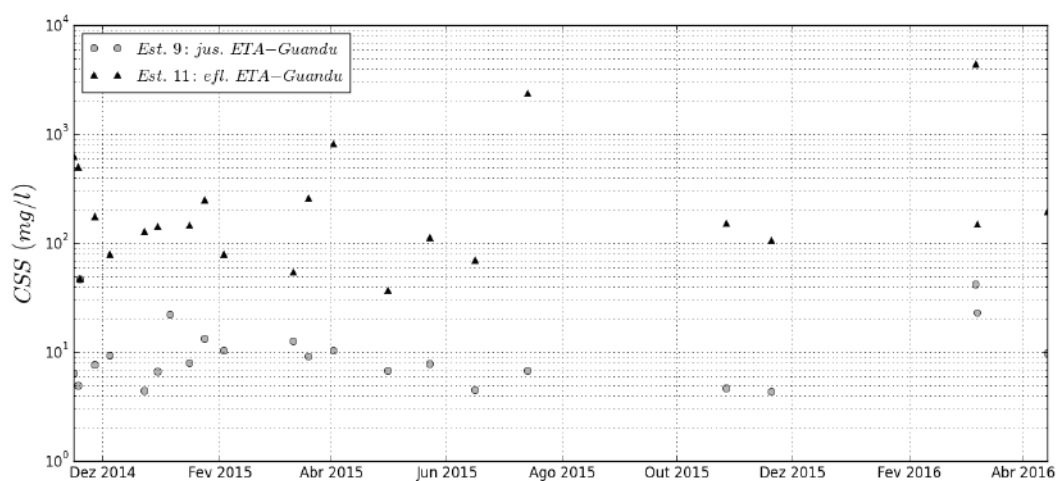


Figura 7.26: Comparação entre a CSS na estação 9 e estação 11.

essencialmente unimodal. O segundo pico, na faixa entre 0,5 e 1,5  $\mu\text{m}$  foi tratado como dado espúrio, explicado no Capítulo 6. O menor e maior de tamanho observado foram de 0,4 a 182,0  $\mu\text{m}$ , respectivamente. O  $d_{90}$  se mostrou mais variável que a



Figura 7.27: Impacto da transposição do rio Pirai no tratamento de água da ETA-Guandu: a foto da esquerda mostra a cheia do rio Pirai após pico de chuva e a foto da direita mostra o lançamento da ETA-Guandu afetado pela transposição da cheia do rio Pirai.

estação 6, com valor extremo de  $79 \mu\text{m}$ . A distribuição das médias das frequências de classes de tamanho de todas as amostras mostrou um  $d_{50}$  de  $7 \mu\text{m}$  e foi classificada como siltosa.

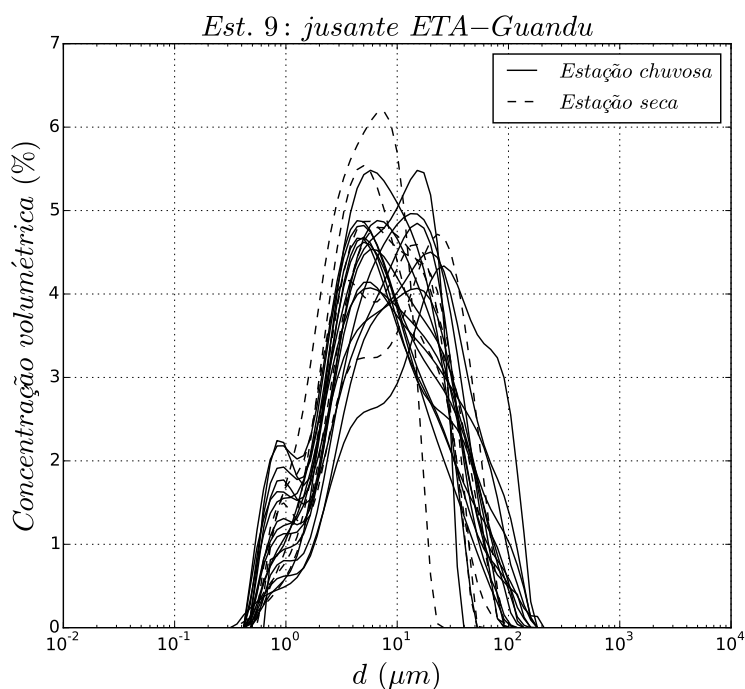


Figura 7.28: Distribuição granulométrica das amostras de água coletadas entre 2014 e 2016 na estação 9, a jusante da ETA-Guandu.

### Rio Guandu: canal de São Francisco

A estação 10 contou com 11 amostras, onde três amostras foram coletadas na estação seca, com CSS variando entre 5 e 11 mg/l, e oito amostras foram na estação chuvosa,

Tabela 7.6: Estatística descritiva da granulometria das amostras da estação 9 e comparação com dados de CSS/F/V.

Data	d <sub>10</sub> μm	d <sub>50</sub> μm	d <sub>90</sub> μm	CSS mg/l	CSF mg/l	CSV mg/l
03/10/14	1	10	40	9	5	4
17/10/14	1	7	23	-	-	-
13/11/14	1	13	53	7	5	2
16/11/14	2	7	20	9	5	4
19/11/14	1	8	30	65	55	10
27/11/14	2	8	46	9	6	3
13/12/14	3	17	79	-	-	-
23/12/14	3	13	53	6	4	2
30/12/14	2	7	34	7	5	2
06/01/15	1	5	23	23	19	4
24/01/15	1	6	30	14	11	3
03/02/15	1	6	35	11	9	2
13/02/15	1	8	35	13	11	2
21/02/15	2	6	30	11	9	2
26/02/15	2	8	35	18	16	2
13/03/15	2	8	46	21	17	4
20/03/15	2	5	12	10	7	3
02/04/15	2	10	34	11	9	2
01/05/15	2	6	23	8	5	3
23/05/15	2	7	23	5	3	2
16/06/15	2	7	26	5	3	2
14/07/15	2	8	30	8	5	3
média <sup>(a)</sup> :	2	7	34			

<sup>(a)</sup> Distribuição das médias do percentual de cada classes de tamanho de todas as amostra de uma estação.

com CSS variando entre 9 e 15 mg/l. A distribuição foi ,essencialmente unimodal. O segundo pico, na faixa entre 0,5 e 1,5  $\mu\text{m}$ , foi tratado como dado espúrio, explicado no Capítulo 6. O menor e maior de tamanho observado foram de 0,3 a 208,9  $\mu\text{m}$ , respectivamente. O  $d_{90}$  se mostrou semelhante à estação 9, com valor extremo de 52  $\mu\text{m}$ . A distribuição das médias das frequências de classes de tamanho de todas as amostras mostrou um  $d_{50}$  de 7  $\mu\text{m}$  e foi classificada como siltosa.

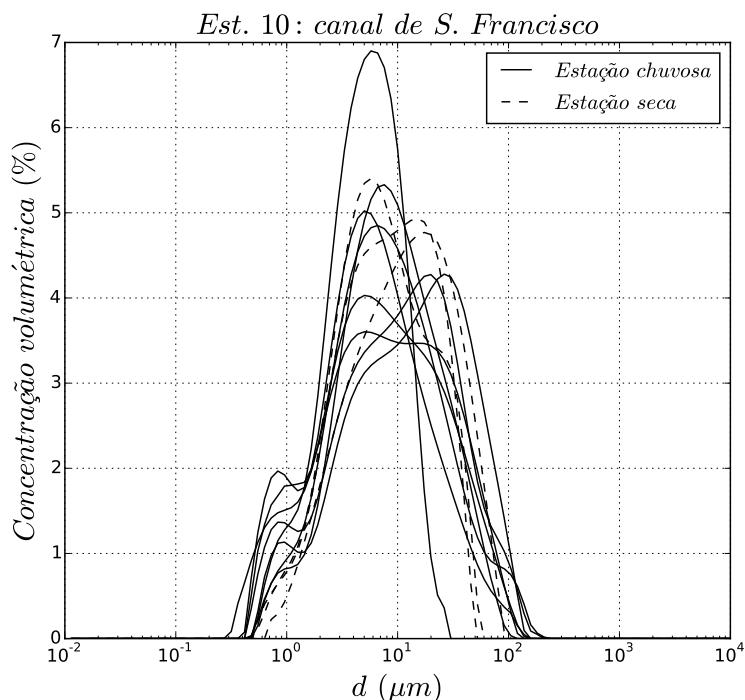


Figura 7.29: Distribuição granulométrica das amostras de água coletadas entre 2014 e 2016 na estação 10, canal de São Francisco.

### 7.5.3 Caracterização dos sólidos suspensos no trecho da baía Guandu a jusante da UHE Pereira Passos

Para fins de comparação entre as estações monitoradas, no presente estudo, foram considerados apenas os dias compartilhados por todas as estações a jusante da UHE Pereira Passos. A maior parte dos dias compartilhados pertenceram ao ano seco (2014 - 2015), caracterizados pelo baixo incremento na CSS pelos seus tributários. Logo, a diferença mediana entre as estações foi muito pequena (Figura 7.30). Nesse período, houve a retenção de sólidos suspensos no remanso da PCH Paracambi, resultando na diminuição da CSS, na estação 7, em relação à estação 6. Após a estação 7, observou-se uma leve tendência de incremento na CSS.

As características estatísticas da CSS, no trecho a jusante da UHE Pereira Passos (LG350) e da captação da ETA Guandu (GN200), mantiveram-se praticamente invariantes entre 1980 e 2014 (Figura 7.31 e Figura 7.31). Apesar da resolução amos-

Tabela 7.7: Estatística descritiva da granulometria das amostras da estação 10 e comparação com dados de CSS/F/V.

Data	d <sub>10</sub> μm	d <sub>50</sub> μm	d <sub>90</sub> μm	CSS mg/l	CSF mg/l	CSV mg/l
24/01/15	2	13	52	15	12	3
03/02/15	1	7	35	10	8	2
13/02/15	1	10	40	13	11	2
21/02/15	1	7	40	14	11	3
26/02/15	1	6	26	9	8	1
13/03/15	2	8	35	12	9	3
20/03/15	2	5	12	10	8	2
02/04/15	2	8	30	11	9	2
01/05/15	2	7	26	9	6	3
16/06/15	2	8	26	5	3	2
14/07/15	2	11	40	8	4	4
média <sup>(a)</sup> :	2	7	34			

<sup>(a)</sup> Distribuição das médias do percentual de cada classes de tamanho de todas as amostra de uma estação.

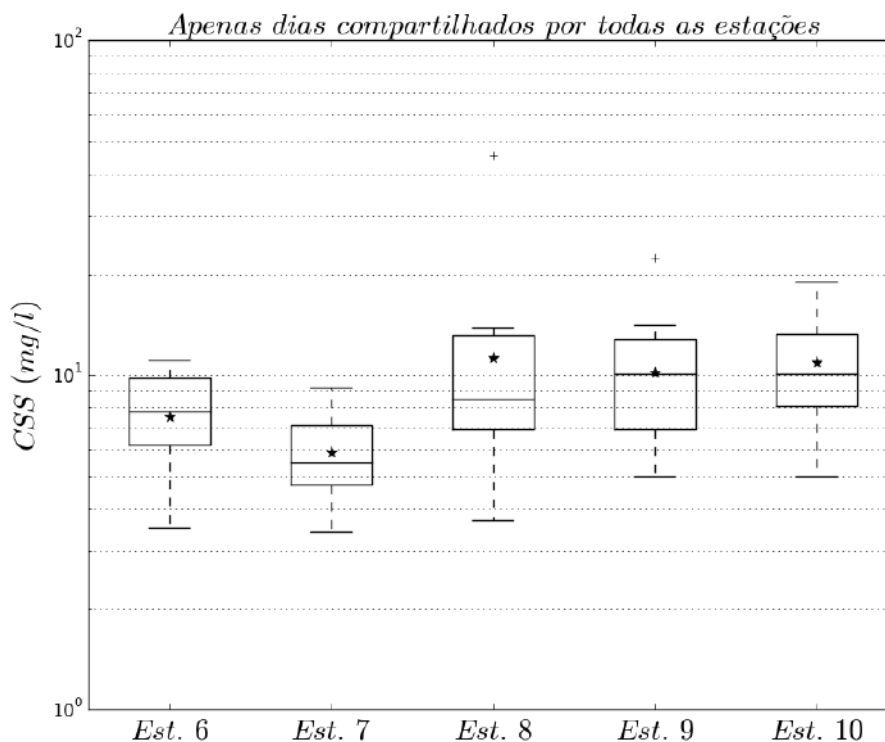


Figura 7.30: Diagrama em caixa com registros de CSS coletados em dias compartilhados por todas as estações do presente estudo a jusante da UHE pereira Passos, com o valor médio representado pela estrela.



tral ser muito baixa para uma avaliação anual, essa estacionalidade, ao longo dos anos, mostrou que, no período entre 1980 e 2014, não houve mudanças significativas na escala de décadas.

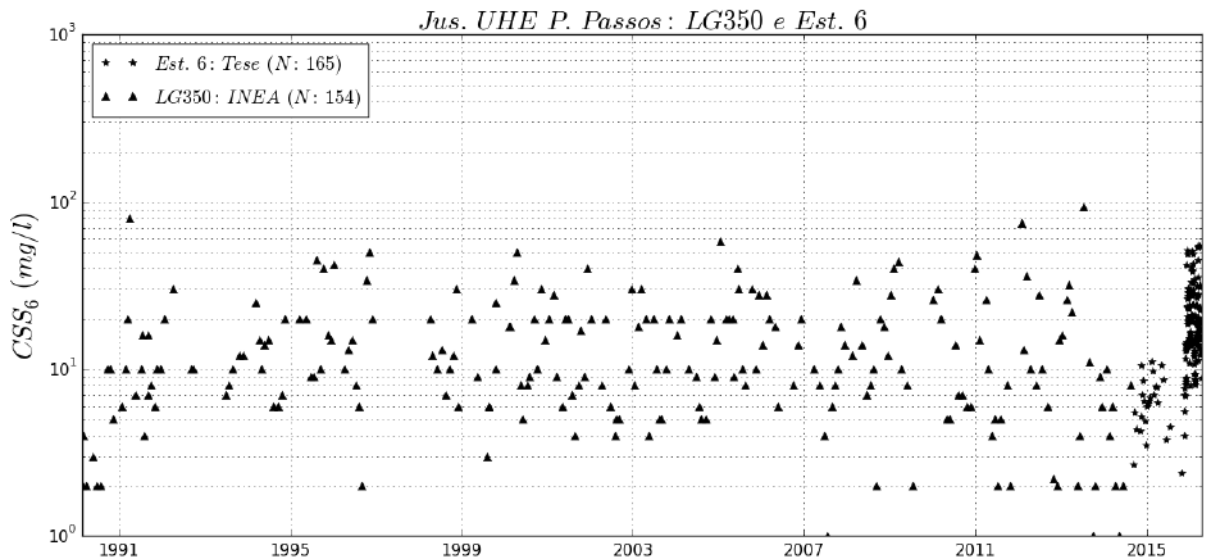


Figura 7.31: Série temporal de CSS coletado pelo Inea e o presente estudo no trecho a jusante da UHE Pereira Passos.

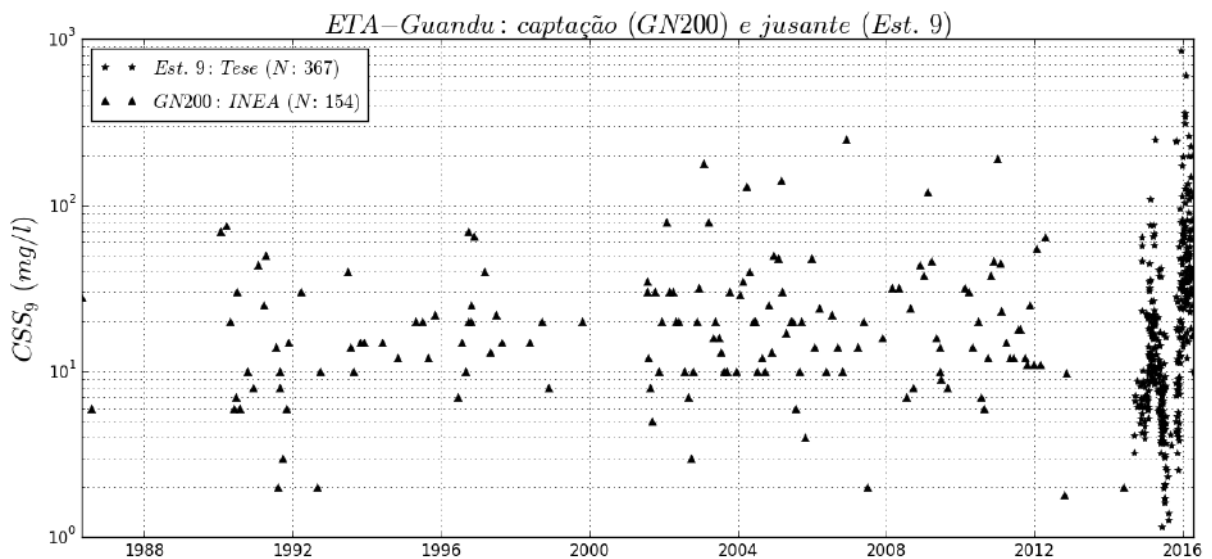


Figura 7.32: Série temporal de CSS coletado pelo Inea e o presente estudo no trecho da captação da ETA-Guandu.

Na escala anual, o ano de seca histórica (15/04/14 a 14/04/15) das estações 6 e 9 apresentou uma distribuição de CSS mais estreita do que as encontrados na série histórica de décadas (1980-2013) e no ano típico, representado aqui pelo período de 15/04/15 a 14/04/16 (Figura 7.33 e Figura 7.34). Na estação 6, os descritores estatísticos do ano seco ficaram confinados abaixo da mediana na escala de décadas

(LG350) e abaixo da média do ano típico (Figura 7.33). Na estação 9, a distinção é mais visível com quase todos os descritores abaixo do 3º quartil, na escala de décadas, e abaixo da mediana do ano típico (Figura 7.34). Esses resultados reforçam, em termos de CSS, o caráter singular e separável do ano da crise hídrica em relação aos demais anos.

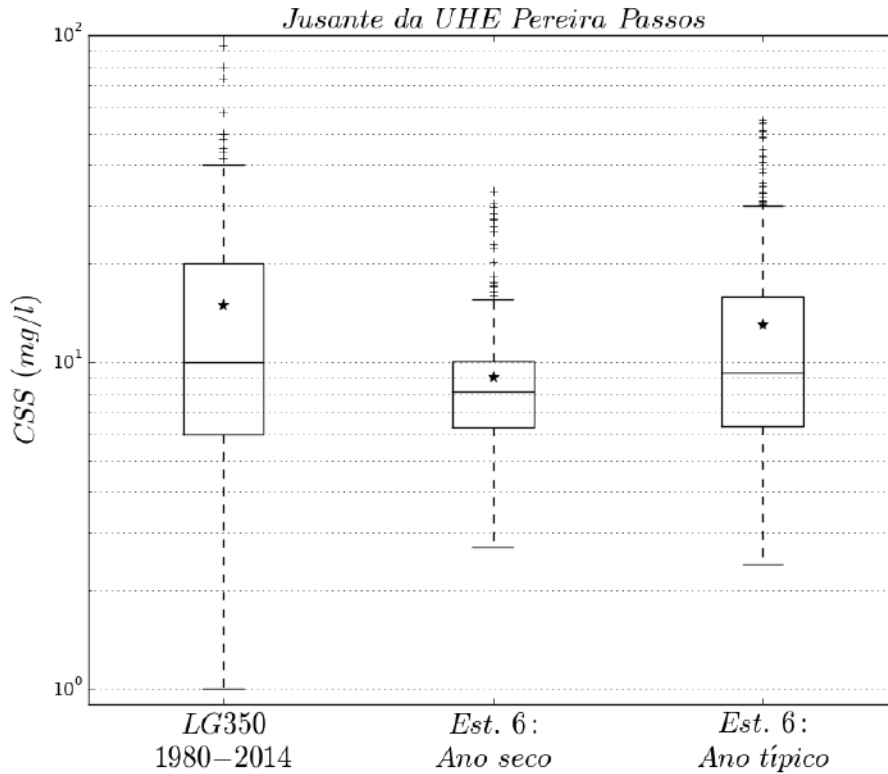


Figura 7.33: Diagrama de caixa da CSS coletado pelo Inea e o presente estudo no trecho a jusante da UHE Pereira Passos, onde a média é representada por uma estrela.

O monitoramento em alta frequência, realizado a jusante da ETA-Guandu (est. 9), mostrou ainda uma resposta horária na CSS, com picos extremos que não estavam associados à precipitação na bacia (Figura 7.35). Esses picos extremos de CSS eram acompanhados por variações bruscas de nível na estação 9. Esse comportamento aponta para uma fonte próxima e estreitamente relacionada às condições hidráulicas locais do rio. Essas variações bruscas de nível são todas produzidas por empreendimentos instalados na bacia, no caso, a UHE Pereira Passos e a UTE-Guandu. A fonte de ressuspensão mais próxima se localiza junto às comportas da barragem da lagoa da ETA-Guandu. Entretanto, informações de quando e como as comportas da Cedae foram operadas, durante o estudo não foram divulgadas ao público, exceto nos dias de parada programada anual para manutenção preventiva da ETA-Guandu, porém sem detalhes operativos.

No dia 19/11/14, foi possível acompanhar no campo, e medir, em alta resolução

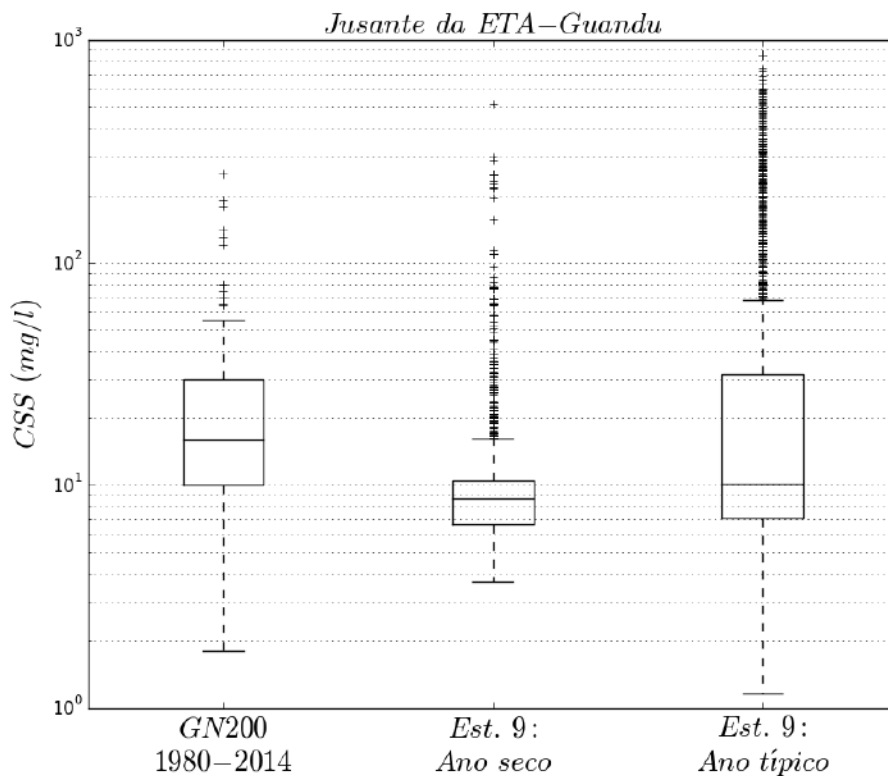


Figura 7.34: Diagrama de caixa da CSS coletado pelo Inea e o presente estudo no trecho a jusante da UHE Pereira Passos, onde a média é representada por uma estrela.

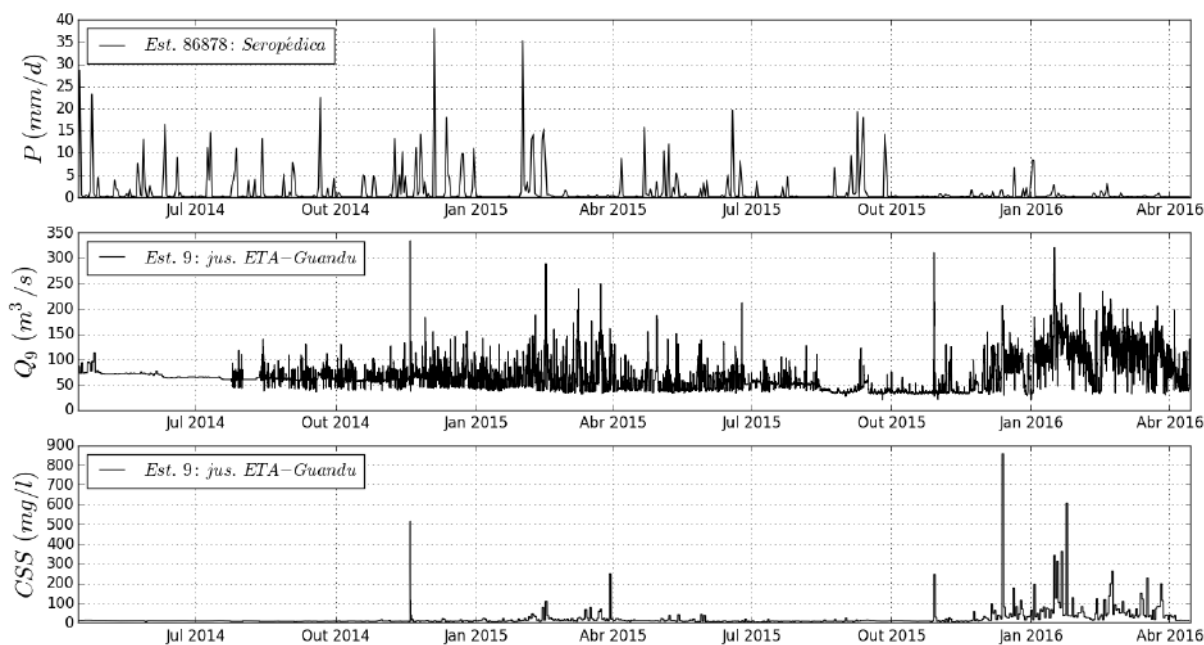


Figura 7.35: Série de precipitação, vazão e CSS na estação 9, a jusante da ETA-Guandu.

(15 minutos) o impacto da operação das comportas da lagoa da Cedae, durante uma dessas paradas programadas na concentração de sólidos suspensos (Figura 7.20). A

parada programada consiste na interrupção da captação para limpeza dos decantadores da ETA, e na abertura das comportas da barragem, para descarga do fundo e da vegetação flutuante retida na lagoa da Cedae. Outro evento desse tipo aconteceu no dia 29/10/15. Entretanto nesse dia foi obtida uma única amostra de água. No dia anterior, a CSS era de 9 mg/l, sendo que, no dia da parada, subiu para 245 mg/l e, no dia posterior, retornou a 28 mg/l (Figura 7.36).

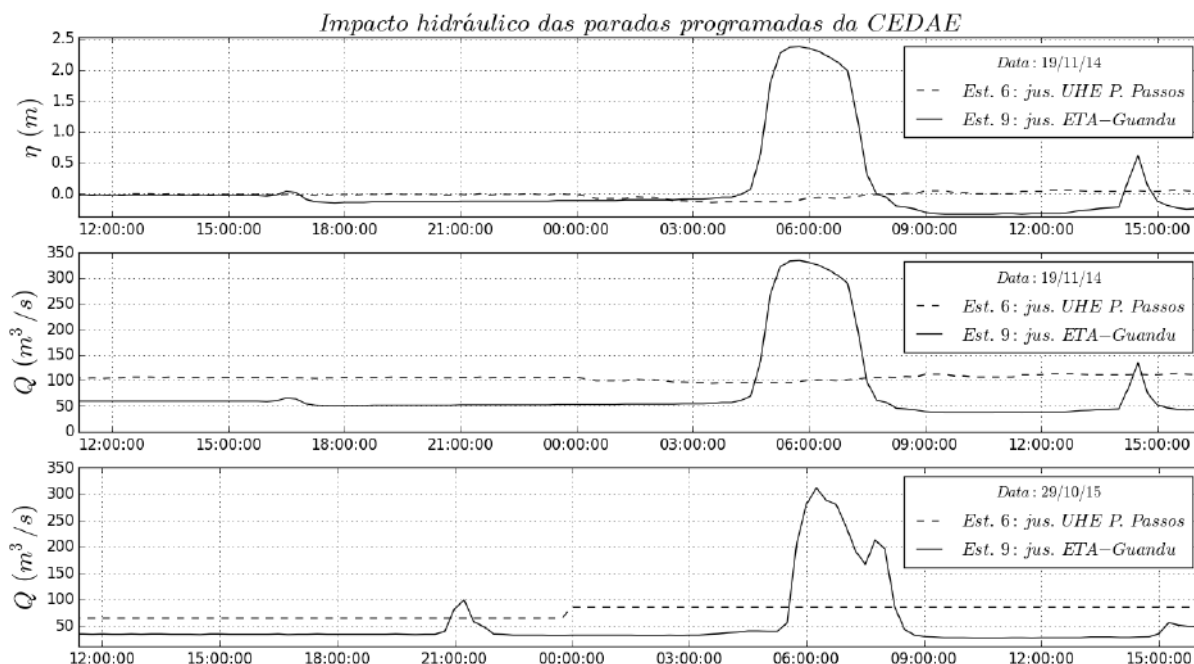


Figura 7.36: Série de nível descontado da média ( $\eta$ ) e vazão na estação 6 e 9 no dia 19/11/14 e vazão na estação 6 e 9 no dia 29/10/15.

A UHE Pereira Passos foi construída com o objetivo de atender à demanda de pico horário de consumo de energia e, por isso, diferentemente das demais usinas da transposição, ela produzia vazões, no período de vigência da resolução n° 211 da ANA, que variavam, em pouco minutos, de um mínimo de 120  $m^3/s$  para um máximo que poderia chegar a 350  $m^3/s$ . Durante a crise hídrica, por meio de resoluções restritivas, essa amplitude de variação foi diminuída e o valor mínimo também, chegando a um mínimo de 75  $m^3/s$  (ver no Capítulo 3). Com o posterior aumento da oferta hídrica, no verão 2015/16, eventos de picos de vazão voltaram a ser mais frequentes, mesmo que regulados por restrições, associadas à recuperação dos reservatórios do Paraíba do Sul.

Essas mudanças bruscas de vazão se propagavam pelo rio até a barragem da ETA-Guandu. A elevação brusca do nível, gerada na lagoa da Cedae, obrigava a Cedae a operar as comportas, de modo a defluir esse excedente e manter o nível da água da lagoa adequado para a captação. Sendo uma lagoa muito rasa, com profundidade inferior a 2 m e leito formado por vaza, esse procedimento produzia ressuspensão, na lagoa e no canal logo abaixo da comporta, aumentando abrupta-

mente a CSS a jusante da ETA-Guandu. Estabelecendo o equilíbrio, a lagoa voltava a se tranquilizar e a CSS voltava a cair. As observações de campo mostraram que esse efeito era mais expressivo, quando esse pico de cheia era antecedido por uma vazão muito baixa e por um período curto de enchente. Por outro lado, quando a enchente era mais lenta e o rio já estava mais cheio, a suspensão era menor.

Durante o ano de crise hídrica, partículas, com tamanhos entre 12 e 60  $\mu\text{m}$ , aumentaram sua participação relativa na distribuição granulométrica das estações a jusante da ETA-Guandu e do canal de São Francisco quando comparada à estação 6 a jusante da UHE Pereira Passos (Figura 7.37). Considerando amostras do mesmo dia, observou-se que as maiores participações das frações acima de 12  $\mu\text{m}$  variaram entre a estação 9 e estação 10, porém com diferenças pequenas, mostrando que os padrões observados a jusante da ETA-Guandu são aproximadamente os mesmos encontrados na ponte da BR 101, no canal de São Francisco (Figura 7.38 a Figura 7.42).

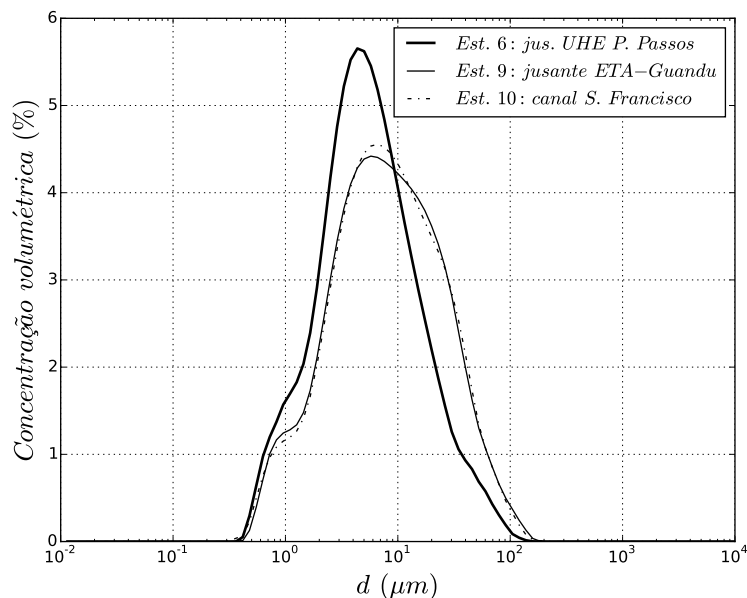


Figura 7.37: Comparação da distribuição granulométrica média das amostras de água coletadas entre 2014 e 2016 na estação 6, 9 e 10

#### 7.5.4 Descarga anual de sólidos suspensos a jusante da UHE Pereira Passos

A estação 9 apresentou amplitudes, na concentração de sólidos suspensos bem mais expressivas do que na estação 6, que teve seu valor amortecido pelos efeitos de retenção e de diluição dos reservatórios da TPPG (Figura 7.43). A estação chuvosa, no ano típico, foi mais expressiva do que a do ano seco, com mês de dezembro e janeiro uma ordem de grandeza em relação ao ano seco (Figura 7.44). Durante o ano seco, excetuando-se o mês de março, em todos os outros meses a descarga de

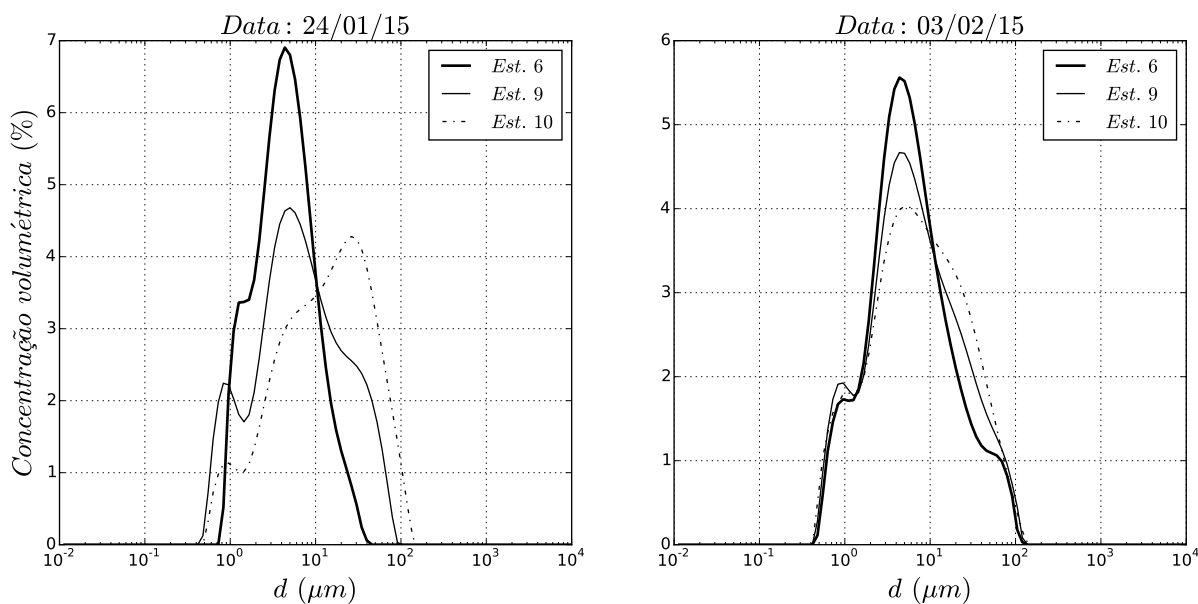


Figura 7.38: Comparação da distribuição granulométrica nas estações 6, 9 e 10 para os dias 24/01/15 e 03/02/15.

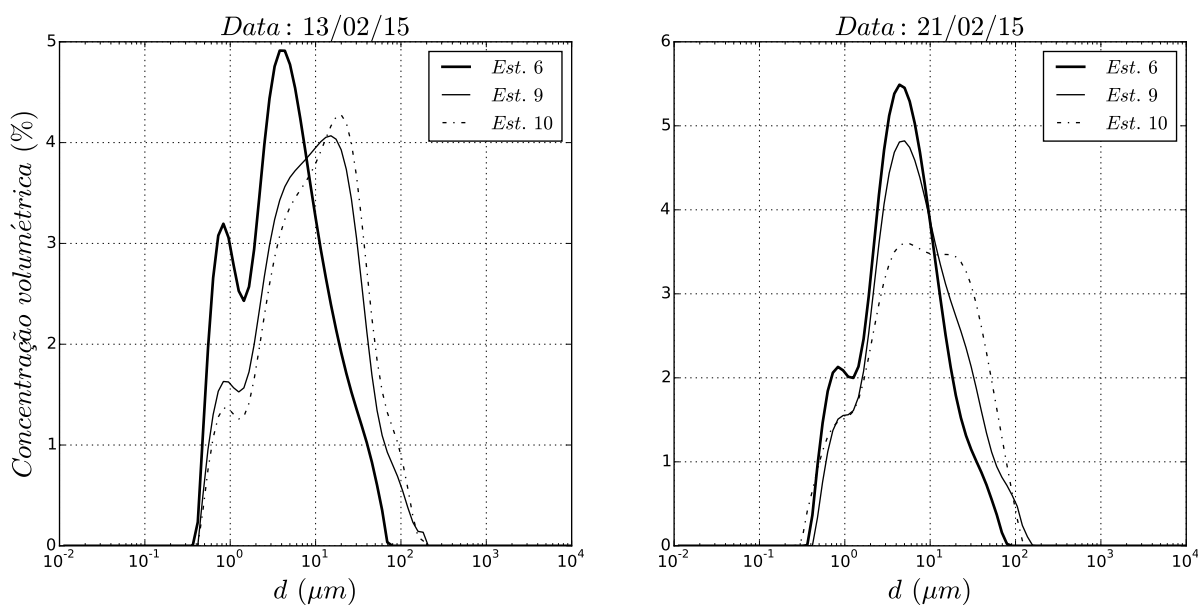


Figura 7.39: Comparação da distribuição granulométrica nas estações 6, 9 e 10 para os dias 13/02/15 e 21/02/15.

sólidos suspensos, a jusante da UHE P. Passos foi igual ou superior ao observado a jusante da ETA-Guandu (Figura 7.45). Mesmo no ano típico, apenas nos meses de dezembro a março a descarga de sólidos suspensos da estação 9 foi maior do que a da estação 6 (Figura 7.46). Na estação seca, tanto no ano típico como no ano seco, a descarga de sólidos suspensos da estação 6 foi maior do que da estação 9 (Figura 7.45 e Figura 7.46). Isso mostra quão significativa tem sido a participação da TPPG no aporte de sólidos em suspensão para a bacia do Guandu e para a baía de

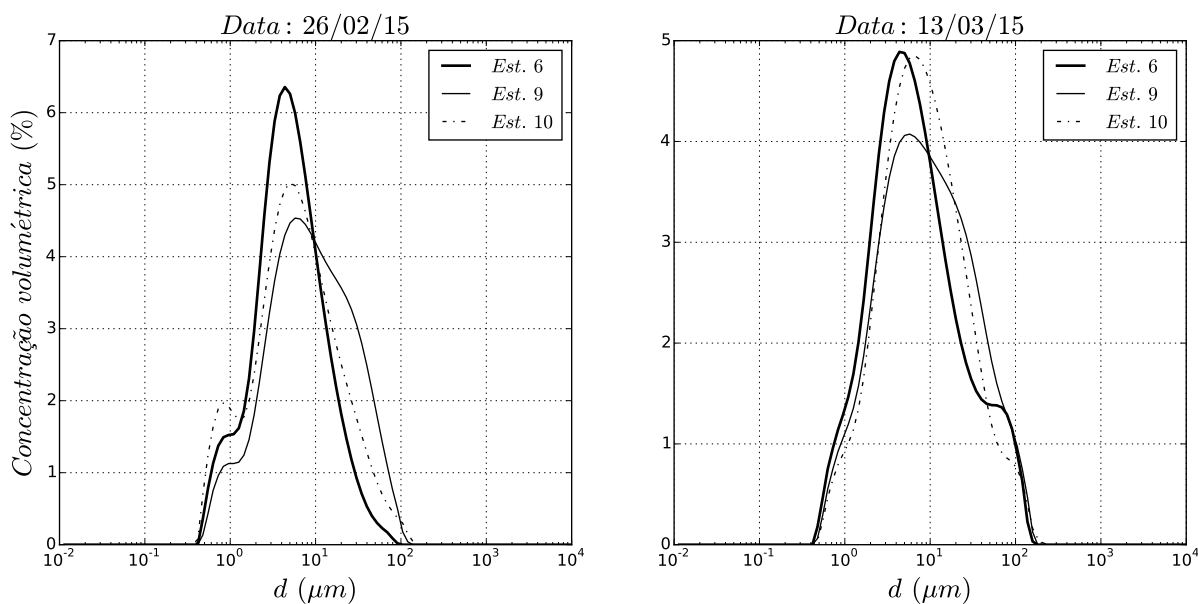


Figura 7.40: Comparação da distribuição granulométrica nas estações 6, 9 e 10 para os dias 26/02/15 e 13/03/15.

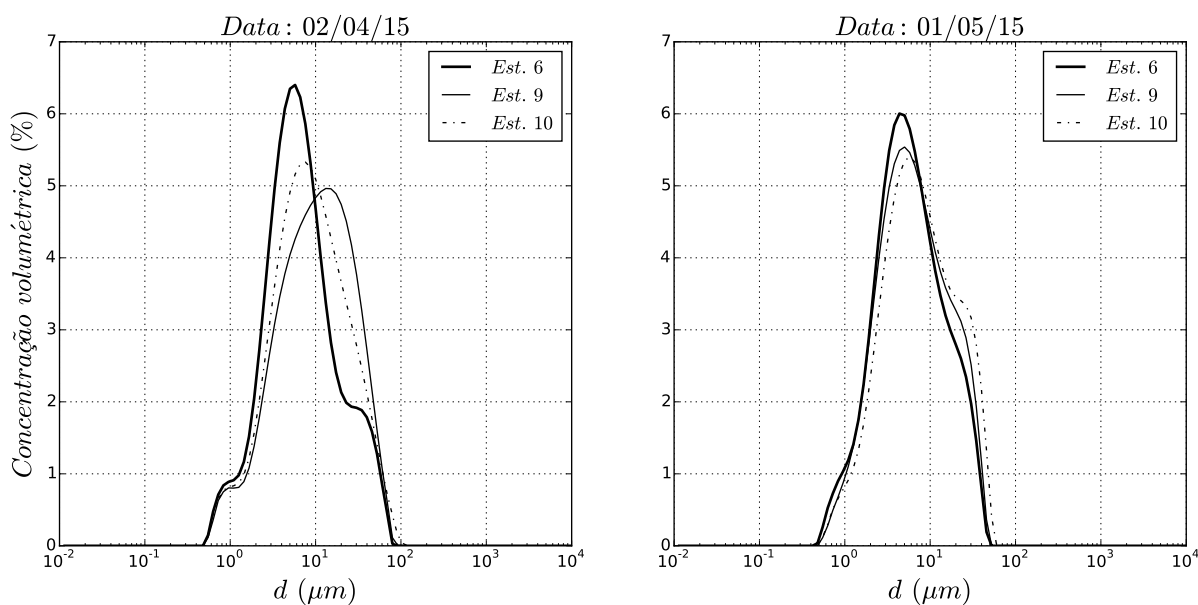


Figura 7.41: Comparação da distribuição granulométrica nas estações 6, 9 e 10 para os dias 02/04/15 e 01/05/15.

Setetiba. Essa diferença mostrou também que os reservatórios de PCH Paracambi e a barragem da Cedae estão retendo parte desses sólidos suspensos, oriundos da TPPG.

A descarga anual de sólidos suspensos da bacia do Guandu atual deveria considerar as parcelas integrais ou parciais de todas as outras bacias integradas pelas transposições. Entretanto, as descargas anuais de sólidos suspensos produzidas pelas bacias da Guarda e Guandu Mirim não puderam ser contempladas no presente

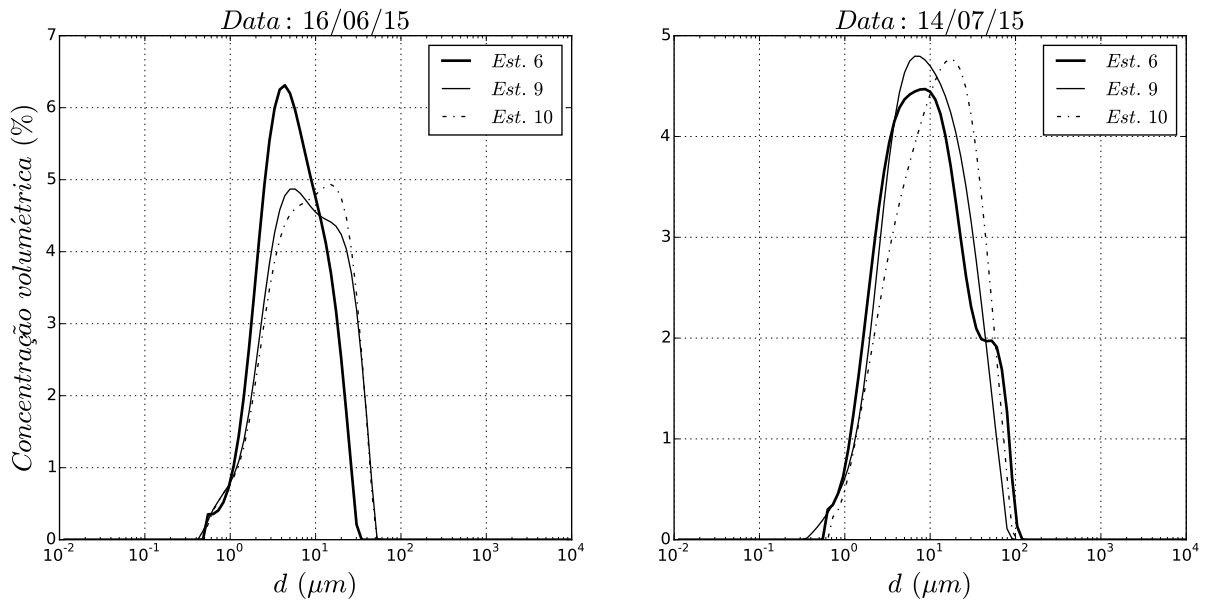


Figura 7.42: Comparação da distribuição granulométrica nas estações 6, 9 e 10 para os dias 16/06/15 e 14/07/15.

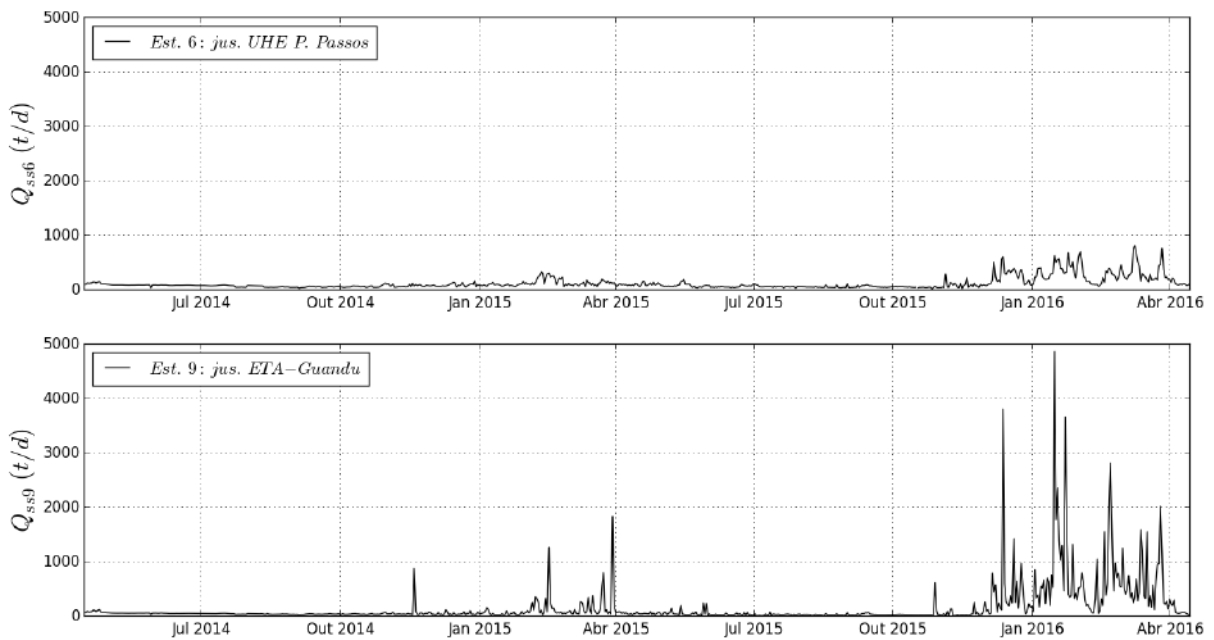


Figura 7.43: Série das descargas diárias sólidos suspensos a jusante da UHE Pereira Passos e ETA-Guandu para o ano seco (15/04/2014-14/04/2015) e para o ano típico (15/04/2015-14/04/2016).

estudo. Logo, o que será apresentado aqui, serão as descargas anuais de sólidos suspensos oriundos da TPPG da bacia do Guandu segundo e suas contribuições às sub-bacias da Guarda e Guandu Mirim pelas transposições da ETA-Guandu e pelas termoelétricas de Santa Cruz e TKCSA (Figura 7.47).

A estimativa da descarga de sólidos suspensos anual a jusante da ETA-Guandu, durante o ano seco, foi de  $26.446 \pm 20.761$  t e, durante o ano típico foi de



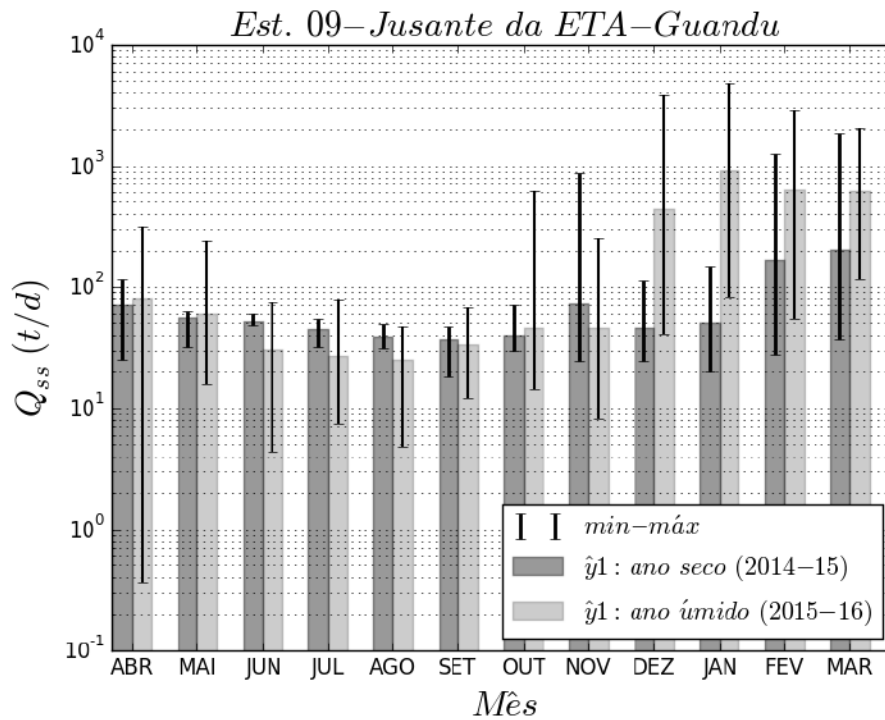


Figura 7.44: Descargas mensais de sólidos suspensos a jusante da ETA-Guandu para os meses o ano seco (15/04/2014-14/04/2015) e para o ano típico (15/04/2015-14/04/2016).

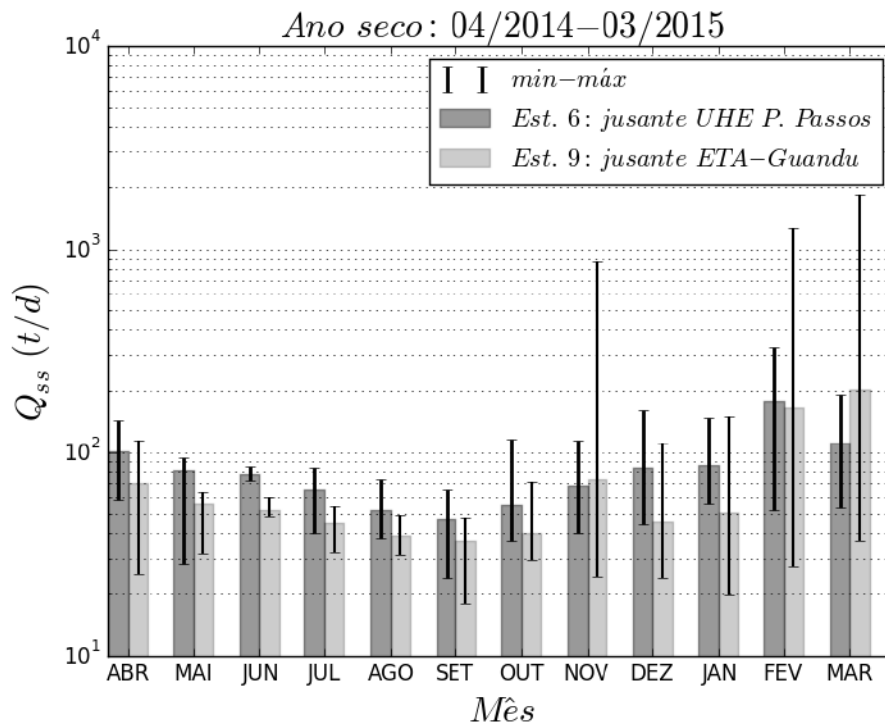


Figura 7.45: Descargas mensais de sólidos suspensos para os meses do ano seco (15/04/2014-14/04/2015) da estação 6 e 9.

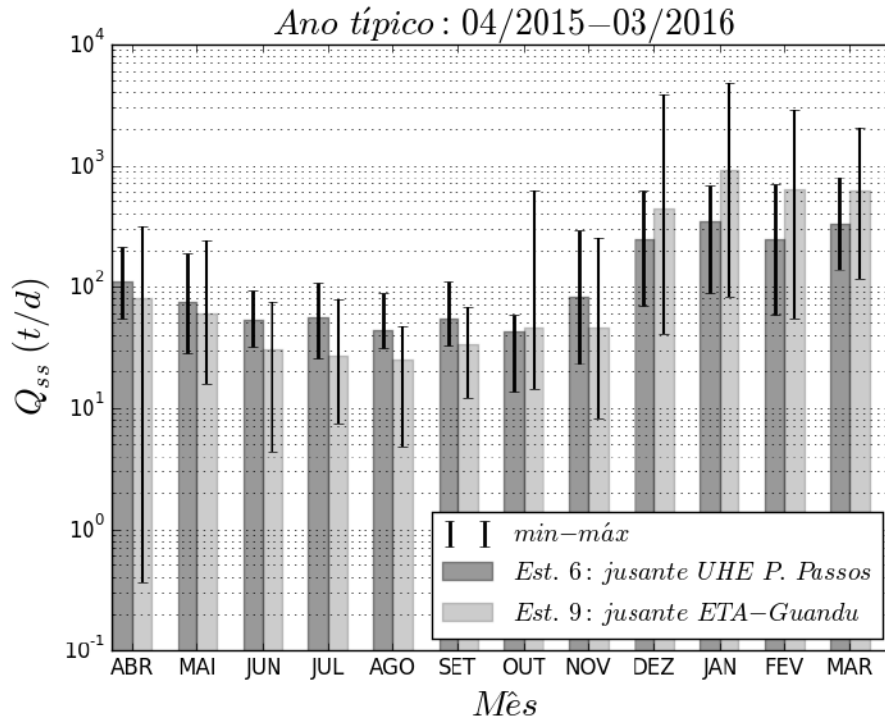


Figura 7.46: Descargas mensais de sólidos suspensos para os meses do ano típico (15/04/2015-14/04/2016) da estação 6 e 9.

$90.337 \pm 16.318$  t. Os sólidos suspensos, captados pela ETA-Guandu, são retidos e lançados na bacia do Guandu Mirim (Figura 7.47). No ano seco a descarga anual de sólidos em suspensão, lançada pela ETA-Guandu foi de  $16.483 \pm 13.243$  t e, no ano típico foi de  $38.687 \pm 9.340$  t (Figura 7.47). Considerando a parcela captada pela ETA-Guandu, o incremento na descarga de sólidos em suspensão, produzida pela bacia do Guandu, no ano seco, foi de  $12.518$  t e, no ano típico, foi de  $77.780$  t (Figura 7.47). No total, considerando a bacia do Guandu atual e a TPPG a contribuição foi de  $129.024 \pm 18.802$  t, no ano típico, e  $42.929 \pm 24.625$  t, no ano seco (Figura 7.47).

Os pontos de captação das termoeletricas Sta. Cruz e TKCSA se encontram na zona estuarina, onde a água fluvial se mistura com a costeira, alterando alguns parâmetros de qualidade de água, como a CSS. Para fins práticos, assumindo que o canal de São Francisco seja dominado pela descarga fluvial, espera-se que as captações superficiais dos usuários reflitam as mesmas CSS observadas na estação 9. Neste cenário, na margem direita do canal de São Francisco, a descarga anual de sólidos em suspensão transposta para o rio da Guarda pela UTE Sta. Cruz, pode ter chegado a  $9.524 \pm 7.651$  t, no ano seco e  $22.352 \pm 5.396$  t, no ano típico (Figura 7.47). Na sua margem esquerda, a descarga anual de sólidos em suspensão transposta para o canal do Guandu pela UTE TKCSA, pode ter chegado a  $6.593 \pm 5.297$  t no ano seco, e  $15.475 \pm 3.736$  t, no ano típico (Figura 7.47). Por fim, na foz do canal de S.

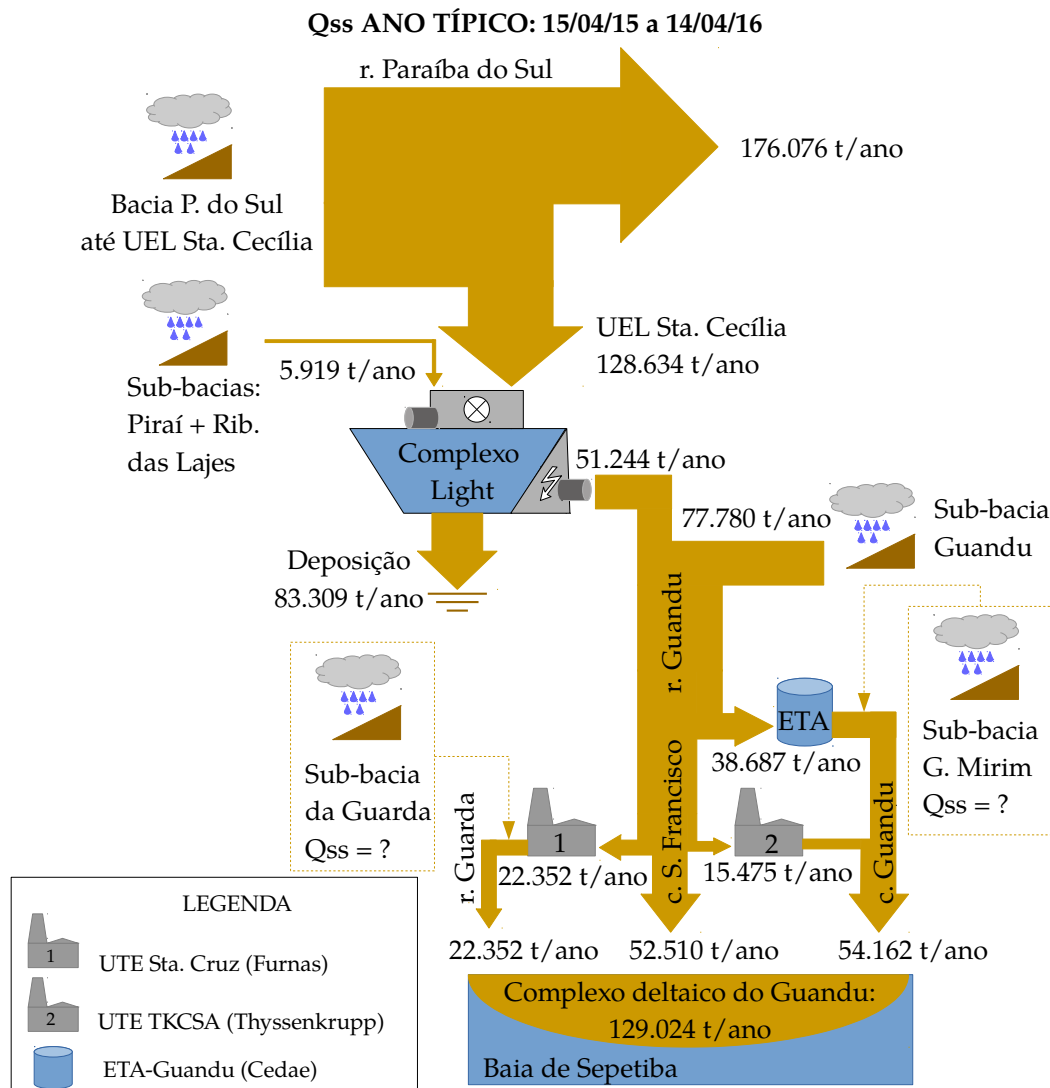


Figura 7.47: Descarga de sólidos suspensos na bacia do Guandu para um ano típico, onde a espessura da seta é proporcional a descarga de sólidos em suspensão.

Francisco, a descarga de sólidos em suspensão pode ter chegado a 52.510 t, no ano típico, e 10.329 t, no ano seco (Figura 7.47).

Considerando apenas a descarga de sólidos suspensos oriunda da bacia do Guandu e TPPG, a foz do canal Guandu foi a que apresentou maior descarga de sólidos em suspensão, entres as fozes do complexo deltaico do Guandu, com pelo menos 54.162 t, para o ano típico, e 23.076 t, para o ano seco (Figura 7.47). Esse valor pode ser ainda maior, uma vez que não são conhecidas as quantidades de floculantes utilizadas no período de estudo como também a produção oriunda da bacia do Guandu Mirim. Se assumirmos o valor médio disponibilizado pela Cedae (180 t/d de floculantes, ver em capítulo 3), então apenas os floculantes incrementariam a descarga em 65.700 t/ano. A foz do rio da Guarda apresentou a menor contribuição entre as fozes, com  $22.352 \pm 5.396$  t, para o ano típico e  $9.524 \pm 7.651$  t, para o ano seco (Figura 7.47). Esse valor pode ser um pouco maior, uma vez que não foram

Tabela 7.8: Comparação das estimativas de descarga de sólidos suspensos defluente da UHE P. Passos obtidas pela ETEP/ECOLOGUS/SM-GROUP (1998), Molisani *et al.* (2006) e tese (seco e típico). NI: não informado;  $Q_{sst}$ : descarga anual de sólidos em suspensão total ( $Q_{ss9} + Q_{ss11}$ ).

	ETEP... (1998)	Molisani <i>et al.</i> (2006)	Ano seco 2014-2015	Ano típico 2015-16
$\bar{Q}_6$ (m <sup>3</sup> /s):	168	175	108	108
$\bar{Q}_9$ (m <sup>3</sup> /s):	168	175	66	67
$\bar{Q}_{11}$ (m <sup>3</sup> /s):	168	175	3	3
$Q_{ss6}$ (t/ano):	322.000	270.000	30.411±4.716	51.244±3.961
$Q_{ss9}$ (t/ano):	573.000	851.000	26.446±20.761	90.337±16.318
$Q_{ss11}$ (t/ano):	NI	NI	16.483±13.243	38.687±9.340
$Q_{sst}$ (t/ano):	573.000	851.000	42.929±24.625	129.024±18.802
$Q_{ss6}/Q_{ss9}$ :	0,56	0,28	0,71	0,40

conhecidas as contribuições da bacia da Guarda.

## 7.6 Discussão

A estimativa da descarga anual de sólidos totais da bacia Guandu, calculadas pelos modelos empíricos da ETEP/ECOLOGUS/SM (1998) e MOLISANI *et al.* (2006), sobrestimaram, respectivamente, em mais de 13 e 20 vezes a estimativa obtida no presente estudo, para o ano seco extremo, e em mais de 4 e 7 vezes a estimativa obtida no ano típico (Tabela 7.8). O percentual de participação da TPPG, nessa estimativa, por sua vez, foi subestimado pelo modelo utilizado por MOLISANI *et al.* (2006). No caso do estudo do ETEP/ECOLOGUS/SM (1998), o percentual ficou pouco acima do obtido no ano típico e abaixo do obtido no ano seco extremo.

O estudo do ETEP/ECOLOGUS/SM (1998) foi baseado em séries medidas de CSS, nas décadas de 80 e 90. Como consequência, a estimativa de descarga de sólidos em suspensão se aproximou mais do valor obtido no presente estudo do que a estimativa feita por MOLISANI *et al.* (2006). A sobrestimação desse cálculo deveu-se à vazão média adotada de 168 m<sup>3</sup>/s (ETEP/ECOLOGUS/SM, 1998), bem superior à vazão média observada, para o período do presente estudo (Tabela 7.8).

O modelo de produção de sedimento em suspensão utilizado por MOLISANI *et al.* (2006), baseou-se em características morfológica (área e declividade) e climatológica (temperatura) da bacia, extraídas do estudo de MOREHEAD *et al.* (2003) e SYVITSKI e MOREHEAD (1999). Esse modelo é indicado como uma alternativa, nos casos de bacias que não dispõem de dados hidrossedimentológicos (MOREHEAD *et al.*, 2003). Seus parâmetros foram ajustados, a partir de uma base de dados de 230 rios (MULDER e SYVITSKI, 1996; SYVITSKI *et al.*, 2000). Os valores so-

restimados desse modelo podem estar relacionados ao fato da maioria desses rios usados no ajuste dos parâmetros serem bem maiores do que o rio Guandu, tanto em área, vazão e descarga de sólidos suspensos (MULDER e SYVITSKI, 1996).

Devido ao descarte dos sólidos suspensos floculados pela ETA-Guandu, o canal Guandu passa ser tão importante em termos quantitativos como o canal de S. Francisco. Considerando que a produção de sólidos suspensos, na bacia Guandu Mirim, ainda é desconhecida e que a previsão futura para a ETA-Guandu é de ampliação em  $12 \text{ m}^3/\text{s}$  (Figura 7.48), espera-se que o canal Guandu se torne a principal fonte de sólidos suspensos para a baía de Sepetiba.

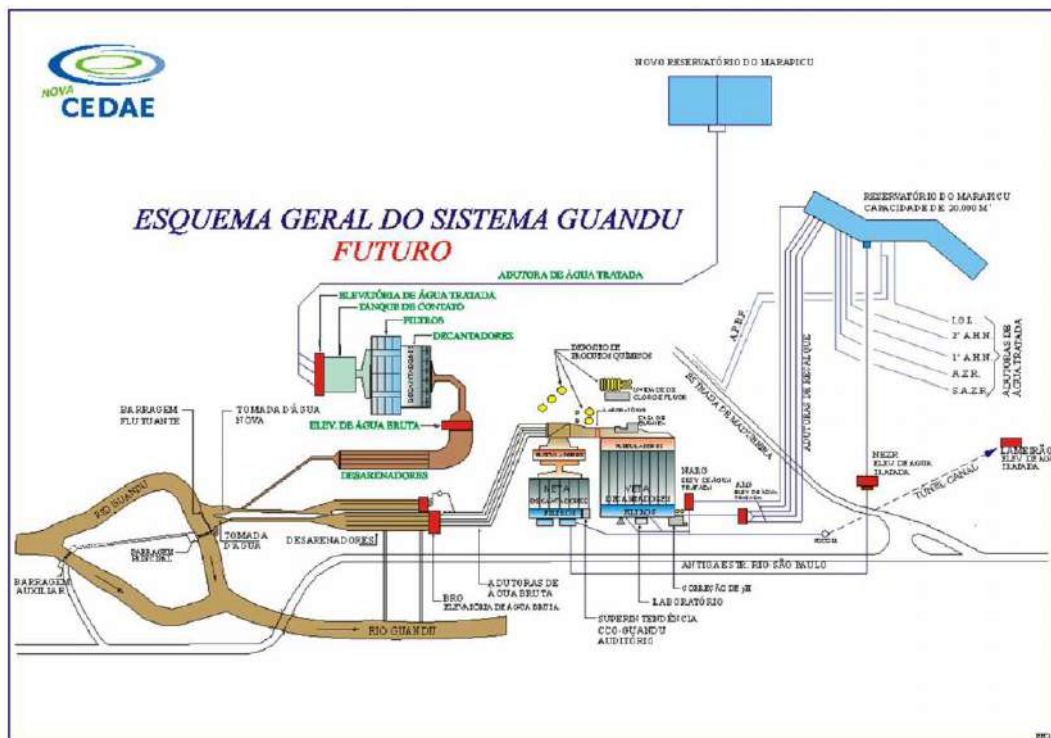


Figura 7.48: Planta esquemática da expansão futura da ETA-Guandu.

O padrão de variação temporal de turbidez, observado nos estudos VINZON e CASSAR (1998) e GALLO *et al.* (2012), na tomada da Cedae foi diferente do observado na estação 9 (Figura 7.35 e Figura 7.35). Essa diferença pode ser explicada pelo fato de que os picos de vazões diárias acima de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ , deixaram de ser frequentes, desde a crise hídrica de 2003, devido às mudanças nas regras operativas (ver em capítulo 3). Outro fato importante é que o turbidímetro da Cedae se localiza em um ambiente de remanso raso, no interior da Lagoa da Cedae, próximo à sua captação, fora do ambiente fluvial do rio. Diferente do leito do rio, o leito da Lagoa é uma potencial fonte de sedimentos finos, em condições de mudanças bruscas no regime do escoamento.

## 7.7 Conclusões

A estimativa da descarga anual de sólidos em suspensão que chega no canal de São Francisco foi de  $26.446 \pm 20.761$  t, no ano seco extremo (15/04/2014-14/04/2015), e de  $90.337 \pm 16.318$  t, no ano típico (15/04/2014-14/04/2015).

A TPPG representou cerca de 40% da descarga anual de sólidos em suspensão total ( $Q_{ss9} + Q_{ss11}$ ), no ano típico, e de 71%, no ano de seca extrema.

A ETA-Guandu foi responsável pela transposição de  $38.687 \pm 9.340$  t de sólidos suspensos, no ano típico, e de  $16.483 \pm 13.243$  t, no ano seco extremo. Se considerarmos a média divulgada pela Cedae, apenas os floculantes incrementariam mais 65.700 t/ano.

O maior pico de turbidez, observado durante as medições (506 NTU ou 515 mg/l), no rio Guandu, ocorreu a jusante da ETA-Guandu, resultante da parada programada para manutenção da ETA-Guandu, que acontece, anualmente entre outubro e novembro.

O uso do turbidímetro, no monitoramento de longa duração, meses a anos, se mostrou limitado pela rápida formação de biofilme (3 dias), que obstruiu a janela óptica de medição.

Durante o ano de crise hídrica, partículas com tamanhos entre 12 e 60  $\mu\text{m}$  aumentaram sua participação relativa, na distribuição granulométrica das estações a jusante da ETA-Guandu e do canal de São Francisco, quando comparada à estação 6 a jusante da UHE Pereira Passos.

O canal Guandu é a principal foz, em termos de descarga de sólidos suspensos, seguido pelo canal de São Francisco e depois pelo rio da Guarda.

# Capítulo 8

## Sumário de conclusões e recomendações

### 8.1 Conclusões

1) A bacia do Guandu chegou a ter sete configurações diferentes, entre 1729 e 2010, variando sua área entre 2.002 km<sup>2</sup> e 18.659 km<sup>2</sup>.

2) O incremento abrupto de uma ordem de grandeza na descarga líquida média (24 para 168 m<sup>3</sup>/s) do Guandu, devido à transposição foi responsável pelo maior desequilíbrio morfológico na história recente do rio.

3) Esse desequilíbrio resultou na erosão do leito do rio, que alimentou a construção de um expressivo delta na foz do canal de S. Francisco.

4) A comparação, entre as cartas de 1935 e 1999, mostrou que, em 64 anos, o delta adquiriu uma espessura de 7 m e a isobatimétrica de -1 m avançou cerca de 2 km para o interior da baía.

5) Os aumentos progressivos do número de usuários e de suas captações projetam uma perspectiva de redução da descarga líquida e, conseqüentemente, a diminuição da taxa de crescimento do delta do canal de S. Francisco.

6) No ano hidrológico de 2015-2016 a descarga anual de sólidos suspensos, bombeada pela UEL Sta. Cecília, foi de 128.634±3.877 t, em regime operativo de 107 m<sup>3</sup>/s. Durante a crise hídrica (2014-2015), esse valor caiu para 72.701±5.402 t, em regime operativo de 114 m<sup>3</sup>/s.

7) O incremento pela transposição de sólidos suspensos para o ano hidrológico de 2015-2016, no rio Guandu, foi de 51.244±3.961 t. Esse valor se reduziu para 30.411±4.716 t, no ano da crise hídrica.

8) A eficiência de retenção do conjunto de reservatórios formado por Santana, Vigário e Ponte Coberta, foi de 59%, no ano da crise hídrica e de 62%, no ano hidrológico de 2015-2016. A faixa de classe de tamanho mais retida, nos três reser-

vatórios, estava entre 8 e 120  $\mu\text{m}$ .

9) A transposição e a bacia do Guandu juntos responderam pelo aporte de  $129.024 \pm 18.802$  t no ano hidrológico de 2015-2016. No ano da crise hídrica esse valor reduziu para  $42.929 \pm 24.625$  t. A transposição participou com 40% no ano típico e 71%, no ano da crise hídrica.

10) A comparação entre a carta geográfica de 1922, a carta náutica de 1935 e as imagens de satélite mostrou que os manguezais, na foz do canal de S. Francisco, em 1975, já tinham avançado 750 m, desde a conclusão da transposição (1953), devido, sobretudo, ao incremento de sólidos suspensos. Na déc. 80, essa região se estabilizou.

11) A partir de 1995, com a ampliação da captação da ETA-Guandu para 45  $\text{m}^3/\text{s}$ , o canal Guandu se tornou a principal fonte de sólidos suspensos para a baía de Sepetiba. Este fato que se expressou pelo rápido crescimento dos manguezais, na sua foz, e pela descaracterização sedimentológica da praia de Sepetiba.

12) A ETA-Guandu foi responsável pela transposição para o canal Guandu de  $38.687 \pm 9.340$  t de sólidos suspensos no ano típico e de  $16.483 \pm 13.243$  t, no ano da crise hídrica.

## 8.2 Recomendações

1) Criação de uma rede de monitoramento hidrossedimentológica permanente, na bacia do Guandu, com pelo menos 8 estações: 1 - na saída do desvio da UEL Sta. Cecília; 2 - no rio Piraí, antes do remanso do reservatório de Santana; 3 - na tomada da UEL Vigário; 4 - logo a jusante da UHE P. Passos; 5 - logo a jusante da PCH Paracambi; 6 - logo a jusante da barragem principal da Lagoa da Cedae; 7 - na saída do efluente da ETA-Guandu para o rio Capenga; 8 - em uma seção no rio Guandu Mirim, a jusante dos principais tributários.

2) Acesso público, pelo SIGA Guandu às séries temporais de captações dos maiores usuários (Complexo da Light, ETA-Guandu, UTE-TKCSA, UTE-Sta. Cruz), com resolução horária.

3) Realizar estudos sedimentológicos de campo para avaliar o potencial impacto da descarga fluvial das três fozes da bacia do Guandu, na descaracterização da orla das praias de Sepetiba e Sta. Luzia.

4) Criação de fundo para recuperação de áreas assoreadas ou erodidas, devido aos efeitos indesejados de intervenções hidráulicas. Tal fundo será mantido pelos responsáveis pelas mudanças morfológicas.



# Referências Bibliográficas

- AIAA, 1995, *Assessment of wind tunnel data uncertainty*. Relatório técnico, AIAA S-071-1995, Washington DC.
- AMANTINO, M., COUTO, R., 2013, “De curral dos padres à gigantesca Fazenda Santa Cruz”, *In: Santa Cruz: de legado dos jesuítas a pérola da Coroa. Engemann C. e Amantino. M. (org.). Rio de Janeiro: EdUERJ.*
- ANA, 2014, “Medição de descarga líquida em grandes rios: manual técnico”, *Agências Nacional de Águas, 2. ed. : Brasília. 94 p.*
- ARAÚJO, F. G., ROCHA, R., 2012, “Composição e riqueza da ictiofauna e relações com variáveis ambientais em sete reservatórios da Light”. *In: In: Bacias Hidrográfica dos rios Guandu, da Guarda e Guandu-mirim. Experiências para gestão dos recursos hídricos. Org.: Filho D T, Antunes J C O e Vettorazzi J S. Rio de Janeiro: INEA., pp. 117–136.*
- ARAÚJO, J. R. S., DE MOURA, W. O. R., SILVA, M. B., 2012, *Avaliação ambiental do rio Paraíba do Sul trecho Funil Santa Cecília*. Relatório técnico. INEA: Instituto estadual do ambiente, Rio de Janeiro.
- ARGENTO, M. S. F., 1989, “The Paraíba do Sul retrogradation and the Atafona environmental impact”. *In: In: Coastline of Brazil. Neves, C. F. (Ed.), ASCE, pp. 267–277.*
- AUDRY, S., SCHÄFER, J., BLANC, G., et al., 2004, “Fifty-year sedimentary record of heavy metal pollution (Cd, Zn, Cu, Pb) in the Lot River reservoirs (France)”, *Environmental Pollution*, v. 132, n. 3, pp. 413–426.
- AYTEK, A., KIŞI, Ö., 2008, “A genetic programming approach to suspended sediment modelling”, *Journal of Hydrology*, v. 351, n. 3, pp. 288–298.
- BACKHEUSER, E., 1925, “Carta geologica do Districto Federal.” *Rio de Janeiro, RJ: Cardinale e Cia. 1 mapa, col., 35,7 x 69,6cm em f. 40,3 x 73,2cm (BN: cart309955).*

- BELLEGARDE, P. D., NIEMEYER, C. J. D., 1857, “Carta chorographica da província do Rio de Janeiro”, *Rio de Janeiro, RJ: Lith. Imp. de Ed. Rensburg, 1858-1961. 1 mapa ms. em 4 seções, 92,5 x 13,6.*
- BIRD-MPO/SEPURB/PQA-ABC-PNUD, 1997, “Diagnóstico preliminar das condições hidrossedimentológicas do rio Paraíba do Sul e seus principais afluentes”, *Fundação Superintendência Estadual de Rios e Lagoas (SERLA): Programa Estadual de Invertimentos da Bacia do rio Paraíba do Sul.*
- BRANDT, S. A., 2000, “Classification of geomorphological effects downstream of dams”, *Catena*, v. 40, n. 4, pp. 375–401.
- BRASIL, 1922, “Carta do Districto Federal”, *Serviço Geográfico Militar. Rio de Janeiro: Serviço Geographico Militar. 1 mapa em 42f., 72 x 94cm.*
- BRUNE, G. M., 1953, “Trap efficiency of reservoirs”, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, v. 34, n. 3, pp. 407–418.
- CARNEIRO, A., 2001, “O Rio e sua Região Metropolitana: um resgate de 60 anos de informações demográficas”, *Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos. Prefeitura da cidade do Rio de Janeiro.*
- CARVALHO, M. M. D., 1887, “Mappa da Provincia do Rio de Janeiro”, *Mandado organizar pelo presidente da provincia o Exmo. Sr. Dr. Antonio da Rocha Fernandes Leão para o serviço da immigração. Rio de Janeiro, RJ: Lith. e Typo Lombaerts. 1 mapa, col, 53 x 73 (BN: cart326149).*
- CARVALHO, M. M. D., 1888, “Provincia do Rio de Janeiro.” *Rio de Janeiro, RJ: H. Lambaerts. 1 mapa, 24 x 36 (BN:cart 326445),.*
- CARVALHO, N. O., FILIZOLA JR., N. P., P.M.C., S., et al., 2000, “Guia e avaliação de assoreamento de reservatórios”, *ANELL: Brasília. 140 p.*
- CARVALHO, N. O., 2008, *Hidrossedimentologia prática*. Inteciência: Rio de Janeiro.
- CAVALCANTI, I. F. D. A., 2014, *Boletim de monitoramento e análise climática*. Relatório Técnico 1, Climanálise: Janeiro 2014. CPTEC, Cachoeira Paulista - SP.
- CBDB, 2011, *A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens*. Comitê Brasileiro de Barragens: Rio de Janeiro.

- CCC, 1907, “Carta do Distrito Federal.” *Comissão da Carta Cadastral (CCC)*, Rio de Janeiro, RJ: Diretoria Geral de Obras e Viação. Sub. Diretoria da Carta Cadastral]. 1 mapa, 36 x 69 (BN: cart309953).
- CCGE, 1922, “Carta chorographica do Estado do Rio de Janeiro.” *mandada organizar pelo presidente do Estado, o exmo. Snr. Dr. Raul de Moraes Veiga para comemorar o centenário da Independencia do Brazil. Comissão, da Carta Geral do Estado (CCGE)*. S. Paulo, SP; Rio de Janeiro, RJ: Ypiranga, 1920-22. 1 Mapa em 4 folhas, 97 x 125cm (cada) (BN: cart522717).
- CHANG, H. H., 1992, *Fluvial processes in river engineering*. Krieger Pub. Co.
- COELHO, F. M., ANTUNES, J. C. O., 2012, “Balanço hídrico da bacia hidrográfica do rio Guandu com as novas demandas por água e com a expansão prevista.” In: *Bacias Hidrográfica dos rios Guandu, da Guarda e Guandu-mirim. Experiências para gestão dos recursos hídricos*. Org.: Filho D. T., Antunes J. C. O. e Vettorazzi J. S., Instituto do Estadual do Ambiente-INEA, pp. 101–116.
- COHIDRO, 2014, “Plano integrado de recursos hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul e planos de ação de recursos hídricos das bacias afluentes. Meio Físico e ecossistemas”, *Resende: AGEVAP*.
- COMITÊ, P. D. S., 2006, “Plano de recursos hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul: resumo: diagnóstico dos recursos hídricos: relatório final”, *Resende: AGEVAP*.
- CORRÊA, D. C., 2008, *Cartografia Histórica do Rio de Janeiro: Reconstituição Espaço-Temporal da cidade do Rio de Janeiro*. Tese de Doutorado, Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geografia / UFRJ.
- COSTA, G., 1994. “Caracterização histórica, geomorfológica e hidrológica do estuário do rio Paraíba do Sul” . .
- COSTA, T., LUMBRERAS, J., ZARONI, M., et al., 2005, “Estimativas de perdas de solo para microbacias hidrográficas do estado do Rio de Janeiro.” *Embrapa Solos-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)*.
- COYNEL, A., SCHÄFER, J., HURTREZ, J.-E., et al., 2004, “Sampling frequency and accuracy of SPM flux estimates in two contrasted drainage basins”, *Science of the total Environment*, v. 330, n. 1, pp. 233–247.

- CRABILL, C., DONALD, R., SNELLING, J., et al., 1999, “The impact of sediment fecal coliform reservoirs on seasonal water quality in Oak Creek, Arizona”, *Water Research*, v. 33, n. 9, pp. 2163–2171.
- DBGEX, 1999, “Folha Itaguaí, Carta Topográfica Matricial,”, *MI: 2744-3, IN: SF-23-Z-A-VI-3, DBGEx. 1 mapa, 1:50000*.
- DE CARVALHO GOMES, F., GODOY, J. M., GODOY, M. L. D., et al., 2009, “Metal concentrations, fluxes, inventories and chronologies in sediments from Sepetiba and Ribeira Bays: A comparative study”, *Marine Pollution Bulletin*, v. 59, n. 4, pp. 123–133.
- DE VRIEND, H., 2011, “River science in the light of climate change”, *Impact of climate change on water resources–200 years hydrology in Europe–a European perspective in a changing world*, p. 25.
- DE VRIEND, H., 2015, “The long-term response of rivers to engineering works and climate change”. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*, v. 168, pp. 139–144. Thomas Telford Ltd.
- DELGADO, J. V. C., 2016. “Avaliação da aplicação do lodo da ETA Guandu na pavimentação como disposição final ambientalmente adequada”. .
- DGE, 1960, “Mapa do Estado da Guanabara.” *Rio de Janeiro, RJ: Departamento de Geografia e Estatística (D.G.E.). 1 planta, 42,2 x 80cm em f. 50 x 87,5cm (BN: cart320579)*.
- DHN, 1935, “Baía de Sepetiba”, *Carta náutica número: 1610. 1:50000*.
- DHN, 1999, “Baía de Sepetiba”, *Carta náutica número: 1622. 1:50000*.
- ETEP/ECOLOGUS/SM, 1998, “Macroplano de gestão e saneamento ambiental da bacia da baía de Sepetiba. Relatório final.” *Parte I - Diagnóstico Ambiental. Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Rio de Janeiro - SEMA/RJ*.
- FEEMA, 1985, “Aspectos gerais sobre a utilização das águas do rio Guandu”, *Rio de Janeiro: Fundação Estadual Engenharia do Meio Ambiente*.
- FERGUSON, R. I., 1986, “River loads underestimated by rating curves”, *Water Resources Research*, v. 22, n. 1, pp. 74–76.
- FERREIRA, F., R.O., F., 2014, *Manejo de macrófitas reservatórios da Light Energia*. Relatório técnico, Light Energia: Rio de Janeiro.

Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/9A16ED0C/Apres\\_ManejoMacrofitas\\_LightEnergia.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/9A16ED0C/Apres_ManejoMacrofitas_LightEnergia.pdf)>.

- FORTE, C. M. S., 1996, *Determinação das Taxas de Sedimentação na Porção Nordeste da Baía de Sepetiba Utilizando Datação com o Radioisótopo  $^{210}\text{Pb}$  em Excesso*. Tese de Doutorado, Universidade Federal Fluminense.
- FREIRE, O., 1911, “Mappa do Districto Federal.” [cidade do Rio de Janeiro]. *Rio de Janeiro ; S. Paulo ; Belo Horizonte: Francisco Alves e Cia. 1 mapa, col., 81,7 x 103,2 cm em f. 91 x 111,5cm (BN: cart177671)*.
- FRIDMAN, F., 2013, “As cidades e o café”, *Anais: Encontros Nacionais da ANPUR*, v. 11.
- FURNAS, 2014, *Relatório de sustentabilidade 2014*. Relatório técnico, Superintendência de Estratégia e Sustentabilidade, Furnas: Rio de Janeiro.
- GALLO, M. N., VINZON, S. B., JORDÃO, M. D. L., et al., 2012, “Variabilidade das concentrações de sedimentos em suspensão no rio Guandu”. In: *In: Bacias Hidrográfica dos rios Guandu, da Guarda e Guandu-mirim. Experiências para gestão dos recursos hídricos. Org.: Filho D T, Antunes J C O e Vettorazzi J S. Rio de Janeiro: INEA.*, pp. 325–339.
- GAMA, J. S. D., 1875, “História da Imperial Fazenda de Santa Cruz. Primeira Parte”, *Revista do Instituto Histórico e Geográfico Brasileiro. Tomo 38. ParteII*.
- GARCIA, M., 2008, “Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling, and practice”. ASCE.
- GELLIS, A. C., 2013, “Factors influencing storm-generated suspended-sediment concentrations and loads in four basins of contrasting land use, humid-tropical Puerto Rico”, *Catena*, v. 104, pp. 39–57.
- GÓES, H. D. A., 1942, “Baixada de Sepetiba”, *Rio de Janeiro: Imprensa Nacional*.
- GOES, M. H. B., 1994, *Diagnóstico ambiental do município de Itaguaí (RJ) por geoprocessamento*. Tese de Doutorado, Tese de Doutorado–UNESP, Rio Claro–RJ.
- GUM, 2003, “Guia para a Expressão da Incerteza de Medição”, *ABNT, INMETRO and SBM, PROGRAMA RH-METROLOGIA: 3ª Edição brasileira, Rio de Janeiro*.

- HEINEMANN, H., 1981, “A new sediment trap efficiency curve for samll reservoirs”, *Water Resources Bulletin*, v. 17, n. 5, pp. 825–830.
- HEINEMANN, H., 1984, “Reservoir trap efficiency”, *Erosion and Sediment Yield: Some Methods of Measurement and Modelling*. Geo Books, Regency House Norwich(England). p 201-218, 7 fig, 26 ref.
- ICOLD, 1989, *Sedimentation control of reservoirs*. Relatório técnico, International Commission on Large Dams. Bulletin 67, Paris.
- IMUPP, 2007, “Mapa de Santa Cruz.” *Gerência de Cartografia, Diretoria de Informações Georeferenciadas, Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos (IMUPP)*. 1 mapa, 1:50000.
- INEA, 2012, “Reconstituição da orla resgata o lazer na praia de Sepetiba”, *Site do Instituto Estadual do Meio Ambiente*, <http://www.inea.rj.gov.br/Portal/MegaDropDown/ProgramaseProjetos/>.
- INEA, 2013, *Relatório 2012: cobrança pelo uso da água na região hidrográfica do rio Guandu*. Relatório técnico, Gerência de Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos (GEIRH), Diretoria de Gestão das Águas e do Território (DIGAT), Instituto Estadual do Ambiente (INEA): Rio de Janeiro.
- JANSEN, P. P., VAN BENDEGOM, L., VAN DEN BERG, J., et al., 1979, *Principles of River Engineering: The non-tidal alluvial river*. Delftse Uitgevers Maatschappij.
- JANSSON, M. B., 1996, “Estimating a sediment rating curve of the Reventazon river at Palomo using logged mean loads within discharge classes”, *Journal of Hydrology*, v. 183, n. 3-4, pp. 227–241.
- JOHN, J., 1996, “Oligotrophication and its discontents: effects of reduced nutrient loading on reservoir fisheries”. In: *American Fisheries Society Symposium*, v. 16, pp. 285–295.
- JONES, F. O., 1973, *Landslides of Rio de Janeiro and the Serra das Araras escarpment, Brazil*. Relatório técnico, USGPO.
- JOTHIPRAKASH, V., VAIBHAV, G., 2008, “Re-look to conventional techniques for trapping efficiency estimation of a reservoir”, *International Journal of Sediment Research*, v. 23, n. 1, pp. 76–84.
- KELMAN, R., CASTRO, T., HALLOT, C., et al., 2013, *Avaliação de impactos de novas transposições de águas propostas para o rio Paraíba do Sul*. Relatório técnico, AGEVAP:PSR.

- KISI, O., 2005, “Suspended sediment estimation using neuro-fuzzy and neural network approaches”, *Hydrological Sciences Journal*, v. 50, n. 4.
- KNEIP, L. M., PALLESTRINI, L., 1987, “Arqueologia: estratigrafia, cronologia e estruturas do Sambaqui Zé Espinho”, *Coletores e Pescadores Pré-Históricos de Guaratiba, Rio de Janeiro, Série Livros*, v. 5, pp. 89–141.
- LABHID, 1999, *Programa estadual de investimentos da bacia do rio Paraiba do Sul – RJ; Projeto qualidade das águas e controle da poluição hídrica (PQA)*. Relatório técnico, Laboratório de Hidrologia e Estudos de Meio Ambiente (LABHID/COPPE/UFRJ). Rio de Janeiro: SEMA-SEPURB/MPOBIRD-PNUD.
- LAEMMERT, 1866, “Província do Rio de Janeiro”, *1 mapa, pb, 43 x 60 (BN: cart527116)*.
- LEÃO, M. V., 1767, “Cartas topographicas da capitania do Rio de Janeiro”, *Mandadas tirar pelo Illmo. e Exmo. Sr. Conde da Cunha Capitam general e Vice-Rey do Estado do Brazil. [S.l.: s.n.], 15 cartas ms, desenho a tinta nanquim, 56 x 36 (BN: cart512339)*.
- LEME, R. P., L, P. V. P., T, M., et al., 2015, “Modelagem matemática para projeto de proteção e restauração da praia de Atafona - São João da Barra - RJ”, *XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília-DF*.
- LI, W., WANG, J., YANG, S., et al., 2014, “Determining the existence of the fine sediment flocculation in the Three Gorges Reservoir”, *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 141, n. 2, pp. 05014008.
- LICK, W., HUANG, H., JEPSEN, R., 1993, “Flocculation of fine-grained sediments due to differential settling”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 98, n. C6, pp. 10279–10288.
- LOPES, T., 2014, “Mangue cresce nas areias de Sepetiba”, *Reportagem do Viva Favela, um projeto VIVA RIO, <http://vivafavela.com.br/547-praia-de-sepetiba-volta-a-ser-invadida-por-manguezal/>*.
- MAGGI, F., TANG, F. H., 2015, “Analysis of the effect of organic matter content on the architecture and sinking of sediment aggregates”, *Marine Geology*, v. 363, pp. 102–111.
- MAHLMANN, H., 1848, “Map of the province of Rio de Janeiro.” *Berlim [Alemanha]: Goe-Lith. H. Mahlann. 1 mapa, aquarelado, 20 x 32,2cm em f. 20,2 x 33,5 (BN: cart175655)*.

- MAHMOOD, K., 1987, *Reservoir sedimentation: impact, extent, and mitigation. Technical paper*. Relatório técnico, International Bank for Reconstruction and Development, Washington, DC (USA).
- MASON, R. R., 2011, *Exposure time for ADCP moving-boat discharge measurements made during steady flow conditions*. Relatório técnico, Office of Surface Water Technical Memorandum: US Geological Survey.
- MASSOW, H., 1892, “Estado do Rio de Janeiro”, *composto sobre os ultimos mappas existentes e de acordo com as estatísticas e demarcações officiaes. Rio de Janeiro, RJ: Laemmert, ( Leipzig : Est. Art. e Geogr. de C. Opitz ), 1892. 1 mapa, col, 68 x 95 (BN:cart225708)*.
- MIETTA, F., 2010, *Evolution of the floc size distribution of cohesive sediments*. Tese de Doutorado, TU Delft press.
- MIETTA, F., CHASSAGNE, C., WINTERWERP, J., 2009, “Shear-induced flocculation of a suspension of kaolinite as function of pH and salt concentration”, *Journal of colloid and interface science*, v. 336, n. 1, pp. 134–141.
- MOLISANI, M., MARINS, R., MACHADO, W., et al., 2004, “Environmental changes in Sepetiba Bay, SE Brazil”, *Regional Environmental Change*, v. 4, n. 1, pp. 17–27.
- MOLISANI, M., KJERFVE, B., SILVA, A., et al., 2006, “Water discharge and sediment load to Sepetiba Bay from an anthropogenically-altered drainage basin, SE Brazil”, *Journal of Hydrology*, v. 331, n. 3, pp. 425–433.
- MONTEZUMA, P. N. D., 2007, *Impacto nos Processos de Assoreamento na Baía de Sepetiba-RJ, de Sedimentos Oriundos da Bacia Contribuinte e de Dragagens Portuárias*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- MONTEZUMA, P. N. D., 2012, “Análise de prováveis fatores causadores do processo de assoreamento na Baía de Sepetiba-RJ”. In: *Bacias Hidrográfica dos rios Guandu, da Guarda e Guandu-mirim. Experiências para gestão dos recursos hídricos. Org.: Filho D. T., Antunes J. C. O. e Vettorazzi J. S.*, Instituto do Estadual do Ambiente-INEA, pp. 21–41.
- MOREHEAD, M. D., SYVITSKI, J. P., HUTTON, E. W., et al., 2003, “Modeling the temporal variability in the flux of sediment from ungauged river basins”, *Global and Planetary Change*, v. 39, n. 1, pp. 95–110.



- MOUCHEZ, E., 1868, “Ilha Grande e Sepetiba Bays”, *French Imperial Navy: 1868-69, South America and East Coast, Brazil. 1 mapa.*
- MUELLER, D. S., WAGNER, C. R., REHMEL, M. S., et al., 2009, *Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat.* US Department of the Interior, US Geological Survey.
- MULDER, T., SYVITSKI, J., 1996, “Climatic and morphologic relationships of rivers: implications of sea-level fluctuations on river loads”, *The Journal of Geology*, v. 104, n. 5, pp. 509–523.
- MUSTE, M., YU, K., GONZALEZ-CASTRO, J., et al., 2004, “Methodology for estimating ADCP measurement uncertainty in open-channel flows”. In: *Proceedings of the 2004 World Water and Environmental Resources Congress: Critical transitions in Water and Environmental Resources.* American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, CD-ROM.
- NIEMEYER, C. J. D., 1839, “Carta corographica da provincia do Rio de Janeiro”, *segundo os reconhecimentos feitos pelo Coronel Conrado Jacob de Niemeyer [e outros][S.l.: s.n.]*, (BN: cart164664).
- NORIE, J., 1834, “A New Chart of the Coast of Brazil from Capes St. Thomas to the Port of Santos”, *London [Inglaterra]: J. W. Norie Co, 1834. 1 mapa, 65,3 x 94cm.*
- BERG, K. A., MORLOCK, S. E., CALDWELL, W. S., 2005, “Quality-assurance plan for discharge measurements using acousting doppler current profilers”, *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report-5183. 76 p.*
- BERG, K., MUELLER, D. S., 2007, “Validation of streamflow measurements made with acoustic Doppler current profilers”, *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 133, n. 12, pp. 1421–1432.
- OLDEMAN, L., HAKKELING, R., SOMBROEK, W., 1991, *World map of the status of human-induced soil degradation: an explanatory note, 2nd. rev.* Relatório técnico, ISRIC [etc.].
- ONS, 2014, *Diretrizes para as regras de operação de controle de cheias - Bacias do rio Paraíba do Sul (ciclo 2014-2015).* Relatório técnico, Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Diretoria de Planejamento Programação da Operação, RE 3/0154/2014: Rio de Janeiro.

- ONS, 2012, *Diretrizes para as regras de operação de controle das cheias - Bacia do rio Paraíba do Sul (ciclo 2013-2014)*. Operador Nacional do Sistema Elétrico, Rio de Janeiro.
- ONS, 2013, “Inventário das Restrições Hidráulicas”, *Revisão - 1. Operador Nacional do Sistema Elétrico: Rio de Janeiro*.
- ONS, 2015, *Atualização de séries históricas de vazões - período 1931 a 2014*. Operador Nacional do Sistema Elétrico, Rio de Janeiro.
- ONS, 2016, *Inventário de restrições operativas hidráulicas dos aproveitamentos hidrelétricos*. Relatório técnico, Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Diretoria de Planejamento Programação da Operação, Revisão 1, DPP-REL - 0046/2016: Rio de Janeiro.
- PACHECO JORDÃO, E., ARRUDA PESSÔA, C., 2005, “Tratamento de esgoto doméstico”, *ABES. Rio de Janeiro, Brasil*.
- PENHA, L. J. M., 1830, “Planta da Provincia do Rio de Janeiro”, [S.l.: s.n.], 1 mapa ms., col., 38 x 54,5cm em f. 41,5 x 67,5cm.
- PINTO, E. D. A., AZAMBUJA, A. D., FARIAS, J., et al., 2011, “Atlas pluviométrico do Brasil: isoietas mensais, isoietas trimestrais, isoietas anuais, meses mais secos, meses mais chuvosos, trimestres mais secos, trimestres mais chuvosos”, *Brasília: CPRM*, v. 1.
- RENSBURG, E., 1865, “Nova carta chorographica da Provincia do Rio de Janeiro.” *Lithographia Imperial, 1 mapa, 49,6 x 71,5cm em f. 53,3 x 75cm (BN: cart268947)*.
- RIBEIRO, G. P., ROCHA, C. H. D. O., FIGUEIREDO JR., A. G., et al., 2004, “Análise espaço-temporal no suporte á avaliação do processo de erosão costeira em Atafona, São João da Barra (RJ)”, *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 56, n. 2, pp. 129–138.
- RITTA, J. D. S., 2009, *A água do Rio: do Carioca ao Guandu: a história do abastecimento de água da cidade do Rio de Janeiro*. Synergia Editora.
- RM68, 2013, “Incerteza de medição: guia prático do avaliador de laboratórios”, *REDE METROLÓGICA: Revisão 5, Porto Alegre*.
- ROSCIO, F. J., 1777, “Carta corographica da capitania do Ryo de Janeyro, capital dos estados do Brasil.” [S.l.: s.n.], 1 mapa ms., desenho a nanquim, 58 x 94,5cm em f. 60 x 96,5 (BN:cart534317).

- ROSSETE, A. N., 1996, *Mineração e planejamento ambiental. Estudo de caso: a mineração de areia no município de Itajai-RJ*. Tese de Doutorado, Tese de Mestrado–UNICAMP, Campinas–SP.
- SANTOS, M., 2005, *A urbanização brasileira*. Edusp.
- SCHILT, C. R., 2007, “Developing fish passage and protection at hydropower dams”, *Applied Animal Behaviour Science*, v. 104, n. 3, pp. 295–325.
- SCHUMM, S. A., 1977, “The fluvial system”, .
- SEA, 2014, “Despoluição da Praia de Sepetiba”, *Site da Secretaria do Estado do Meio Ambiente*, <http://www.rj.gov.br/web/sea/exibeconteudo?article-id=163579>.
- SEA-PROJECTS, 2011, *Projeto de monitoramento da qualidade da água do rio Piraí a montante de Tocos, na região hidrográfica II-Guandu*. Relatório técnico, Relatório de atividades - visita técnica (Pré Campo).
- SEA/INEA, 2010, “O estado do ambiente. Indicadores ambientais do rio de janeiro 2010.” *Org. Napoleão P e Bastos J. Secretaria do Estado do Ambiente (SEA) e Instuto Estadual do Meio Ambiente (INEA)*. Rio de Janeiro.
- SEMADS, 2001, “BACIA DA BAIA DE SEPETIBA, Bacias Hidrográficas e Recursos Hídricos da Macrorregião 2”, *Projeto PLANÁGUA SEMADS/GTZ*.
- SILVA, G. T. A., 2013, “Voçorocas no Médio Paraíba: padrões de ocorrências e potenciais impactos”, *RJ. Dissertação (Mestrado)*. Universidade Federal de Rural do Rio de Janeiro.
- SILVA, M. G. S., WILSON-JR, G., 2013, *Evolução morfológica de trechos de escoamentos fluviais*. Bento Gonçalves, RS, XX Simpósio Brasileiro de Recursos hídricos.
- SMITH, V. H., TILMAN, G. D., NEKOLA, J. C., 1999, “Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems”, *Environmental pollution*, v. 100, n. 1, pp. 179–196.
- SN, 1879, “Companhia de estrada de ferro D. Pedro II. Planta geral da estrada de ferro D. Pedro II: e das outras estradas de ferro das provincias do Rio de Janeiro, S.Paulo e Minas Gerais do Imperio do Brasil.” *Rio de Janeiro, RJ: Angelo e Robin, 1879. 1 mapa, col, 53 x 117 (BN: cart172356)*.

- S.N., 1823, “Carta geographica da Provincia do Rio de Janeiro.” [S.l.: s.n.], 1 mapa ms., desenhado a nanquim, 61,4 x 96,4cm em f.64 x 98,3cm (BN: cart171000).
- SN, 1866, “Nova carta chorographica da provincia do Rio de Janeiro”, G.W. and C.B. Colton Co. Nova Iorque [Estados Unidos]: [s.n.], 1866. 1 mapa, col, 61 x 91cm (BN: cart537126).
- S.N., 18??, “Mappa da Fazenda de S[an]ta Cruz.” 1 mapa, 39 x 27 cm (BN: cart326130).
- SN, 1767, “Planta em q. se mostrão as guardas e registos q. há na capitania do Rio de Janeiro.” [S.l.: s.n.], 1 mapa ms., desenho a nanquim, 51,3 x 72,2cm em f. 53 x 73,5 (BN: cart534307).
- SN, 1830, “Planta da provincia do Rio de Janeiro.” Mannheim [Alemanha]: R. Schlicht Lithogr, 1830. 1 mapa, litografado, 35,5 x 63cm em folha de 44 x 67 cm (BN: cart325195).
- SONDOTECNICA, 2006, “Plano Estratégico de Recursos Hidrícicos das Bacias Hidrográficas dos Rios Guandu, da Guarda e Guandu Mirim”, *Relatório do Diagnóstico-Final, Agência Nacional de Água, v.1.*
- SYVITSKI, J. P., MOREHEAD, M. D., 1999, “Estimating river-sediment discharge to the ocean: application to the Eel margin, northern California”, *Marine Geology*, v. 154, n. 1, pp. 13–28.
- SYVITSKI, J. P., MOREHEAD, M. D., BAHR, D. B., et al., 2000, “Estimating fluvial sediment transport: the rating parameters”, *Water resources research*, v. 36, n. 9, pp. 2747–2760.
- SYVITSKI, J. P., 2003, “Supply and flux of sediment along hydrological pathways: research for the 21st century”, *Global and Planetary Change*, v. 39, n. 1, pp. 1–11.
- TSAI, C.-H., IACOBELLIS, S., LICK, W., 1987, “Flocculation of fine-grained lake sediments due to a uniform shear stress”, *Journal of Great Lakes Research*, v. 13, n. 2, pp. 135–146.
- VÉLEZ, M. V. N., 2012, *Meio Ambiente, Informação e Mobilização Social: a degradação da praia de Sepetiba.* Universidade Federal do Rio de Janeiro/Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia.

- VERSTRAETEN, G., POESEN, J., 2000, “Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds: methods and implications for the assessment of sediment yield”, *Progress in Physical Geography*, v. 24, n. 2, pp. 219–251.
- VILLIERS, D. L. A., 1850, “Carta topographica e administrativa da provincia do Rio de Janeiro e do Municipio Neutro”, *Erigida sobre os documentos mais modernos pelo Vcde. J. de Villiers de L’lle Adam. Rio de Janeiro, RJ: Garnier Irmãos, 1850. 1 mapa, col (BN: cart67925)*.
- VINZON, S. B., CASSAR, J. C. M., 1998, “Estudo Hidrossedimentológico do rio Guandu”, *Relatório Final*.
- VÖRÖSMARTY, C. J., MEYBECK, M., FEKETE, B., et al., 2003, “Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments”, *Global and Planetary Change*, v. 39, n. 1–2, pp. 169–190. ISSN: 0921-8181. doi: 10.1016/S0921-8181(03)00023-7. The supply of flux of sediment along hydrological pathways: Anthropogenic influences at the global scale.
- WALLING, D., 1983, “The sediment delivery problem”, *Journal of hydrology*, v. 65, n. 1, pp. 209–237.
- YANG, C. T., 1996, *Sediment transport: theory and practice*. McGraw-hill New York.
- YANG, S., MILLIMAN, J., LI, P., et al., 2011, “50,000 dams later: erosion of the Yangtze River and its delta”, *Global and Planetary Change*, v. 75, n. 1, pp. 14–20.
- ZALÁN, P. V., OLIVEIRA, J., 2005, “Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil”, *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*, v. 13, n. 2, pp. 269–300.