

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Camila Bergmann Goulart**

**MODELAGEM DE TURBIDEZ NA BACIA HIDROGRÁFICA  
DO RIO DOCE**

Porto Alegre  
Janeiro 2018

**CAMILA BERGMANN GOULART**

**MODELAGEM DE TURBIDEZ NA BACIA HIDROGRÁFICA  
DO RIO DOCE**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientador: Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan**

Porto Alegre  
Janeiro 2018

**CAMILA BERGMANN GOULART**

**MODELAGEM DE TURBIDEZ NA BACIA HIDROGRÁFICA  
DO RIO DOCE**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Coordenadora da atividade de ensino Trabalho de Conclusão de Curso II - CIVIL da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 22 de dezembro de 2017

Prof. Fernando Mainardi Fan

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Orientador

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Fernando Mainardi Fan (IPH/UFRGS)**

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Gean Paulo Michel (IPH/UFRGS)**

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva (IPH/UFRGS)**

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, Luiz Carlos e Rose, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan, orientador deste trabalho, pelo apoio, orientação, dedicação e paciência. Agradeço também pela oportunidade de aprofundar meus conhecimentos na área de hidrossedimentologia.

Agradeço a todos os bons professores que tive ao longo do curso de graduação, com os quais tive oportunidade de aprender ao longo desta caminhada. Graças a eles, pude aprofundar meus conhecimentos nas grandes áreas da Engenharia Civil e seus ensinamentos servirão de base para uma carreira profissional íntegra e de excelência.

Agradeço à equipe da RHAMA Consultoria Ambiental, por contribuírem de alguma forma para essa pesquisa, compartilhando conhecimento e amizade, em especial à MSc. Bibiana Rodrigues Colossi, que me ajudou e apoiou ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. Sem ela, toda a jornada teria sido muito mais difícil.

Agradeço aos meus colegas de curso pela companhia durante todos esses anos de graduação. Também aos meus amigos, principalmente a Mari, a Tati, a Elisa e a Samanta, pelo apoio sempre e pela paciência com as minhas ausências em períodos conturbados e de desenvolvimento deste estudo.

Por fim, agradeço aos meus pais por toda a paciência, apoio e respeito durante todo o curso, em especial nesta fase final. Agradeço também pelo incentivo a buscar fazer o que me realizasse ao longo de toda indecisão sobre o futuro.

Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino.

*Leonardo da Vinci*

## RESUMO

O uso do solo por atividades antrópicas, como agricultura e urbanização, aumenta a erosão do solo, aumentando também a geração de sedimentos que são transportados nos rios. Estes sedimentos são responsáveis por diversas alterações nos cursos d'água, entre eles assoreamento de reservatórios e elevação da turbidez (devido aos sedimentos em suspensão). A bacia hidrográfica do rio Doce atravessa os estados de Minas Gerais e do Espírito Santo, sendo uma bacia com grande geração de sedimentos e histórico de problemas de assoreamento em reservatórios, sendo também cenário de um rompimento de uma barragem de rejeitos de mineração em Mariana (MG), em novembro de 2015. Este desastre aumentou os níveis de turbidez da bacia, impossibilitando a captação de sua água para abastecimento dos municípios da região. Devido aos fatores mencionados, modelos de simulação de turbidez foram desenvolvidos, a fim de poder estimar a turbidez em pontos de interesse. Este trabalho tem como objetivo analisar e comparar o desempenho de três modelos prognósticos no rio Doce e em seus principais afluentes. Para isso, foram selecionados dados de turbidez em estações de medição ao longo da bacia, no período entre 1997 a 2010, abrangendo o período de calibração e o de validação. Após aplicação dos modelos, fez-se uma análise comparativa, com base em estatísticas de erro definidas, para avaliar o desempenho. Assim, concluiu-se que os três modelos possuem desempenho adequado em toda a bacia, cada qual destacando-se em relação aos demais conforme a região de aplicação (Alto, Médio e Baixo rio Doce). A definição de sua utilização dependerá da possibilidade de aquisição de dados, bem como da área de interesse dentro da bacia.

Palavras-chave: Turbidez. Sedimentos em suspensão.

Modelagem hidrossedimentológica. Rio Doce.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuições verticais dos sedimentos passíveis de serem encontradas em um curso d'água (profundidade x concentração de sedimentos). .....	28
Figura 2. Relação da bacia hidrográfica com a geração e o transporte de sedimentos. ....	29
Figura 3. Curva de eficiência de retenção de sedimentos segundo Churchill. ....	35
Figura 4. Curva de eficiência de retenção de sedimentos segundo Churchill, transformada em sistema métrico por Trindade, (2007).....	35
Figura 5. Curvas de eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios, segundo Brune (1953). ....	36
Figura 6. Localização da bacia do rio Doce (fonte: elaborada pela autora). ....	43
Figura 7. Esquema dos processos de geração e propagação de sedimentos nas minibacias e na rede de drenagem (BUARQUE, 2015).....	48
Figura 8. Localização dos postos de medição de turbidez. ....	50
Figura 9. Localização dos postos de medição de turbidez do IEMA (ES).....	51
Figura 10. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD019 (rio Doce) no município de Rio Casca (MG). ....	54
Figura 11. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD033 (rio Doce) no município de Belo Oriente (MG).....	54
Figura 12. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD040 (rio Corrente Grande) no município de Periquito (MG). ....	55
Figura 13. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD058 (rio Doce) no município de Conselheiro Pena (MG). ....	55
Figura 14. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto 56998300 (rio Doce) no município de Linhares (ES). ....	55
Figura 15. Relação entre turbidez estimada e observada na estação RD033 (rio Doce) no município de Belo Oriente (MG).....	57
Figura 16. Relação entre turbidez estimada e observada na estação RD045 (rio Doce) no município de Governador Valadares (MG). ....	58
Figura 17. Relação entre turbidez estimada e observada na estação RD058 (rio Doce) no município de Conselheiro Pena (MG). ....	58
Figura 18. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD019 (rio Doce) no município de Rio Casca (MG). ....	59

Figura 19. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD040 (rio Corrente Grande) no município de Periquito (MG). .....	59
Figura 20. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD058 (rio Doce) no município de Conselheiro Pena (MG). .....	60
Figura 21. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto 56998300 (rio Doce) no município de Linhares (ES). .....	60
Figura 22. Resultados comparados para a estação RD009 (rio do Carmo). .....	61
Figura 23. Resultados comparados para a estação RD013 (rio Piranga). .....	61
Figura 24. Resultados comparados para a estação RD018 (rio Casca). .....	62
Figura 25. Resultados comparados para a estação RD021 (rio Matipó). .....	62
Figura 26. Resultados comparados para a estação RD019 (rio Doce). .....	62
Figura 27. Resultados comparados para a estação RD023 (rio Doce). .....	63
Figura 28. Resultados comparados para a estação RD026 (rio Piracicaba). .....	64
Figura 29. Resultados comparados para a estação RD027 (rio Santa Bárbara). .....	64
Figura 30. Resultados comparados para a estação RD029 (rio Piracicaba). .....	65
Figura 31. Resultados comparados para a estação RD032 (rio Piracicaba). .....	65
Figura 32. Resultados comparados para a estação RD034 (rio Piracicaba). .....	65
Figura 33. Resultados comparados para a estação RD035 (rio Doce). .....	66
Figura 34. Resultados comparados para a estação RD033 (rio Doce). .....	67
Figura 35. Resultados comparados para a estação RD039 (rio Santo Antônio). .....	67
Figura 36. Resultados comparados para a estação RD040 (rio Corrente Grande). .....	67
Figura 37. Resultados comparados para a estação RD044 (rio Doce). .....	68
Figura 38. Resultados comparados para a estação RD045 (rio Doce). .....	68
Figura 39. Comparação de vazões medidas (ANA) e geradas (MGB-IPH) na estação RD053. ....	69
Figura 40. Resultados comparados para a estação RD049 (rio Suaçuí Grande). .....	69
Figura 41. Resultados comparados para a estação RD049 (rio Suaçuí Grande) nas faixas mais baixas de turbidez. ....	70
Figura 42. Resultados comparados para a estação RD053 (rio Doce). .....	70
Figura 43. Resultados comparados para a estação RD057 (rio Caratinga). .....	70
Figura 44. Resultados comparados para a estação RD057 (rio Caratinga) nas faixas mais baixas de turbidez. ....	71
Figura 45. Resultados comparados para a estação RD058 (rio Doce). .....	71
Figura 46. Resultados comparados para a estação RD059 (rio Doce). .....	71

Figura 47. Resultados comparados para a estação RD059 (rio Doce) nas faixas mais baixas de turbidez. ....	72
Figura 48. Resultados comparados para a estação RD065 (rio Manhuaçu). ....	72
Figura 49. Resultados comparados para a estação RD067 (rio Doce). ....	72
Figura 50. Resultados comparados para a estação RD067 (rio Doce) nas faixas mais baixas de turbidez. ....	73
Figura 51. Resultados comparados para a estação 56991200 (rio Guandu). ....	74
Figura 52. Resultados comparados para a estação 56991400 (rio Doce). ....	74
Figura 53. Resultados comparados para a estação 56993400 (rio Santa Joana). ....	74
Figura 54. Resultados comparados para a estação 56994600 (rio Doce). ....	75
Figura 55. Resultados comparados para a estação 56994700 (rio Doce). ....	75
Figura 56. Resultados comparados para a estação 56998300 (rio Doce). ....	75
Figura 57. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD009 (rio do Carmo) no município de Mariana (MG). ....	89
Figura 58. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD013 (rio Piranga) no município de Ponte Nova (MG). ....	89
Figura 59. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD018 (rio Casca) no município de Rio Casca (MG). ....	89
Figura 60. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD023 (rio Doce) no município de Mariléia (MG). ....	90
Figura 61. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD026 (rio Piracicaba) no município de João Monlevade (MG). ....	90
Figura 62. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD027 (rio Santa Bárbara) no município de São Gonçalo do Rio Abaixo (MG). ....	90
Figura 63. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD029 (rio Piracicaba) no município de Nova Era (MG). ....	91
Figura 64. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD032 (rio Piracicaba) no município de Antônio Dias (MG). ....	91
Figura 65. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD034 (rio Piracicaba) no município de Coronel Fabriciano (MG). ....	91
Figura 66. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD035 (rio Doce) no município de Ipatinga (MG). ....	92

Figura 67. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD039 (rio Santo Antônio) no município de Naque (MG).....	92
Figura 68. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD044 (rio Doce) no município de Governador Valadares (MG) .....	92
Figura 69. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD045 (rio Doce) no município de Governador Valadares (MG) .....	93
Figura 70. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD049 (rio Suaçuí Grande) no município de Frei Inocência (MG).....	93
Figura 71. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD053 (rio Doce) no município de Galiléia (MG).....	93
Figura 72. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD057 (rio Caratinga) no município de Conselheiro Pena (MG).....	94
Figura 73. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD059 (rio Doce) no município de Resplendor (MG).....	94
Figura 74. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD065 (rio Manhuaçu) no município de Aimorés (MG) .....	94
Figura 75. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD067 (rio Doce) no município de Aimorés (MG) .....	95
Figura 76. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto 56991200 (rio Guandu) no município de Afonso Cláudio (ES) .....	95
Figura 77. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto 56991400 (rio Doce) no município de Colatina (ES) .....	95
Figura 78. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto 56993400 (rio Santa Joana) no município de Baixo Guandu (ES).....	96
Figura 79. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto 56994600 (rio Doce) no município de Colatina (ES) .....	96
Figura 80. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto 56994700 (rio Doce) no município de Colatina (ES) .....	96
Figura 81. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD009 (rio do Carmo) no município de Mariana (MG).....	97
Figura 82. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD013 (rio Piranga) no município de Ponte Nova (MG). .....	97
Figura 83. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD018 (rio Casca) no município de Rio Casca (MG).....	97

Figura 84. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD021 (rio Matipó) no município de Raul Soares (MG).....	98
Figura 85. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD023 (rio Doce) no município de Mariléia (MG).....	98
Figura 86. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD026 (rio Piracicaba) no município de João Monlevade (MG).....	98
Figura 87. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD027 (rio Santa Bárbara) no município de São Gonçalo do Rio abaixo (MG).....	99
Figura 88. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD029 (rio Piracicaba) no município de Nova Era (MG).....	99
Figura 89. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD032 (rio Piracicaba) no município de Antônio Dias (MG).....	99
Figura 90. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD033 (rio Doce) no município de Belo Oriente (MG).....	100
Figura 91. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD034 (rio Piracicaba) no município de Coronel Fabriciano (MG).....	100
Figura 92. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD035 (rio Doce) no município de Ipatinga(MG).....	100
Figura 93. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD039 (rio Santo Antônio) no município de Naque (MG).....	101
Figura 94. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD044 (rio Doce) no município de Governador Valadares (MG).....	101
Figura 95. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD045 (rio Doce) no município de Governador Valadares (MG).....	101
Figura 96. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD049 (rio Suaçuí Grande) no município de Frei Inocência (MG).....	102
Figura 97. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD053 (rio Doce) no município de Galiléia (MG).....	102
Figura 98. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD057 (rio Caratinga) no município de Conselheiro Pena (MG).....	102
Figura 99. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD059 (rio Doce) no município de Resplendor (MG).....	103

Figura 100. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD065 (rio Manhuaçu) no município de Aimorés (MG). .....	103
Figura 101. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD067 (rio Doce) no município de Aimorés (MG). .....	103
Figura 102. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto 56991200 (rio Guandu) no município de Afonso Cláudio (ES). .....	104
Figura 103. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto 56991400 (rio Doce) no município de Colatina (ES). .....	104
Figura 104. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto 56993400 (rio Santa Joana) no município de Baixo Guandu (ES). .....	104
Figura 105. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto 56994600 (rio Doce) no município de Colatina (ES). .....	105
Figura 106. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto 56994700 (rio Doce) no município de Colatina (ES). .....	105
Figura 107. Relação entre turbidez estimada e observada na estação RD023 (rio Doce) no município de Mariléia (MG). .....	106
Figura 108. Relação entre turbidez estimada e observada na estação RD029 (rio Piracicaba) no município de Nova Era (MG). .....	106
Figura 109. Relação entre turbidez estimada e observada na estação RD034 (rio Piracicaba) no município de Coronel Fabriciano (MG). .....	106
Figura 110. Relação entre turbidez estimada e observada na estação RD035 (rio Doce) no município de Ipatinga (MG). .....	107
Figura 111. Relação entre turbidez estimada e observada na estação RD044 (rio Doce) no município de Governador Valadares (MG). .....	107
Figura 112. Relação entre turbidez estimada e observada na estação RD053 (rio Doce) no município de Galiléia (MG). .....	107
Figura 113. Relação entre turbidez estimada e observada na estação RD059 (rio Doce) no município de Resplendor (MG). .....	108
Figura 114. Relação entre turbidez estimada e observada na estação RD067 (rio Doce) no município de Aimorés (MG). .....	108
Figura 115. Relação entre turbidez estimada e observada na estação 56991400 (rio Doce) no município de Colatina (ES). .....	108
Figura 116. Relação entre turbidez estimada e observada na estação 56994600 (rio Doce) no município de Colatina (ES). .....	109

Figura 117. Relação entre turbidez estimada e observada na estação 56994700 (rio Doce) no município de Colatina (ES). .....	109
Figura 118. Relação entre turbidez estimada e observada na estação 56998300 (rio Doce) no município de Linhares (ES). .....	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Esquema geral da erosão - formas, agentes e tipos. ....	24
Tabela 2. Postos de medição de turbidez utilizados. ....	49
Tabela 3. Volume dos reservatórios utilizados no estudo. ....	56
Tabela 4. Relação de postos utilizados e suas posições. ....	56
Tabela 5. Estatísticas de erro dos modelos aplicados de 2006 a 2010 (em negrito, o melhor valor entre os três modelos). ....	77
Tabela 6. Resumo das estatísticas de erro. ....	81
Tabela 7. Resumo das estatísticas de erro por região da bacia hidrográfica. ....	81
Tabela 8. Tabela comparativa entre os modelos aplicados. ....	81
Tabela 9. Valores de R <sup>2</sup> encontrados nos ajustes dos modelos de Tucci e Fagundes. ....	88

## **LISTA DE SIGLAS**

ANA – Agência Nacional de Águas

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas

IEMA – Instituto Estadual de Meio Ambiente

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

URH – Unidade de Resposta Hidrológica

USBR – United States Bureau of Reclamation

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
2 DIRETRIZES DA PESQUISA .....	21
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	21
2.2 OBJETIVO DA PESQUISA .....	21
2.3 JUSTIFICATIVA .....	21
2.4 DELINEAMENTO.....	21
3 REVISÃO BILIOGRÁFICA.....	23
3.1 GERAÇÃO DE SEDIMENTOS .....	23
3.1.1 Formas de erosão .....	25
3.1.2 Agentes erosivos.....	25
3.1.3 Tipos de erosão em função do agente.....	25
3.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NOS RIOS.....	26
3.3 MODELAGEM DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NOS RIOS .....	29
3.4 RELAÇÃO ENTRE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO E TURBIDEZ .....	31
3.5 DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS .....	32
3.5.1 Deposição de sedimentos em reservatórios .....	33
3.5.2 Eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios .....	33
3.6 MEDIÇÃO DE SEDIMENTOS .....	37
3.6.1 Sedimentos em suspensão .....	37
3.6.2 Sensoriamento Remoto Aplicado à Hidrologia .....	39
3.6.3 Turbidez.....	40
3.7 MODELAGEM DE SEDIMENTOS.....	40
4 METODOLOGIA.....	42
4.1 ESTUDO DE CASO .....	42
4.2 MODELOS PROGNÓSTICOS.....	44

4.2.1 Prognóstico de turbidez com base na vazão .....	44
4.2.2 Prognóstico de turbidez com base em retenção de sedimentos em reservatórios ...	45
4.2.3 Prognóstico de concentração de sedimentos em suspensão com base em modelagem hidrossedimentológica de grande escala.....	47
4.3 DADOS UTILIZADOS.....	49
4.4 ANÁLISE COMPARATIVA.....	51
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
5.1 CALIBRAÇÃO DO MODELO PROGNÓSTICO DE TURBIDEZ COM BASE NA VAZÃO .....	53
5.2 CALIBRAÇÃO DO MODELO PROGNÓSTICO DE TURBIDEZ COM BASE EM RETENÇÃO DE SEDIMENTOS EM RESERVATÓRIOS .....	56
5.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO PROGNÓSTICO DE CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS.....	58
5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	60
5.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	79
6 CONCLUSÕES.....	82
7 RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	83
8 REFERÊNCIAS .....	84
ANEXOS.....	88
A. VALORES DE R <sup>2</sup> PARA OS MODELOS DE TUCCI E FAGUNDES.....	88
B. CORRELAÇÕES OBTIDAS ENTRE TURBIDEZ E VAZÃO .....	89
C. CORRELAÇÕES OBTIDAS ENTRE TURBIDEZ E CSS.....	97
D. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO MODELO BASEADO EM RETENÇÃO DE SEDIMENTOS EM RESERVATÓRIOS.....	106

## 1 INTRODUÇÃO

O efeito da energia da precipitação e do escoamento sobre o solo ocasiona sua erosão, gerando geração de sedimentos que são transportados ao longo do rio até chegarem ao oceano. Mesmo sendo um processo natural, atividades como produção agrícola, desmatamento e urbanização – ou seja, atividades de origem antrópica – aumentam a erosão do solo e, em consequência, a quantidade de sedimentos produzidos (CARVALHO, 2008).

Os sedimentos são transportados ao longo do curso d'água, depositando-se aos poucos, dependendo de sua concentração, tamanho, peso e forma das partículas, além das forças exercidas pelo escoamento. A formação de depósitos ou a ocorrência de erosão no leito e nas margens depende da capacidade de transporte do rio e da carga sólida que chega de montante.

Para uma adequada gestão territorial e dos recursos hídricos, conhecer o comportamento hidrossedimentológico das bacias hidrográficas é essencial. Os sedimentos exercem grande influência nos parâmetros de qualidade da água, são os responsáveis pelo assoreamento de reservatórios e canais de navegação, entre outros problemas. Elevada turbidez, causada pelos sedimentos em suspensão, podem causar a inviabilidade do tratamento da água para abastecimento (LIMA, 2011).

O rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG), gerou uma carga muito grande de sedimentos no rio Doce, sendo boa parte deste volume composta por finos. Destes sedimentos, parte foi transportada pelo rio até atingir o oceano, mas uma parcela ficou depositada ao longo do leito. Esse material depositado aumentou a turbidez do rio Doce, principalmente em períodos chuvosos, em que o aumento da vazão gera o transporte de um volume maior de sedimentos. A elevação da turbidez, por sua vez, dificulta o uso da água para abastecimento de cidades e comunidades que realizam a captação neste rio. Mesmo após o tempo decorrido desde o acidente, ainda existem depósitos de sedimentos no leito e margens do rio, de forma que o risco de aumento de turbidez em períodos chuvosos é grande, o que continuaria a impactar as comunidades ribeirinhas (TUCCI, 2016).

Dada a relevância deste assunto, diversos estudos foram feitos para desenvolver modelos empíricos ou conceituais, por meio de modelos matemáticos e baseados nos processos físicos do escoamento, a fim de obter uma estimativa de turbidez para a região da bacia do rio Doce.

Entretanto, sua acurácia ainda não foi avaliada e comparada. Neste trabalho, serão estudados e comparados três modelos prognósticos de turbidez desenvolvidos para a bacia do rio Doce.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho estão subdivididas em questão e objetivo da pesquisa, justificativa e delineamento, os quais serão descritos nos próximos itens.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa do trabalho é: qual modelo, dentre os três analisados, que possuem correlações com parâmetros diferentes, pode ser utilizado de maneira a representar melhor o comportamento da turbidez na bacia do rio Doce?

### **2.2 OBJETIVO DA PESQUISA**

O objetivo geral do presente estudo foi realizar uma análise comparativa entre três modelos de prognóstico de turbidez, aplicados para a bacia hidrográfica do rio Doce.

### **2.3 JUSTIFICATIVA**

O rio Doce, que passa pelos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, é de grande importância para o país, pois além de possuir reservatórios e usinas hidrelétricas em seu curso - em que os sedimentos podem causar problemas nas turbinas e redução do seu volume útil, por exemplo – possui muitos municípios e comunidades ribeirinhas que captam sua água para abastecimento. Após o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG), muitas cidades que realizavam sua captação neste rio tiveram de interrompê-la devido aos altos níveis turbidez das águas, o que impossibilita o seu tratamento pelos métodos hoje utilizados, gerando problemas de abastecimento no local.

### **2.4 DELINEAMENTO**

Este trabalho foi realizado de acordo com as etapas apresentadas a seguir.

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) descrição dos processos hidrosedimentológicos;

- c) descrição dos modelos de previsão de turbidez;
- d) definição dos procedimentos metodológicos;
- e) obtenção de dados e aplicação dos modelos;
- f) análise comparativa;
- g) considerações finais.

### 3 REVISÃO BILIOGRÁFICA

O ciclo dos sedimentos envolve os processos de erosão, transporte, deposição e compactação do sedimento. Estes são processos naturais, que sempre ocorreram através dos tempos geológicos, e têm entre seus principais agentes a água, o vento e a gravidade. Contudo, práticas antrópicas – como agricultura, desmatamento, entre outros – vêm intensificando a erosão natural, o que causa problemas devido à grande sedimentação gerada (CARVALHO, 2008).

Sedimentos erodidos de terras agrícolas, por exemplo, são sedimentos prejudiciais (devido aos produtos químicos utilizados na fertilização e proteção de plantações) que irão formar depósitos em depressões e em outras posições indesejáveis. Além disso, a erosão causa a perda gradual de fertilidade dos solos agrícolas, inutilizando grandes porções de terra. Sedimentos em suspensão impedem a penetração de luz e calor, afetando a fotossíntese e a vida nos cursos d'água. Os depósitos são responsáveis por assorear obras de arte, tomadas d'água, calhas de rio – prejudicando a navegação, por exemplo. Devido a esses e outros problemas potencialmente causados pelos sedimentos em rios, o estudo sobre hidrossedimentologia é necessário.

#### 3.1 GERAÇÃO DE SEDIMENTOS

A carga de sedimentos que chega e é transportado no rio depende da geração da bacia hidrográfica a montante. Os fatores que determinam essa geração podem ser resumidos em (YANG, 1996):

- quantidade e intensidade das chuvas;
- tipo de solo, formação geológica e características dos sedimentos;
- cobertura vegetal, topografia e uso da terra;
- taxa de erosão, densidade da rede de drenagem, inclinação, forma, tamanho e alinhamento dos canais;
- tipo de escoamento e características hidráulicas do canal;

O fenômeno da erosão, que é o desgaste das rochas e solos, é o que dá a origem, em grande parte, aos sedimentos. Este processo envolve a desagregação do solo e o deslocamento de partículas por meio de agentes erosivos, como a água e o vento.

A erosão constitui o início de movimento de partículas do solo que originalmente estavam em repouso e a sua remoção do local de origem. Essas partículas, ou sedimentos, serão carregados pelo vento e pela água, depositando-se em depressões, planícies, rios e mares, dependendo do seu tamanho e de suas propriedades. Materiais finos, como argilas e siltes, tendem a ser transportados por mais tempo em suspensão, enquanto materiais de maior granulometria se depositam mais rapidamente.

Os processos de erosão são complexos e dependem de alguns fatores, de forma que, em um estudo generalizado, analisam-se as formas, os tipos e os agentes erosivos, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Esquema geral da erosão - formas, agentes e tipos.

Erosão							
Formas de erosão				Agentes erosivos			
Geológica ou natural	Acelerada, induzida ou antrópica	Ativos		Passivos			
		Água		Topografia			
		Temperatura		Gravidade			
		Insolação		Tipo de solo			
		Vento		Cobertura vegetal			
		Gelo		Formações superficiais			
		Neve		Práticas antrópicas			
		Ação de micro-organismos					
		Ação de animais					
Ação de humanos							
Tipos de erosão							
Erosão devido a sais solúveis ou de minerais	Eólica	Fluvial	Hídrica superficial	Remoção em massa		Provocada por ação humana ou de animais	De eventos extremos
Decomposição de materiais solúveis pela ação da água	Poeira	Escavação	Erosão pluvial ou por embate	Lenta	Rastejo, rastejamento ou cripe	Em obras diversas	Por enchentes
	De transporte pelo ar	Erosão de margem	Erosão em lençol ou laminar		Solifluxão	Por desmatamentos	Por terremotos
	De transporte na superfície	Erosão de leito	Erosão por escoamento difuso, por ravina, sulcos ou dedos	Rápida	Desprendimento de terra ou deslizamento	Na agricultura por aração de solos	Por vulcanismos
			Erosão por escoamento difuso intenso		Escorregamento superficial ou ruptura de talude	Na pecuária, como pisoteio do gado	Por tornados e outros
			Erosão por escoamento concentrado (voçoroca)		Escorregamento profundo		Pela variabilidade climática

(fonte: adaptado de CARVALHO, 2008)

### **3.1.1 Formas de erosão**

Existem duas formas de erosão de solos (CARVALHO, 2008): a erosão natural, ou erosão natural, que é aquela que ocorre sem atuação do homem e em todos os meios; e a acelerada, ou antrópica, que é provocada pela ação humana, como a que ocorre na agricultura.

### **3.1.2 Agentes erosivos**

Agentes erosivos são elementos que causam a erosão e podem ser subdivididos em ativos e passivos, conforme mostrado anteriormente (Tabela 1). Muitas vezes, os agentes passivos e ativos atuam em conjunto, como no caso da chuva (erosão pluvial), em que o agente ativo é a água e o passivo é a gravidade. A mesma quantidade de chuva, dependendo da duração, pode erodir mais ou menos o solo: no caso de menor duração, as gotas de chuva são maiores e mais pesadas, erodindo mais facilmente o solo do que gotas de menor peso.

As práticas realizadas pelo homem podem corresponder a agentes passivos e a agentes ativos. Escavações, movimentos de terra na agricultura e em obras são exemplos de como a erosão causada pelo homem se manifesta de forma ativa, isto é, ações diretas na superfície. Após essas ações, o solo tem suas condições primárias alteradas, de forma que essa nova condição potencialmente acelera o processo de erosão natural (CARVALHO, 2008).

### **3.1.3 Tipos de erosão em função do agente**

Os quatro tipos principais são erosão eólica, fluvial, hídrica superficial e a de remoção em massa. A erosão eólica é a que tem como agente erosivo o vento, ocorrendo principalmente quando as partículas do solo perderam coesão, em solos muito secos. A de remoção em massa se caracteriza por grandes deslocamentos de terra ou rochas, ocorrendo por combinação da gravidade e da água (saturação do meio).

A erosão fluvial é aquela que ocorre pela ação das correntes dos rios e é responsável pelo alargamento e aprofundamento do leito, sendo a principal explicação da formação da rede hidrográfica. Dá-se, principalmente, por erosão de leito, que é ocasionada pelas correntes, e de margem, que pode ocorrer pela ação das correntes, de ondas e até por inundação do terreno marginal, ocasionando desabamentos (CARVALHO, 2008).

A erosão hídrica superficial pode ocorrer de cinco maneiras:

- erosão pluvial: produzida pelas gotas de chuva;
- erosão por escoamento difuso: filetes de água que se dividem em braços que se espalham e se juntam constantemente (sulcos, ravinas);
- erosão por escoamento difuso intenso: semelhante ao anterior, mas mais acentuado;
- erosão laminar: quando ocorrem fortes precipitações, onde o solo já está saturado e há um desgaste suave e uniforme da camada superficial do solo em toda a sua extensão;
- erosão por escoamento concentrado: quando a camada impermeável (rocha) é profunda e não há boa estrutura de solo, de forma que os sulcos formados sofrem desabamentos e deslizamentos, formando voçorocas.

### 3.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NOS RIOS

Os sedimentos que chegam aos rios possuem diversas formas e granulometrias, sendo transportados de diferentes maneiras, dependendo das condições de escoamento. Podem permanecer em suspensão ou próximos ao fundo do rio, deslizando e rolando ao longo do leito. O que determina a maneira como o deslocamento das partículas ocorrerá é função do tamanho, da forma e do peso da partícula, além da forma do escoamento (laminar ou turbulento), da velocidade de corrente, da declividade do canal, temperatura da água, entre outros fatores (VANONI, 1977).

O transporte de sedimentos é uma combinação de movimento no leito, salto e suspensão de partículas. Contudo, o fenômeno inter-relacionado é complexo e não completamente entendido, sendo comum o estudo em separado de cada processo (SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION, 1963).

- Sedimento em suspensão: é a partícula suportada por componentes verticais das velocidades do escoamento turbulento, enquanto é transportada para frente devido às componentes horizontais. São partículas pequenas o suficiente para permanecerem em suspensão, subindo e descendo na corrente.

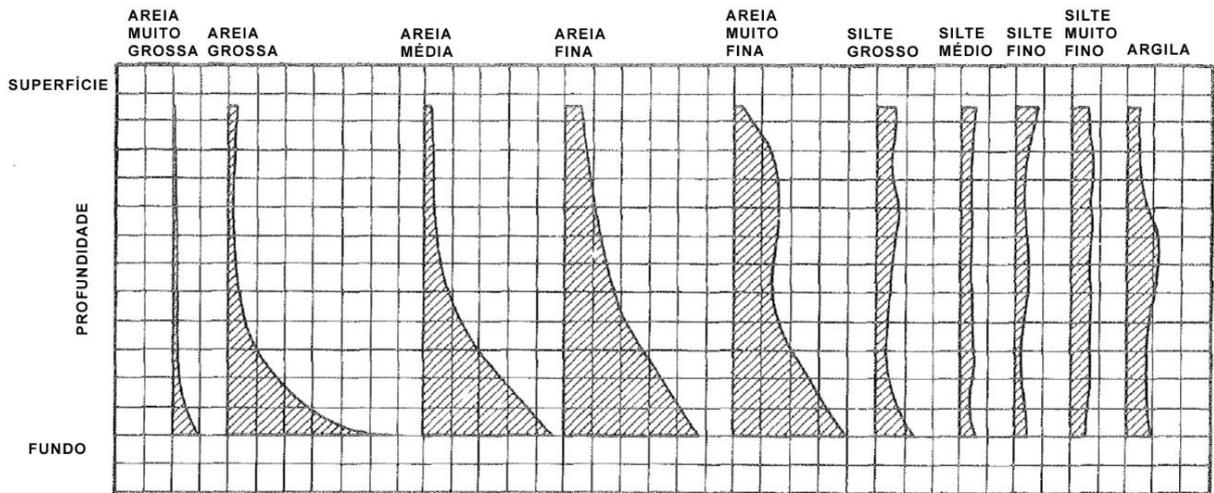
- Sedimento saltante: são as partículas que pulam por efeito do impacto de outras partículas ou pelo próprio escoamento. O movimento inicial pode se dar devido ao fluxo de água sobre a superfície curva da partícula, gerando pressão negativa, devido ao rolamento ou ao impacto de uma partícula sobre a outra.
- Sedimento de arrasto: o sedimento desliza ou rola ao longo do leito e está em contato com o solo praticamente todo o tempo. Além da velocidade do escoamento, existe uma parcela que é influenciada pelo atrito com o fundo.

Segundo Bruk (1985), o rio sempre procura o seu estado natural de estabilidade. Ao ocorrerem mudanças em relação a quantidade de sedimentos, ele responde de acordo com as novas condições. Se a carga de sedimentos for elevada, haverá formação de depósitos; já se a carga for reduzida, ocorrerá degradação do leito. A construção de uma barragem, por exemplo, gera uma mudança violenta no regime, existindo a tendência de deposição no reservatório e, por falta de descarga sólida a jusante e também mudança drástica no regime, o leito a jusante será degradado.

O sedimento suspenso sofre a ação da componente horizontal da velocidade de corrente, predominantemente, e a ação do seu peso. Logo, a concentração de sedimentos possui um valor máximo junto ao leito do rio e um valor mínimo junto à superfície (SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION, 1963). A distribuição vertical das partículas depende do seu tamanho e de sua massa específica, portanto, cada material apresenta uma distribuição diferente, conforme a Figura 1.

A distribuição granulométrica longitudinal dos sedimentos em um rio é expressa pela competência de transporte de sedimentos. Nas cabeceiras, é comum a ocorrência de materiais de maior granulometria, como seixos e pedregulhos, que vão se fracionando à medida que são transportados, transformando-se em sedimentos de menor granulometria, gradativamente, ao serem transportados para jusante.

Figura 1. Distribuições verticais dos sedimentos passíveis de serem encontradas em um curso d'água (profundidade x concentração de sedimentos).



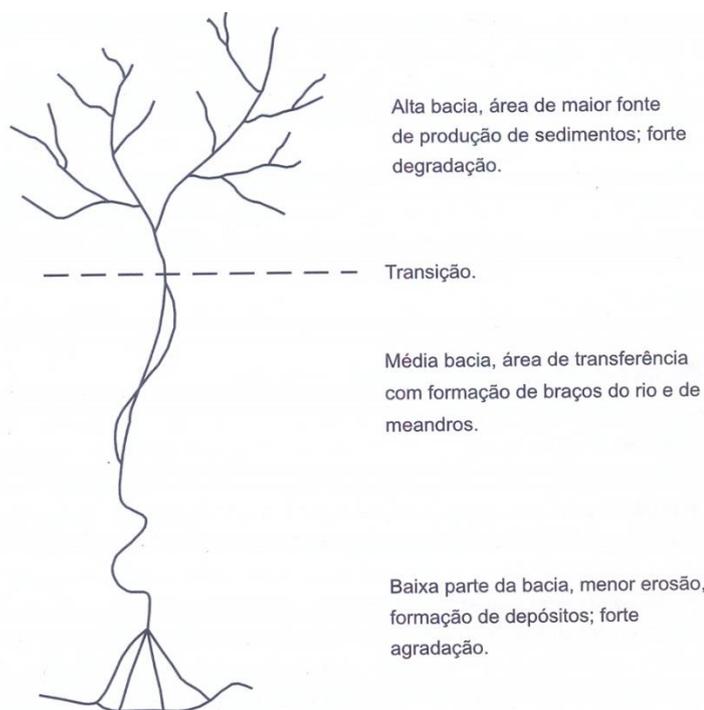
(fonte: adaptado de SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION, 1963)

O transporte dos sedimentos mais grossos ocorre junto ao leito, o dos mais finos, em suspensão. Material fino é produzido à medida que o curso d'água se desenvolve para jusante, em que parte desse material se deposita ao longo do rio e nas margens, enquanto outra parte continua se deslocando. Assim, na foz geralmente há predominância de materiais finos, como argila e silte.

O comportamento dos sedimentos na bacia é muito varável, em função das declividades, rochas e solos, regime de chuvas, entre outros fatores. Contudo, pode-se afirmar que nas porções mais altas das bacias (cabeceiras) há o predomínio da erosão, na zona intermediária predominam o transporte e a deposição de sedimentos, enquanto na porção mais baixa da bacia, próxima a foz, há a formação acentuada de alúvios (Figura 2).

De maneira geral, com relação ao transporte de sedimentos no rio principal da bacia, o que predomina é a carga em suspensão (90% a 95% maior que a de fundo) no alto curso. A porcentagem de sedimento em suspensão está ligada diretamente à granulometria do sedimento transportado, logo, quanto mais material fino, maior a quantidade de sólidos em suspensão no rio (CARVALHO, 2008).

Figura 2. Relação da bacia hidrográfica com a geração e o transporte de sedimentos.



(fonte: CARVALHO, 2008)

### 3.3 MODELAGEM DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NOS RIOS

É possível dividir o transporte nos rios em duas partes: uma fase líquida e uma fase sólida. Os modelos podem se valer de formulações acopladas, que computam o escoamento e os sedimentos de forma simultânea, ou desacopladas, que ignoram a influência do transporte de sedimentos. É comum a utilização das formulações desacopladas, uma vez que as acopladas são mais complexas. Contudo, quando as concentrações de sedimentos são muito elevadas, com modificações no leito acentuadas, é necessário o uso de um modelo acoplado, pois estas mudanças não podem ser desconsideradas (BUARQUE, 2015).

A solução da fase líquida pode envolver desde modelos simples de onda cinemática a modelos dinâmicos complexos. Para fornecer variáveis do escoamento no espaço e no tempo, modelos hidrodinâmicos unidimensionais costumam utilizar as equações de Saint-Venant, que tem por base as equações de conservação de massa e da quantidade de movimento, podendo ser expressas como mostrado a seguir (TUCCI, 2005).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l \quad (\text{Equação 1})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gAS_0 - gAS_f \quad (\text{Equação 2})$$

Onde  $A$  é a área da seção, em  $\text{m}^2$ ;  $t$  é o tempo, em  $\text{s}$ ;  $Q$  é a vazão, em  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , sendo igual a  $U \cdot A$  ( $U$  é a velocidade média na seção, em  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $x$  é a coordenada espacial na direção do escoamento, em  $\text{m}$ ;  $q_l$  é a vazão por unidade de largura, em  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $g$  é a aceleração da gravidade, em  $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ;  $S_0$  é a declividade do fundo do canal, em  $\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $S_f$  é a perda de carga devido ao atrito gerado pelas margens, fundo e pelo escoamento turbulento, em  $\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ .

Como, segundo Buarque (2015), somente as equações de Saint-Venant não são suficientes para determinar modificações que possam ocorrer nos canais de fundo móvel, em soluções desacopladas, a fase líquida deve ser resolvida considerando uma condição de fundo fixo. Após a solução e a determinação das novas características de seção e escoamento, pode-se utilizar uma equação de transporte de sedimentos para determinar o volume de sedimentos erodido ou depositado e as novas configurações da seção.

$$(1 - \lambda) \frac{\partial A_b}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = q_s \quad (\text{Equação 3})$$

Onde  $\lambda$  é a porosidade do material de fundo, adimensional;  $A_b$  é a área da seção transversal do leito móvel, em  $\text{m}^2$ ;  $Q_s$  é a descarga sólida volumétrica, em  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $q_s$  é a contribuição lateral de sedimentos por unidade de largura. A solução desta equação é feita determinando-se o volume depositado ou erodido, a partir de uma formulação para capacidade de transporte do escoamento. Pode ser aplicada a diferentes classes de tamanhos de partículas, onde a capacidade de transporte de transporte é o volume máximo de sedimentos que pode ser transportado pelo rio (BUARQUE, 2015).

Ainda segundo Buarque (2015), para a descarga em suspensão ( $Q_{ss}$ ), é possível obter a solução pela equação de difusão-advecção unidimensional (Equação 4). Quando o regime do escoamento é não permanente e o canal é não prismático, precisa-se levar em consideração a área da seção transversal, a fim de que o princípio de conservação de massa seja respeitado (Equação 5).

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (\text{Equação 4})$$

$$\frac{\partial(Ac)}{\partial t} + \frac{\partial(Auc)}{\partial x} = 0 \quad (\text{Equação 5})$$

Onde  $c$  é a concentração;  $A$  é a área da seção transversal;  $t$  é o intervalo de tempo;  $u$  é a velocidade do escoamento;  $x$  é a distância longitudinal que o escoamento percorre. Busca-se conhecer  $Q_{SS}$ , que pode ser estimada diretamente quando se conhece valores de CSS<sup>1</sup> e vazão para a seção, utilizando uma curva-chave de sedimentos ou por métodos que levam em consideração as características do escoamento (FAGUNDES, 2017).

Estes modelos unidimensionais são muito úteis, permitindo a estimativa de valores médios nas seções de cálculo, como velocidade de carga de fundo e CSS (BUARQUE, 2015). Informações que, devido à escassez de dados existentes em diversas bacias, incluindo grandes bacias brasileiras, tornam-se ainda mais relevantes (FAGUNDES, 2017).

### 3.4 RELAÇÃO ENTRE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO E TURBIDEZ

Propriedade ótica que mede como a água dispersa a luz, a turbidez aumenta com a quantidade de material em suspensão, ou seja, com a carga de sedimento suspenso (TEIXEIRA E SENHORELO, 2000). Partículas de material fino suspensas diminuem a profundidade de penetração da luz nos corpos hídricos, aumentando a sua turbidez, o que pode afetar os organismos vivos que ali habitam (plantas, algas, animais).

A relação entre sólidos em suspensão e turbidez deve ser construída para cada fluxo e para cada condição hidrológica distinta. Foram relatadas diversas correlações na literatura, sugerindo que as variações de tamanho de partícula são frequentemente associadas a variações na concentração de sólidos suspensos (MORRIS E FAN, 1998).

Teixeira e Senhorelo (2000) avaliaram a correlação entre os dois parâmetros para cinco bacias do estado do Espírito Santo, abrangendo campanhas em dias com e sem chuva para monitoramento de CSS, turbidez e vazão. Considerando os dados totais e somente os dados em dias de chuva, obtiveram valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) acima de 0,95 na

---

<sup>1</sup> CSS = Concentração de sólidos suspensos

regressão linear em ambos os casos. Para dias sem chuva, a regressão exponencial se mostrou com correlação melhor, superior a 0,91. De maneira geral, esses valores sugerem uma boa correlação para o caso estudado.

Lima (2011) realizou o mesmo estudo para a Bacia Experimental do Alto Rio Jardim (área de drenagem igual a 104,9 km<sup>2</sup>), obtendo valor de R<sup>2</sup> acima de 0,95 para a regressão linear, indicando uma boa correlação. Santos *et al.* (2014), estudaram uma correlação para o reservatório de Mogi-Guaçu (SP), dividindo-o em 20 pontos de amostragem, em que também obtiveram resultados satisfatórios.

### 3.5 DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS

Os rios possuem uma capacidade de transporte sólido variável com a vazão, declividade do leito, granulometria e peso do material, que é chamado de valor de saturação. Quando a carga sólida presente no escoamento supera este valor, as forças do fluxo não são fortes o suficiente para manter os sedimentos em deslocamento, sendo o seu peso superior à força da corrente que atua sobre ele. Assim, as partículas sedimentam formando depósitos, que podem ser de pequeno a grande volume, transitórios ou permanentes. Os depósitos permanentes se compactam, sofrendo ação do seu próprio peso além do peso da água (CARVALHO, 2008).

Um exemplo de depósito permanente é o assoreamento de reservatórios. Ao ser construída uma barragem, a montante do barramento ocorre diminuição da velocidade do escoamento, ocorrendo deposição dos sedimentos que antes eram transportados. Essa retenção de sedimentos pode ser benéfica, pois limpa a água reservada – seja para uso, seja para aproveitamento hidrelétrico –, mas pode causar problemas, como quando obstruem a tomada d'água de usinas, por exemplo.

Nos reservatórios, as areias e os materiais de maior granulometria são os primeiros a se depositarem, formando a deposição chamada de delta (MAHMOOD, 1987). O depósito de leito, mais no interior do reservatório, é formado por materiais mais finos, que demoram mais tempo para depositar.

### 3.5.1 Deposição de sedimentos em reservatórios

Existem três perfis longitudinais básicos, segundo a formação dos depósitos nos reservatórios (CARVALHO, 2008): delta, camada estreita e cunha. A definição da forma geométrica é dependente de três fatores: geometria e modo de operação do reservatório, composição e granulometria da carga sólida afluyente e quantidade desta carga sólida em relação à capacidade do reservatório.

- Delta: quando apresenta alargamento na entrada, com o nível d'água mantido elevado e possuindo significativa quantidade de material grosso na carga sólida. É a formação que ocorre na maior parte dos reservatórios;
- Camada estreita uniforme: reservatório do tipo garganta com estreitamento, canal profundo, em que o sedimento afluyente é composto basicamente por finos e o nível d'água varia com frequência. Capacidade de afluência é grande.
- Cunha: reservatório do tipo garganta, com maiores velocidades, carga sólida de sedimentos finos e capacidade de afluência pequena. É a formação em que os sedimentos alcançam o local da barragem em menor tempo.

### 3.5.2 Eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios

Em grandes reservatórios, possivelmente todo o sedimento será depositado. Pode ocorrer de alguns sedimentos o atravessarem por meio de correntes de densidade, mas, considerando as aproximações que devem ser feitas para essa estimativa, é recomendável não considerar este fator. Já em reservatórios pequenos, a maioria dos sedimentos pode ser transportado e atravessá-los. A proporção de sedimentos que passa pelo reservatório depende de dois fatores: da velocidade do fluxo e das características do sedimento. Materiais finos, como siltes e argilas, permanecem em suspensão tempo suficiente para atravessarem, enquanto materiais mais grossos, como as areias, depositam-se (VANONI, 1977).

Segundo Yang (1996), o volume de sedimentos depositados em um reservatório depende da densidade do sedimento e da eficiência de retenção do reservatório. A definição de eficiência de retenção é dada pela razão de sedimentos depositados e o fluxo total de sedimentos afluyente.

Esta eficiência é um fenômeno dependente da velocidade de queda das partículas, do tamanho e forma do reservatório e do fluxo através dele. Os métodos de estimativa de eficiência de retenção são empíricos, baseados em observações e medições de depósitos em diversos reservatórios. Dos principais métodos, dois são os mais utilizados no Brasil: Churchill (1948) e Brune (1953).

A curva de eficiência de Churchill (Figura 3) foi desenvolvida para pequenos e médios reservatórios. No gráfico da Figura 3, o eixo das ordenadas representa a porcentagem de sedimento efluente à barragem, ou seja, o sedimento afluente ao reservatório que passa para jusante. O eixo das abcissas corresponde ao índice de sedimentação do reservatório (IS), que é igual ao período de retenção dividido pela velocidade média no reservatório (CARVALHO, 2008), sendo:

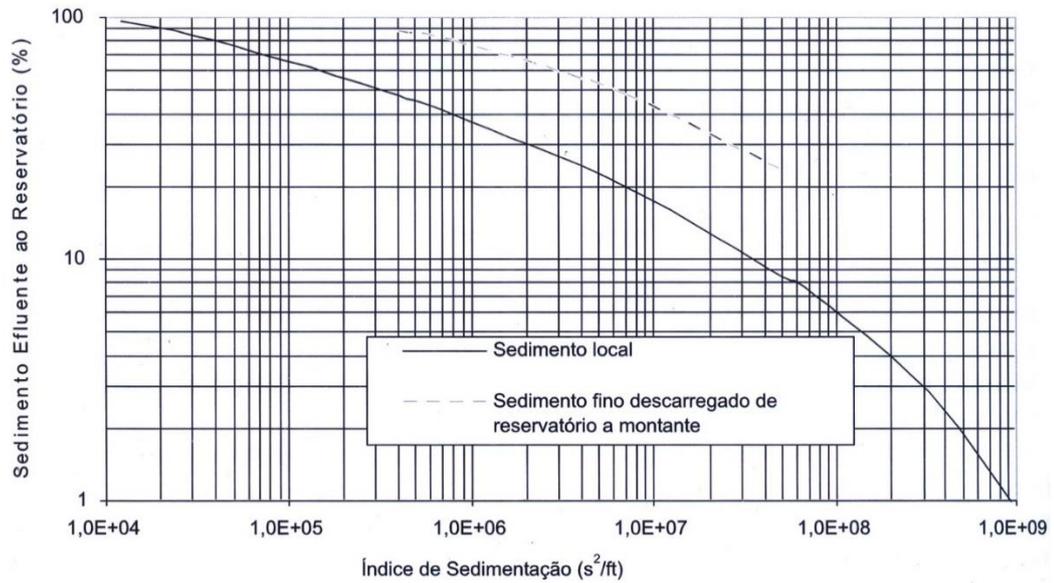
- período de retenção: volume do reservatório no nível médio de operação (ft<sup>3</sup>) dividido pela vazão média diária durante o período estudado (ft<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>);
- velocidade média no reservatório: vazão média diária (ft<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) dividida pela área da seção transversal média, que pode ser obtida pela divisão do volume do reservatório (ft<sup>3</sup>) pelo seu comprimento (ft).

Destas informações, resulta a seguinte expressão para o índice de sedimentação:

$$IS = \frac{V_{res}^2}{Q^2 L} \quad \text{(Equação 6)}$$

Onde  $IS$  é o índice de sedimentação (s<sup>2</sup>.ft<sup>-1</sup>);  $V_{res}$  é o volume do reservatório no nível médio de operação (ft<sup>3</sup>);  $Q$  é a vazão afluente média diária durante o período em estudo (ft<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>);  $L$  é o comprimento do reservatório (ft).

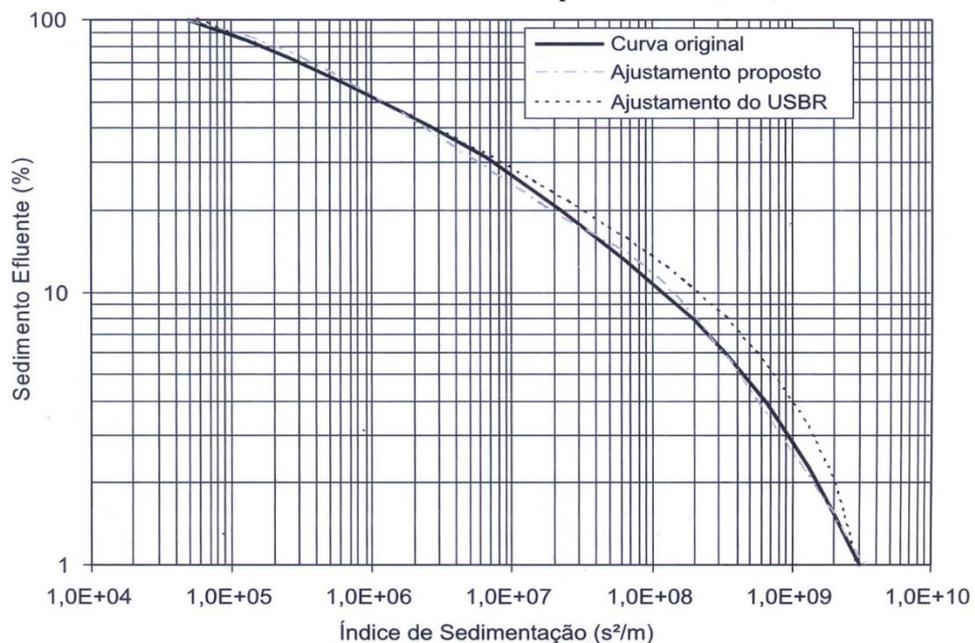
Figura 3. Curva de eficiência de retenção de sedimentos segundo Churchill.



(fonte: CARVALHO, 2008)

A Figura 4 mostra a curva de Churchill adaptada para unidades métricas, que foi obtida dividindo-se o eixo das abscissas da Figura 3 pelo fator de conversão 3,281. No novo gráfico, a linha pontilhada corresponde à curva que representa a equação ajustada pelo USBR (United States Bureau of Reclamation), adaptada para unidades métricas (Equação 7).

Figura 4. Curva de eficiência de retenção de sedimentos segundo Churchill, transformada em sistema métrico por Trindade, (2007).



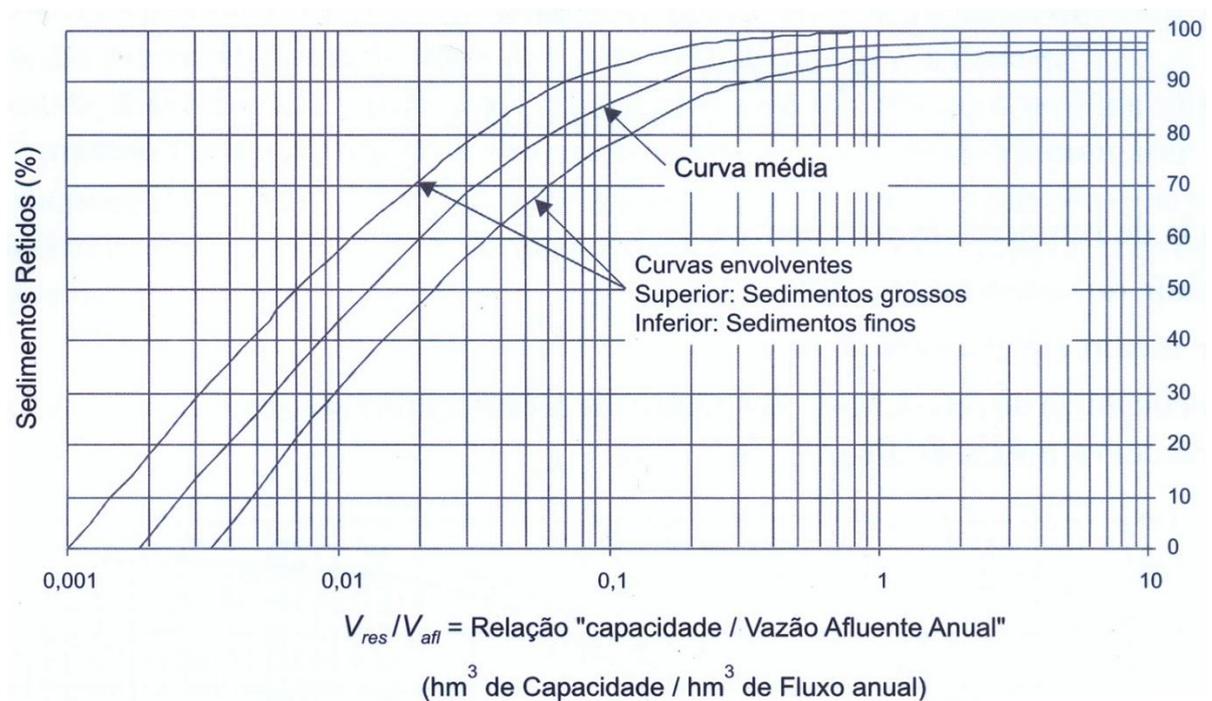
(fonte: CARVALHO, 2008)

$$SE = 100 - (112 - 1013,4 \cdot IS^{-0,2}) \quad (\text{Equação 7})$$

No método de Brune (1953), a eficiência é traçada em função da capacidade de afluência, que corresponde ao volume do reservatório dividido pelo volume afluente médio anual (Equação 8). As curvas, apresentadas na Figura 5, foram obtidas por meio de levantamentos de 44 reservatórios dos EUA. A curva superior à curva média diz respeito aos sedimentos grossos, enquanto a curva inferior representa os sedimentos finos. Não tendo conhecimento sobre a granulometria em estudo, costuma-se adotar a curva média (VANONI, 1977).

$$\text{Capacidade de afluência} = \frac{V_{res}}{V_{afl}} \quad (\text{Equação 8})$$

Figura 5. Curvas de eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios, segundo Brune (1953).



(fonte: CARVALHO, 2008)

É interessante ressaltar que a curva de Brune representa menos variáveis em consideração do que a curva de Churchill, sendo considerada de menor precisão. Contudo, a curva de Churchill não leva em consideração a granulometria do sedimento, o que também pode gerar imprecisão.

## 3.6 MEDIÇÃO DE SEDIMENTOS

Existem variados métodos de medição de descarga sólida, que podem ser por medição direta ou indireta, e são realizados em seções transversais do rio. A medição direta passa por um cálculo simples, a indireta necessita da determinação de diferentes grandezas, sendo mais complexa e nem sempre gerando resultados satisfatórios. A medição da descarga sólida ocorre em conjunto com a fluviométrica, devendo esta ser sempre medida na mesma ocasião da amostragem de sedimentos, determinando-se também as velocidades pontuais, larguras parciais e total e profundidades nas verticais para cálculo de vazão.

### 3.6.1 Sedimentos em suspensão

Como o sedimento em suspensão não se distribui de maneira uniforme, é necessário fazer amostragens (verticais ou pontuais) ao longo da seção, em um número adequado de posições, para levar em conta a variação da sua concentração. Amostragens pontuais exigem que seja feita a medição da velocidade da corrente no mesmo ponto, enquanto as verticais precisam da velocidade média em cada vertical.

De maneira geral, perto do leito a concentração de sedimentos em suspensão é maior, mas a medição neste local é difícil devido a limitação dos equipamentos. Logo, tem-se uma zona não amostrada próxima ao leito que pode gerar erros de cálculo.

Os equipamentos de amostragem são classificados em três categorias (CARVALHO, 2008): instantâneos, por integração e por bombeamento. Os instantâneos realizam a coleta da amostra pelo fechamento instantâneo, por meio de dispositivos nas extremidades do recipiente. Os amostradores por integração acumulam uma mistura de água e sedimentos em um certo tempo pela retirada do fluxo ambiente através de um pequeno bocal. Amostradores por bombeamento retiram a mistura em suspensão através de um orifício, pela ação do bombeamento. Dentre esses, os por integração são os mais utilizados, visto que obtêm a mistura ao longo de um tempo maior e mais adequado, sendo representativo do valor médio, além de não necessitarem de energia para seu funcionamento.

Não deve haver turbulência e desvio da corrente no amostrador, desta forma, é necessário que os orifícios de entrada sejam adequadamente projetados e que haja a retirada do ar interno numa razão igual à de entrada de amostra.

Para determinar a concentração, pode-se valer de métodos diretos (*in situ*) ou indiretos, sendo eles instantâneos ou por integração, em sua maioria. No método direto, os medidores podem medir diretamente a concentração de sólidos ou pode ser feita a medição da turbidez, obtendo a concentração de sólidos por meio de correlações.

Alguns exemplos desses medidores são citados abaixo.

- Medidor a laser: determina diretamente a concentração e a granulometria.
- Medidor fotoelétrico ou ótico eletrônico: determina a concentração pela medida de turbidez. Deve ser usado em rios com transporte de sedimentos finos e de baixa concentração.
- Garrafa Delft: determina o volume de areia ou de sedimento diretamente pela colocação da amostra em uma proveta graduada.
- Medidor nuclear: mede diretamente a concentração.
- Técnica de sensoriamento remoto: por meio de imagens de satélite, usando-se a graduação permitida pela coloração da água devido à quantidade de sedimento. Precisa ser calibrado com dados de medições em campo.

Destes, os mais utilizados são os medidores fotoelétricos e os nucleares. Segundo o Subcomitê de Sedimentação, amostradores instantâneos possuem aplicabilidade limitada, devido às grandes mudanças de velocidades nos orifícios e ao curto tempo de amostragem (VANONI, 1977).

A medição indireta é realizada por meio de equipamentos que coletam amostrar para posterior análise laboratorial. Abaixo estão listados alguns exemplos de equipamentos.

- Série norte-americana de amostradores de sedimentos em suspensão (DH-48, DH-59, D-43, P-61, etc). Amostragem por integração pontual ou vertical.

- Neyrpic: coleta a amostra por integração vertical e pontual.
- Amostrador múltiplo OTT: coleta amostras pontuais por integração a diversas alturas.
- Amostradores de bombeamento nos sistemas de peso acumulativo e amostras individuais.

### **3.6.2 Sensoriamento Remoto Aplicado à Hidrologia**

Os ambientes aquáticos são possivelmente os mais difíceis de serem estudados por meio de sensoriamento remoto. A enorme variabilidade de componentes presentes na coluna d'água (sólidos em suspensão, matéria orgânica dissolvida, entre outros), bem como alterações na própria superfície aquática que influenciam aleatoriamente o sinal captado pelo sensor provocam variações que dificultam a caracterização objetiva da água. Contudo, apesar dessas dificuldades, estudos anteriores provam a aplicabilidade de técnicas de sensoriamento remoto para medição do conteúdo de sedimentos em suspensão, por meio de variações das respostas espectrais de diferentes amostras de água (RUDORFF *et al.*, 2005).

O desenvolvimento do sensoriamento remoto possibilitou a produção de informações hidrológicas com base no uso dados de sensores espaciais. Diversos estudos realizados no mundo demonstraram que relacionar a cor detectada por satélites das águas continentais e o conteúdo de sedimentos é possível. Comprovou-se, também, que o tipo e a quantidade de sedimentos presente nas águas influencia fortemente nas suas propriedades óticas (MENEZES, 2013).

No Brasil, existe o sistema HidroSat, que é uma ferramenta que associa dados de qualidade da água e dados hidrológicos, realizando o processamento dos dados disponibilizados pelas agências espaciais praticamente em tempo real. É uma ferramenta que realiza o gerenciamento, processamento e a difusão destes dados (PISCOYA, 2016).

Os dados referentes a concentração de sólidos e turbidez são obtidos com base nas imagens dos sensores MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer), da NASA, que tiveram início de obtenção de dados em 2000 e têm resolução temporal diária. São utilizados produtos compostos de reflectância da superfície, fornecidos pela agência, que são imagens compostas de oito dias, formadas por pixels de alta qualidade, que fornecem estimativas da reflectância

nas bandas do vermelho e infravermelho próximo. Para obtenção de dados sedimentométricos e de turbidez, utilizam-se os dois produtos com resolução de 250 m, que são processados pelo algoritmo MOD3R, estimando, a partir dos dados de reflectância, valores de concentração de sólidos e turbidez (PISCOYA, 2016).

### 3.6.3 Turbidez

Medidores de turbidez possuem dois modos de operação:

- os transmissores, que, determinam a turbidez medindo a atenuação da luz na coluna d'água;
- os nefelométricos, que determinam a turbidez (em unidades nefelométricas de turbidez, ou NTU) a partir de medições da difração da luz ocasionada pelas partículas suspensas.

Muitos nefelômetros utilizados no mercado são instrumentos de dispersão lateral, com o ângulo de detecção perpendicular ao feixe de luz, mas outros ângulos podem ser utilizados. Neste grupo, também estão inclusos instrumentos de retrodifusão e de proporção, que estimam a turbidez por uma combinação de respostas de uma única fonte de luz. Outros aparelhos disponíveis comercialmente baseiam-se na atenuação e detecção de dispersão de múltiplas fontes de luz (RYMSZEWICZ *et al*, 2017).

Segundo Rymszewicz *et al.* (2017), os nefelômetros podem ter diferentes configurações de fontes de luz e feixes, além de diferenças na amplitude angular e sensibilidade espectral dos detectores e, devido a essas diversidades, é possível que se obtenham diferentes respostas para uma mesma amostra, dependendo do aparelho utilizado. Contudo, apesar dessas diferenças, considera-se a turbidez como uma medida absoluta de uma propriedade física que é diretamente comparável em diferentes corpos d'água, independentemente do sensor utilizado.

## 3.7 MODELAGEM DE SEDIMENTOS

Modelos são desenvolvidos para representar sistemas, de forma que os usuários consigam obter respostas satisfatórias para diferentes entradas. Não é o objetivo, mas uma ferramenta para poder atingi-lo (TUCCI, 2005).

Existem diversos modelos para simulação de sedimentos, diferindo em sua complexidade nos processos e dados necessários para calibração, não existindo o melhor modelo para todos os casos. Em geral, são divididos em: empíricos ou estatísticos, conceituais e físicos (MERRIT *et al.*, 2003).

Modelos empíricos são considerados os mais simples, baseiam-se em análises de dados observados e definem a resposta a partir destes. Estes modelos explicam o processo físico por meio de equações que não necessariamente reproduzem os fenômenos físicos envolvidos. Os conceituais são baseados na representação da bacia hidrográfica como uma série de armazenamentos internos (MERRIT *et al.*, 2003). Levam em consideração os processos físicos que estão envolvidos na situação simulada. Modelos físicos são baseados na solução de equações físicas fundamentais que definem o processo, como a de conservação de massa para sedimentos.

Ainda, segundo Tucci (2005), os modelos também são divididos em:

- contínuos, quando são contínuos no tempo, ou discretos, quando mudanças de estado ocorrem em intervalos discretos;
- concentrados, que não considera a variabilidade espacial, geralmente só utilizando o tempo como variável independente, ou distribuídos, quando as variáveis dependem do tempo e/ou do espaço. Na prática, não existem modelos puramente distribuídos;
- estocásticos, quando o conceito de probabilidade é introduzido no desenvolvimento do modelo, ou determinísticos, quando a chance de ocorrência das variáveis não é levada em consideração.

Os três modelos abordados neste trabalho baseiam-se em correlações de turbidez com a vazão do rio, com a capacidade de retenção de reservatórios e com a concentração de sólidos suspensos no curso d'água.

## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo, é feita a caracterização da bacia do rio Doce, região de estudo deste trabalho, e são descritos os modelos utilizados para estudo e comparação de resultados, aplicando-os a bacia. A metodologia do trabalho consiste na obtenção de dados e aplicação dos modelos em pontos específicos da bacia, para posterior análise de desempenho.

Os resultados finais serão analisados e comparados entre si, para diferentes pontos da bacia e considerando a bacia de maneira geral. Para ser possível comparar o modelo de Fagundes (2017) com os demais, será necessário fazer uma correlação entre os resultados de concentração de sólidos suspensos obtidos pelo modelo e a turbidez, como mencionado no capítulo 3.3 deste estudo.

### 4.1 ESTUDO DE CASO

A área escolhida para aplicação dos modelos foi a bacia do rio Doce, localizada na região sudeste do Brasil, entre os meridianos 39°30' W e 43°45'W, e os paralelos 17°45' S e 21°15' S, apresentada na Figura 6. Possui uma área de drenagem de cerca 86.715 km<sup>2</sup>, sendo 86% pertencente ao estado de Minas Gérias e o restante ao estado do Espírito Santo, abrangendo o total de 230 municípios (PIRH, 2010).

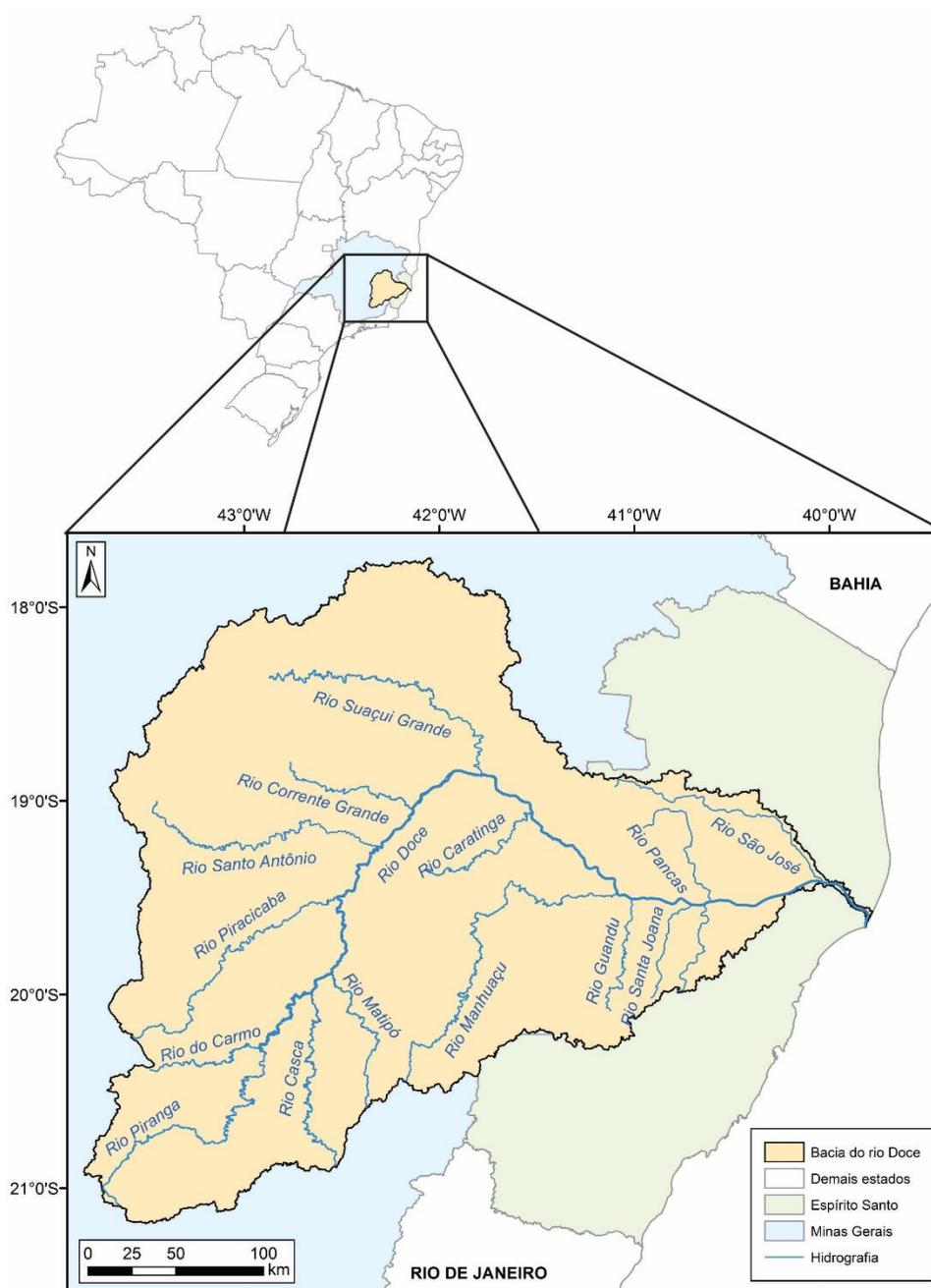
Na cabeceira, os rios do Carmo e Piranga formam o rio Doce. Pela margem esquerda, os principais afluentes são os rios do Carmo, Piracicaba, Santo Antônio, Corrente Grande e Suaçui Grande, em MG, e São José e Pancas no ES. Pela margem direita, os rios Casca, Matipó, Manhuaçu e Caratinga, em MG, e Guandu, Santa Joana e Santa Maria do Rio Doce, no ES. A bacia pode ser dividida em três unidades regionais: Alto rio Doce, localizada a montante da confluência entre os rios Doce e Piracicaba; Médio rio Doce, que compreende o trecho entre a jusante dessa confluência até o limite do estado de Minas Gerais; e Baixo rio Doce, a jusante da divisa entre os estados até sua foz.

A população da bacia supera 3,5 milhões de habitantes, sendo que 70% representa população urbana. Contudo, a população rural supera a urbana em 100 municípios, absorvidos pela produção agropecuária, o que mostra que a população rural ainda é significativa. Há a ocorrência de desmatamentos de forma generalizada na área da bacia, conduzindo a intensos

processos de erosão, que geram grande quantidade de sedimentos. A urbanização e as atividades agrícolas também contribuem para os impactos nos cursos d'água (PIRH, 2010).

No dia 5 de novembro de 2015, ocorreu o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG), descarregando um grande volume de rejeitos que atingiu o rio Doce, gerando danos em todo o percurso da onda gerada. Esses rejeitos ocasionaram a elevação da turbidez do rio, chegando a atingir níveis que impossibilitam o tratamento para abastecimento (TUCCI, 2016; CASTILHO, 2016).

Figura 6. Localização da bacia do rio Doce (fonte: elaborada pela autora).



## 4.2 MODELOS PROGNÓSTICOS

Neste item, serão descritos os modelos de previsão de turbidez propostos por Tucci (2016), Castilho *et al.* (2016) e Fagundes (2017).

### 4.2.1 Prognóstico de turbidez com base na vazão

O rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG), ocasionou o transporte de milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos/sedimentos para a jusante. Grande parte destes sedimentos era composta por materiais finos, ocorrendo o transporte ao longo do rio até o oceano, mas uma parcela importante ficou depositada ao longo do leito e das margens. A existência destes depósitos ao longo do rio gera, principalmente nos períodos chuvosos, um risco de aumentar novamente a turbidez do rio, continuando a impactar as comunidades a jusante. Devido a isto, Tucci (2016) desenvolveu um modelo prognóstico de turbidez para o rio Doce.

Utilizou-se a relação entre vazão e turbidez para desenvolver um modelo empírico de previsão, uma vez que a vazão influencia diretamente o transporte de sedimentos e, em consequência, a turbidez. Considerando, também, que dados de vazão podem ser obtidos de postos fluviométricos e modelos que transformam precipitação em vazão.

No desenvolvimento do modelo, foram analisados quatro postos de monitoramento selecionados, dividindo-se os dados em dois períodos: período chuvoso (dezembro de 2015 a fevereiro de 2016) e o período após fevereiro de 2016. A metodologia de análise é descrita abaixo:

- classificam-se as vazões em 10 intervalos de vazões, obtidas em 10 intervalos iguais, em escala logarítmica;
- determina-se a média da turbidez, para cada classe, dos dias com as vazões nesta classe;
- ajusta-se uma função que relaciona turbidez e vazão para os valores dos intervalos de classe, utilizando as médias, e verifica-se a correlação;
- com base nas vazões, determinam-se os valores calculados de turbidez.

Devido a possíveis incertezas do modelo, citadas a seguir, é aceita uma margem de 30% acima ou abaixo do valor obtido.

- São desprezadas outras variáveis explicativas para turbidez;
- na amostragem da turbidez, a coleta é realizada como uma amostragem da seção do rio, podendo ter grande variabilidade;
- erros de amostragem podem ocorrer;
- muitas vezes, os pontos de dados de vazão e turbidez não estão exatamente no mesmo local, podendo afetar os resultados;
- é desprezado o efeito dos reservatórios.

Para os postos analisados, distribuídos ao longo do rio Doce, os resultados obtidos foram satisfatórios, apontando a conveniência de se usar esta relação como preditor de turbidez. Em todos os postos, a regressão apresentou coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 0,8 (TUCCI, 2016).

#### **4.2.2 Prognóstico de turbidez com base em retenção de sedimentos em reservatórios**

Após a ruptura da barragem de Fundão, a CPRM – Serviço Geológico do Brasil (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) deu início a operação de um sistema de alerta, monitorando a passagem da onda de cheia devido ao acidente e informando as comunidades. Muitas cidades e comunidades ribeirinhas tinham no rio Doce a sua fonte de captação de água para abastecimento, que ficou comprometida devido aos elevados índices de turbidez apresentados. Por este motivo, a CPRM desenvolveu um modelo prognóstico de turbidez, a fim de alertar os usuários caso fosse necessária a interrupção do abastecimento (CASTILHO *et al.*, 2016).

O modelo desenvolvido tem como base o conceito de diluição e de retenção de sedimentos em reservatórios. Assim, a turbidez é calculada por uma equação similar à da mistura (Equação 9), apresentada a seguir.

$$T_m = \frac{(T_1 Q_1 + T_2 Q_2 + \dots + T_n Q_n)}{(Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n)} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_n$  são valores de turbidez nos pontos a montante;  $Q_1$ ,  $Q_2$  e  $Q_n$  são as vazões nos pontos a montante;  $T_m$  é a turbidez no ponto a jusante.

Cabe ressaltar que, segundo Walski *et al.* (2016), a equação 9 pode ser aplicada caso exista linearidade entre turbidez e sólidos suspensos, o que não ocorre na prática. Além disso, a turbidez não se conserva, podendo ser, neste caso, uma simplificação adotada.

A retenção de sedimentos nos reservatórios é calculada por meio das curvas de Churchill e Brune, apresentadas no item 3.4.2, e adota-se como premissa que o percentual de retenção de sedimentos é equivalente a diminuição da turbidez nos reservatórios (CASTILHO *et al.*, 2016).

Os dados necessários para a utilização do modelo são:

- volume dos reservatórios selecionados;
- vazão do rio Doce e dos principais afluentes;
- distância, velocidade e tempo de viagem entre os pontos de interesse;
- turbidez nos principais afluentes;
- turbidez nos pontos de monitoramento após a ruptura.

Este modelo foi aplicado por Castilho *et al.* (2016), utilizando postos de monitoramento do IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas) e da CPRM, tendo sido calibrado logo após a ruptura da barragem de rejeitos. Os resultados obtidos foram satisfatórios para faixas de turbidez de até 10.000 NTU (CASTILHO *et al.*, 2016).

### 4.2.3 Prognóstico de concentração de sedimentos em suspensão com base em modelagem hidrossedimentológica de grande escala

Modelo aplicado por Fagundes (2017), utiliza o software MGB-SED (BUARQUE, 2015) para modelagem hidrossedimentológica da bacia do rio Doce. Buarque (2015) desenvolveu este modelo acoplado um modelo de geração e transporte de sedimentos ao Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH), desenvolvido por Collischonn (2001) e modificado posteriormente por Paiva (2009).

O MGB-IPH calcula vazões dos rios de uma bacia hidrográfica com base em dados de precipitação (fácil obtenção e medição), umidade relativa, velocidade do vento, temperatura do ar e pressão atmosférica. O cálculo da evapotranspiração é realizado pela equação de Penman-Monteith e o escoamento superficial é gerado seguindo a abordagem Dunneana.

A discretização espacial do MGB-SED se dá por minibacias, que são subdivididas em Unidades de Resposta Hidrológicas (URH), onde se realizam as propagações dos volumes gerados. Pela Equação Universal de Perda de Solos - MUSLE modificada (Equação 10), é estimada a geração de sedimentos em cada URH (BUARQUE, 2015).

$$SED = 11,8. (Q_{sup} \cdot qp \cdot A)^{0,56} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS \quad (\text{Equação 10})$$

Em que  $SED$  é a carga de sedimento resultante da erosão e transporte do solo, em toneladas;  $Q_{sup}$  é o volume de escoamento superficial, em  $\text{mm} \cdot \text{ha}^{-1}$ ;  $qp$  é a taxa de pico do escoamento superficial, em  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $A$  é a área superficial, em  $\text{ha}$ ;  $K$  é o fator erodibilidade do solo [ $0,013 \cdot \text{t} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{t} \cdot \text{cm})^{-1}$ ];  $C$  é o fator de manejo e cobertura do solo, adimensional;  $P$  é o fator de práticas conservacionistas, adimensional; e  $LS$  é o fator topográfico, adimensional.

O software realiza a separação do total de sedimentos gerados em três classes, definidas pelo seu percentual na textura dos solos: areias, siltes e argilas. Utilizando reservatórios lineares (Figura 7), calcula-se o volume de sedimentos que deixa as minibacias e chega ao rio. Como nem todo o volume chega ao mesmo tempo, estes reservatórios são utilizados a fim de retardar o volume que alcança trechos de rio (FAGUNDES, 2017).

Os volumes de argila e silte são transportados na rede de drenagem em suspensão, por meio de uma equação de advecção (BUARQUE *et al.*, 2016).

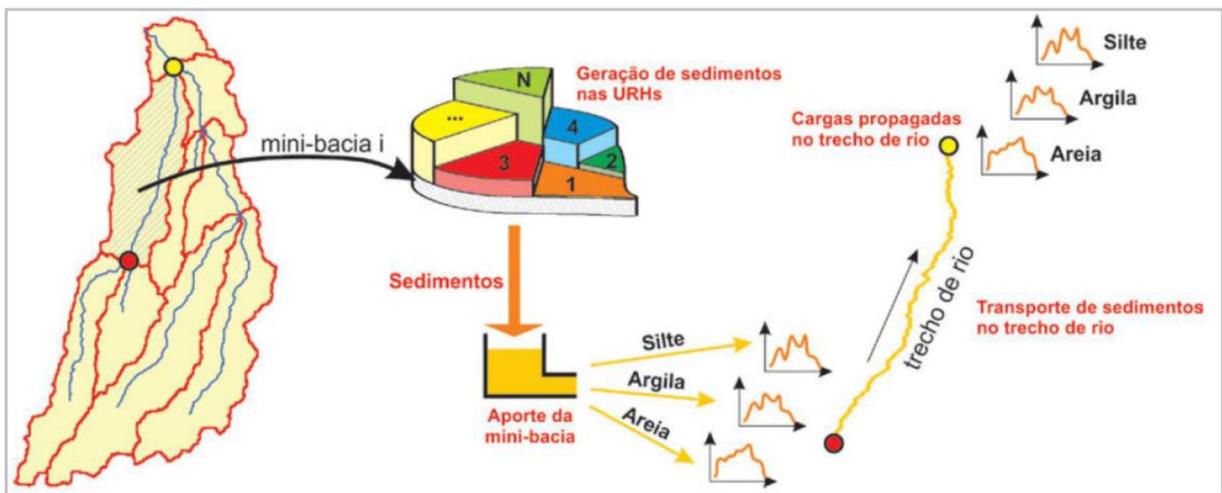
$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial AUC}{\partial x} = q_{sm} - q_{sfl} \quad (\text{Equação 11})$$

Já o volume de areia se propaga como carga de fundo, por meio da equação da continuidade de sedimentos de Exner (Equação 12).

$$(1 - \lambda) \frac{\partial A_b}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} - q_{sm} = 0 \quad (\text{Equação 12})$$

Onde  $A$  é a área molhada da seção, em  $\text{m}^2$ ;  $C$  é a concentração média de sedimentos, em  $\text{t.m}^{-3}$ ;  $U$  é a velocidade média do escoamento, em  $\text{m.s}^{-1}$ ;  $x$  é a distância na direção do escoamento, em  $\text{m}$ ;  $t$  é o tempo, em  $\text{s}$ ;  $q_{sm}$  é a contribuição lateral de sedimentos na minibacias, em  $\text{t.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ;  $q_{sfl}$  é a descarga de troca de sedimentos entre o rio e a planície de inundação, por unidade de comprimento do rio, em  $\text{t.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ;  $A_b$  é a área transversal de um “reservatório de sedimentos do fundo”, correspondente ao volume depositado ou erodido no trecho, em  $\text{m}^2$ ;  $Q_s$  é a descarga sólida de sedimentos no leito, em  $\text{t.s}^{-1}$ ;  $\lambda$  é a porosidade do depósito.

Figura 7. Esquema dos processos de geração e propagação de sedimentos nas minibacias e na rede de drenagem (BUARQUE, 2015).



(Fonte: Fagundes, 2017).

Na aplicação de Fagundes (2017), utilizaram-se, de dados observados, os dados *in situ* de CSS disponibilizados pela ANA, em que cada estação apresenta cerca de quatro medições anuais. Como os dados de concentração de sedimentos são escassos, buscaram-se adicionalmente dados de turbidez e de reflectância espectral da superfície, utilizados como *proxy* da CSS. Para esta última, utilizou-se a reflectância na faixa do vermelho, obtidas de imagens de satélite com

resolução espacial de 30 m, que têm relação direta com a presença de sedimentos em suspensão (FAGUNDES, 2017).

### 4.3 DADOS UTILIZADOS

Foram selecionados postos de medição de turbidez ao longo do rio Doce e de seus principais afluentes, onde existissem dados coletados durante o período analisado. A Tabela 2 mostra a relação de postos, enquanto as figuras 8 e 9 mostram a sua localização.

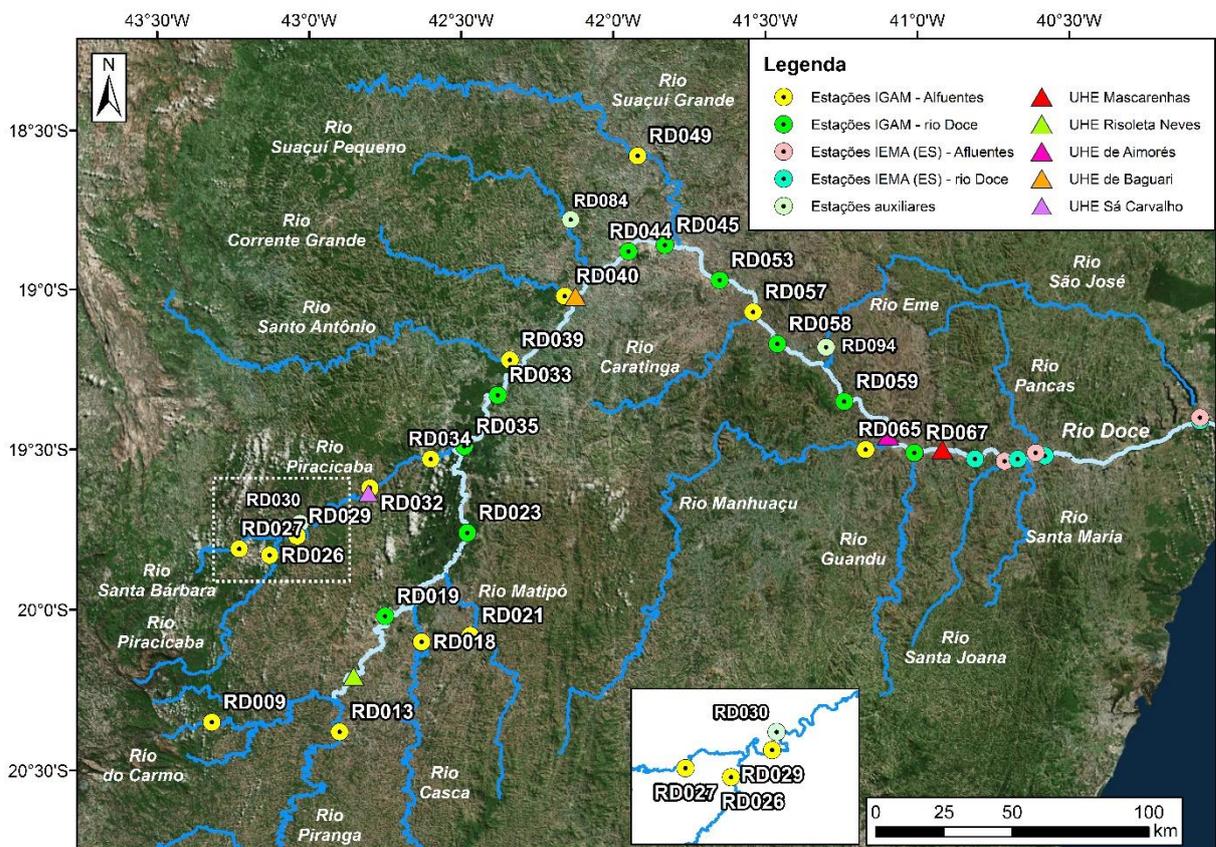
Tabela 2. Postos de medição de turbidez utilizados.

<b>Código do posto</b>	<b>Órgão responsável</b>	<b>Rio</b>	<b>Período de dados</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Município</b>
RD009	IGAM	DO CARMO	1997-2010	-20,35	-43,32	MARIANA
RD013	IGAM	PIRANGA	1997-2010	-20,38	-42,9	PONTE NOVA
RD018	IGAM	CASCA	2000-2010	-20,1	-42,63	RIO CASCA
RD019	IGAM	DOCE	1997-2010	-20,02	-42,75	RIO CASCA
RD021	IGAM	MATIPÓ	1997-2010	-20,08	-42,47	RAUL SOARES
RD023	IGAM	DOCE	1997-2010	-19,76	-42,48	MARILÉIA
RD026	IGAM	PIRACICABA	2000-2010	-19,83	-43,13	JOÃO MONLEVADE
RD027	IGAM	SANTA BÁRBARA	1998-2010	-19,81	-43,23	SÃO GONÇALO DO RIO ABAIXO
RD029	IGAM	PIRACICABA	1997-2010	-19,77	-43,04	NOVA ERA
RD030	IGAM	DO PEIXE	2000-2010	-19,73	-43,03	NOVA ERA
RD032	IGAM	PIRACICABA	2000-2010	-19,62	-42,8	ANTÔNIO DIAS
RD033	IGAM	DOCE	1997-2010	-19,33	-42,38	BELO ORIENTE
RD034	IGAM	PIRACICABA	2000-2010	-19,53	-42,6	CORONEL FABRICIANO
RD035	IGAM	DOCE	2000-2010	-19,49	-42,49	IPATINGA
RD039	IGAM	SANTO ANTÔNIO	1997-2010	-19,22	-42,34	NAQUE
RD040	IGAM	CORRENTE GRANDE	2000-2010	-19,02	-42,16	PERIQUITO
RD044	IGAM	DOCE	2000-2010	-18,88	-41,95	GOVERNADOR VALADARES
RD045	IGAM	DOCE	1997-2010	-18,86	-41,83	GOVERNADOR VALADARES
RD049	IGAM	SUAÇUÍ GDE	1997-2010	-18,58	-41,92	FREI INOCÊNCIO
RD053	IGAM	DOCE	1997-2010	-18,97	-41,65	GALILÉIA
RD057	IGAM	CARATINGA	1997-2010	-19,07	-41,54	CONSELHEIRO PENA
RD058	IGAM	DOCE	2000-2010	-19,17	-41,46	CONSELHEIRO PENA

(continua)

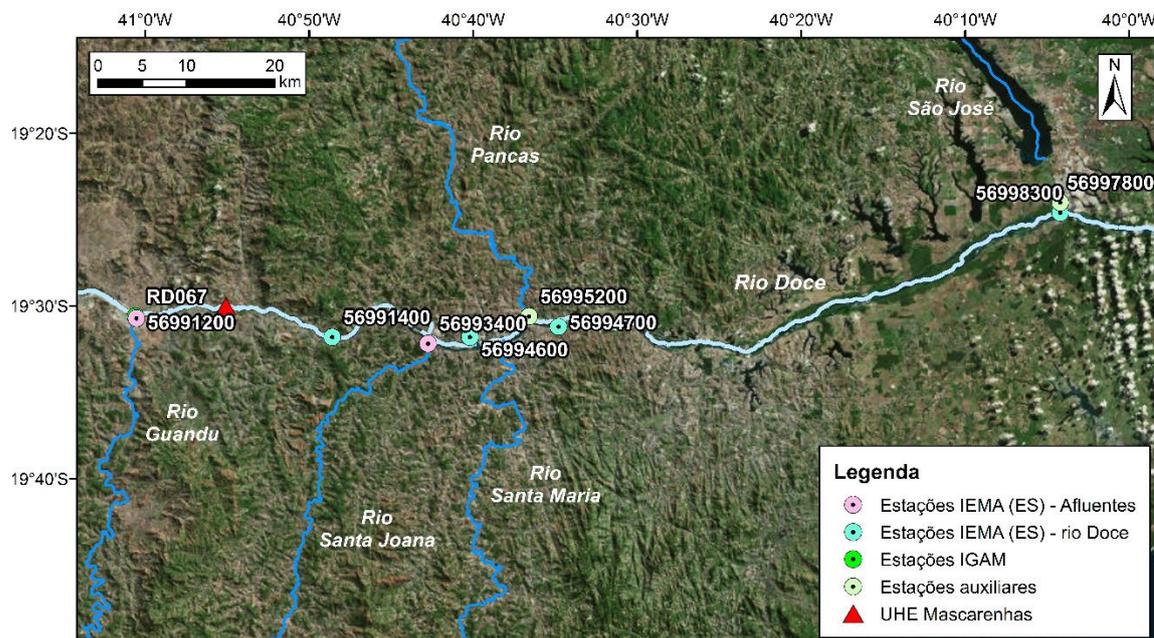
Código do posto	Órgão responsável	Rio	Período de dados	Latitude	Longitude	Município
RD059	IGAM	DOCE	1997-2010	-19,35	-41,24	RESPLENDOR
RD065	IGAM	MANHUAÇU	1997-2010	-19,5	-41,17	AIMORÉS
RD067	IGAM	DOCE	1998-2010	-19,51	-41,01	AIMORÉS/BAIXO GUANDU
RD084	IGAM	SUAÇUÍ PEQUENO	2007-2010	-18,78	-42,14	GOVERNADOR VALADARES
RD094	IGAM	DO EME	2007-2010	-19,18	-41,3	RESPLENDOR
56991200	IEMA-ES	GUANDU	1999-2010	-19,51	-41,01	AFONSO CLÁUDIO
56991400	IEMA-ES	DOCE	1999-2010	-19,53	-40,81	COLATINA
56993400	IEMA-ES	SANTA JOANA	1999-2010	-19,54	-40,71	BAIXO GUANDU
56994600	IEMA-ES	DOCE	1999-2009	-19,53	-40,67	COLATINA
56994700	IEMA-ES	DOCE	1999-2010	-19,52	-40,58	COLATINA
56995200	IEMA-ES	PANCAS	1999-2002	-19,51	-40,61	COLATINA
56997800	IEMA-ES	SÃO JOSÉ	2010	-19,40	-40,07	LINHARES
56998300	IEMA-ES	DOCE	1999-2010	-19,41	-40,07	LINHARES

Figura 8. Localização dos postos de medição de turbidez.



(Fonte: elaborada pelo autor).

Figura 9. Localização dos postos de medição de turbidez do IEMA (ES).



(Fonte: elaborada pelo autor).

As vazões utilizadas, necessárias para os modelos apresentados nos itens 4.2.1 e 4.2.2, foram as estimadas pela aplicação de Fagundes (2017), geradas pelo MGB-IPH, a fim de manter a consistência metodológica. Estas vazões abrangem o período de 1970 a 2010, limitando a análise até o ano de 2010. Já os dados observados de turbidez, de ambos os órgãos, limitam o início da análise a 1997, ano inicial considerado nas calibrações.

#### 4.4 ANÁLISE COMPARATIVA

Após a aplicação dos modelos prognósticos para a bacia do rio Doce, foi feita uma análise comparativa simples entre os resultados gerados e dados observados em campo. Fez-se, também, esta análise entre modelos, com o objetivo de descobrir qual possui melhor desempenho para a região em estudo e suas dificuldades de aplicação.

As estatísticas de erro utilizadas foram erro médio (viés), raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM), que representa a amplitude do erro, e coeficiente de correlação linear, as quais permitiram uma comparação global e entre modelos. Suas fórmulas estão apresentadas a seguir.

$$\text{Erro médio} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{\text{estimada}} - T_{\text{observada}}) \quad (\text{Equação 13})$$

$$\text{REQM} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{\text{estimada}} - T_{\text{observada}})^2} \quad (\text{Equação 14})$$

Onde  $T$  é a turbidez (NTU) e  $n$  é o número de previsões.

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \cdot \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (\text{Equação 15})$$

Onde  $n$  é o número de previsões,  $x_i$  e  $y_i$  são os dados de turbidez que se quer comparar, ou seja, um representa os dados observados e outro representa os resultados de aplicação dos modelos.

Cabe ressaltar que os resultados obtidos por Fagundes (2017) não se referem diretamente a níveis de turbidez. Logo, para possibilitar a sua comparação com os demais modelos, teve de ser obtida uma correlação entre CSS e turbidez, como mencionado no item 3.3 deste trabalho.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os modelos prognósticos aqui estudados foram analisados para o mesmo período de dados, a fim de resultar em uma comparação coerente. O período escolhido compreendeu os anos de 1997 a 2010, em que dados de medição de 1997 a 2005 foram utilizados para calibração dos modelos, enquanto o período de 2006 a 2010 (devido à limitação dos dados de vazão gerados) foi utilizado para sua aplicação e comparação com os dados observados disponíveis.

Para isso, foram selecionados postos de medição de turbidez que possuíssem registros dessa época (item 4.3). Para o trecho da bacia no território de Minas Gérias, os dados foram obtidos junto ao IGAM, já os referentes ao estado do Espírito Santo foram obtidos com o IEMA (ES). Ainda, dados de vazão foram necessários para a aplicação dos modelos de Tucci (2016) e de Castilho *et al* (2016). A fim de manter a consistência metodológica, foram utilizados os obtidos pela aplicação de Fagundes (2017), assim, cada posto de turbidez foi relacionado a uma das minibacias do modelo MGB-SED, utilizando-se os dados de vazão gerados pela simulação.

Cabe ressaltar que as medições de turbidez realizadas são poucas, apresentando, geralmente, quatro medições ao longo de um ano. Portanto, em média, foram utilizadas cerca de 20 a 25 dados para a calibração, referentes ao estado de Minas Gerais, e 20 dados para validação. Os dados de responsabilidade do IEMA possuem menos observações no período analisado em comparação aos demais, variando entre duas a três medições por ano.

Nos itens 5.1 e 5.3 a seguir, são apresentadas as correlações estimadas para o período de calibração dos modelos de Tucci (2016) e Fagundes (2017). O item 5.2 mostra as relações e dados utilizados para o modelo adaptado de Castilho *et al* (2016). Os resultados das aplicações estão agrupados e mostrados no item 5.4.

### 5.1 CALIBRAÇÃO DO MODELO PROGNÓSTICO DE TURBIDEZ COM BASE NA VAZÃO

O modelo de Tucci (2016) permite prever a turbidez em determinado ponto baseando-se na vazão, que pode ser obtida por postos ou por modelos que transformam precipitação em vazão (caso deste estudo). As correlações mostradas a seguir foram obtidas para o período de calibração, de 1997 a 2000, e demonstraram bom desempenho. Contudo, existem incertezas

nesta correlação com a vazão que devem ser consideradas (como mencionado no item 4.2.1), incluindo o fato de que a vazão não foi obtida no mesmo local da turbidez. Considerou-se a vazão da minibacia na qual o posto está inserido, mas não exatamente no local do posto.

Neste modelo, 20 dos 30 postos analisados obtiveram fator  $R^2$  superior a 0,6, indicando boa correlação entre turbidez e vazão observada. Os postos de responsabilidade do IEMA (ES) foram os que resultaram em fatores de correlação menores, o que pode estar relacionado à menor quantidade de dados disponível para a calibração do modelo. A seguir estão apresentadas as correlações obtidas para alguns postos distribuídos na bacia, os demais podem ser encontrados no anexo B, enquanto os valores de  $R^2$  obtidos são mostrados no anexo A. Nos gráficos de ajuste da turbidez, os pontos azuis são a média dos intervalos de turbidez dos valores dos pontos em vermelho (todos os dados de turbidez do período). O ajuste da curva de regressão é realizado para a média dos intervalos.

Figura 10. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD019 (rio Doce) no município de Rio Casca (MG).

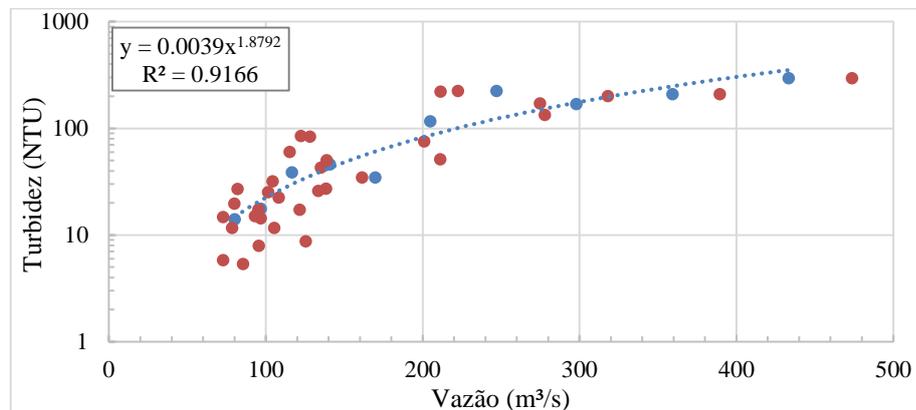


Figura 11. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD033 (rio Doce) no município de Belo Oriente (MG).

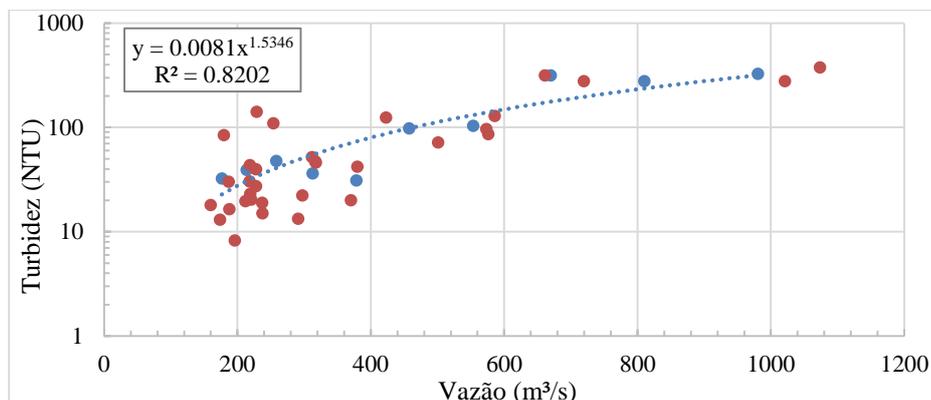


Figura 12. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD040 (rio Corrente Grande) no município de Periquito (MG).

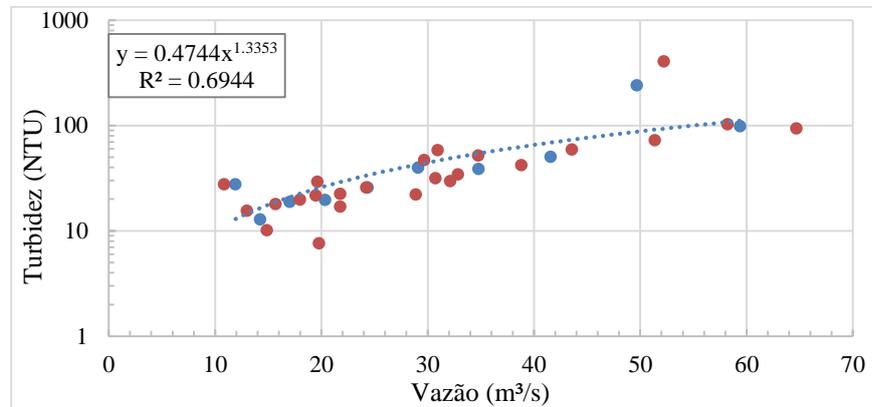


Figura 13. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD058 (rio Doce) no município de Conselheiro Pena (MG).

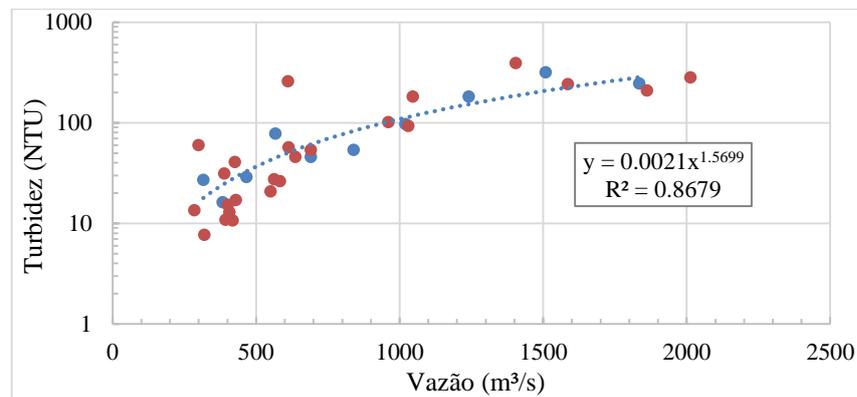
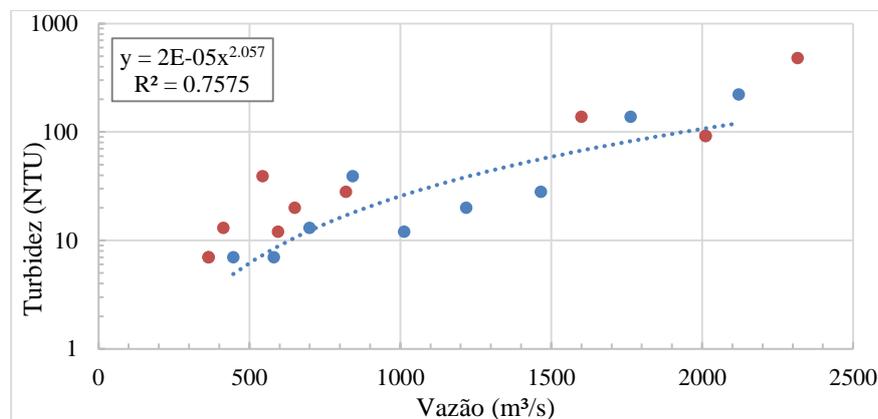


Figura 14. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto 56998300 (rio Doce) no município de Linhares (ES).



## 5.2 CALIBRAÇÃO DO MODELO PROGNÓSTICO DE TURBIDEZ COM BASE EM RETENÇÃO DE SEDIMENTOS EM RESERVATÓRIOS

Este modelo foi aplicado a todos os postos com dados de montante, mesmo não existindo reservatório próximo. Os quatro reservatórios considerados na bacia foram os das usinas Sá Carvalho, Baguari, Aimorés e Mascarenhas. Cabe ressaltar que, para a aplicação deste modelo, considerou-se uma turbidez de 100 NTU em dois afluentes (rios Pancas e São José), com base em medições de períodos posteriores, por falta de dados disponíveis no período analisado.

Na tabela a seguir estão apresentadas as características dos reservatórios. As eficiências adotadas foram baseadas nos dados de medição de turbidez disponíveis a montante e a jusante das barragens, após uma comparação simples, utilizando-se as curvas de Brune e Churchill apenas como referência (pois foram feitas para concentração de sedimentos, não turbidez).

Tabela 3. Volume dos reservatórios utilizados no estudo.

UHE	Volume do reservatório (hm <sup>3</sup> )	Eficiência de retenção		
		Brune	Churchill	Adotada
BAGUARI	43,6	2%	35%	80%
AIMORÉS	185,11	44%	45%	40%
MASCARENHAS	21,8	5%	67%	40%
SÁ CARVALHO	1,38	5%	25%	50%

O material disponível sobre o modelo desenvolvido pela CPRM é um artigo publicado no XII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos (CASTILHO, *et. al.*, 2016). A partir da interpretação deste material, aplicaram-se os conceitos de diluição e de retenção de sedimentos nos reservatórios do modelo para o desenvolvimento do prognóstico. A Tabela 4 mostra a relação dos postos analisados e suas posições, enquanto no anexo D encontram-se todos os resultados desta aplicação.

Tabela 4. Relação de postos utilizados e suas posições.

Posto Jusante	Rio	Postos montante	Rio	UHE	Posição em relação à UHE
RD023	Doce	RD018	Casca	-	-
		RD019	Doce		
		RD021	Matipó		
RD029	Piracicaba	RD027	Santa Bárbara	-	-

Posto Jusante	Rio	Postos montante	Rio	UHE	Posição em relação à UHE
		RD026	Piracicaba		
<b>RD034</b>	Piracicaba	RD030	Piracicaba	SÁ CARVALHO	Montante
		RD032	Piracicaba		Montante
<b>RD035</b>	Doce	RD023	Doce	-	-
		RD034	Piracicaba		
<b>RD033</b>	Doce	RD035	Doce	-	-
<b>RD044</b>	Doce	RD033	Doce	BAGUARI	Montante
		RD039	Santo Antônio		Montante
		RD040	Corrente Grande		Montante
		RD084	Suaçuí Pequeno		Jusante
<b>RD045</b>	Doce	RD044	Doce	-	-
<b>RD053</b>	Doce	RD045	Doce	-	-
		RD049	Suaçuí Grande		
<b>RD058</b>	Doce	RD053	Doce	-	-
		RD057	Caratinga		
<b>RD059</b>	Doce	RD058	Doce	-	-
		RD094	Eme		
<b>RD067</b>	Doce	RD059	Doce	AIMORÉS	Montante
		RD065	Manhuaçu		Jusante
<b>56991400</b>	Doce	RD067	Doce	MASCARENHAS	Montante
		56991200	Guandu		Montante
<b>56994600</b>	Doce	56991400	Doce	-	-
		56993400	Santa Joana		
<b>56994700</b>	Doce	56994600	Doce	-	-
		56995200	Pancas		
<b>56998300</b>	Doce	56994700	Doce	-	-
		56997800	São José		

Figura 15. Relação entre turbidez estimada e observada na estação RD033 (rio Doce) no município de Belo Oriente (MG).

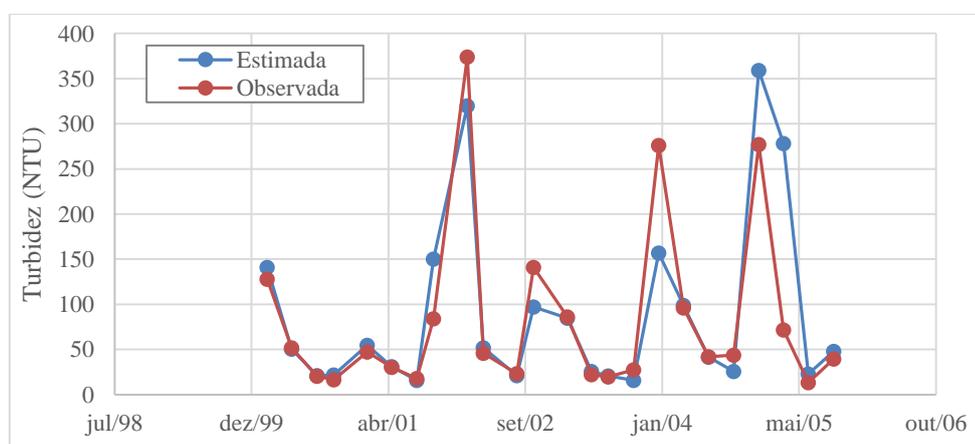


Figura 16. Relação entre turbidez estimada e observada na estação RD045 (rio Doce) no município de Governador Valadares (MG).

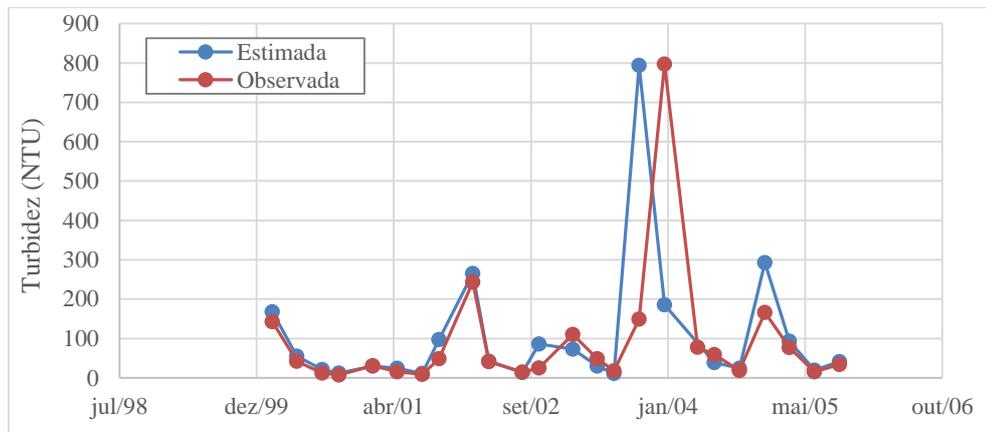
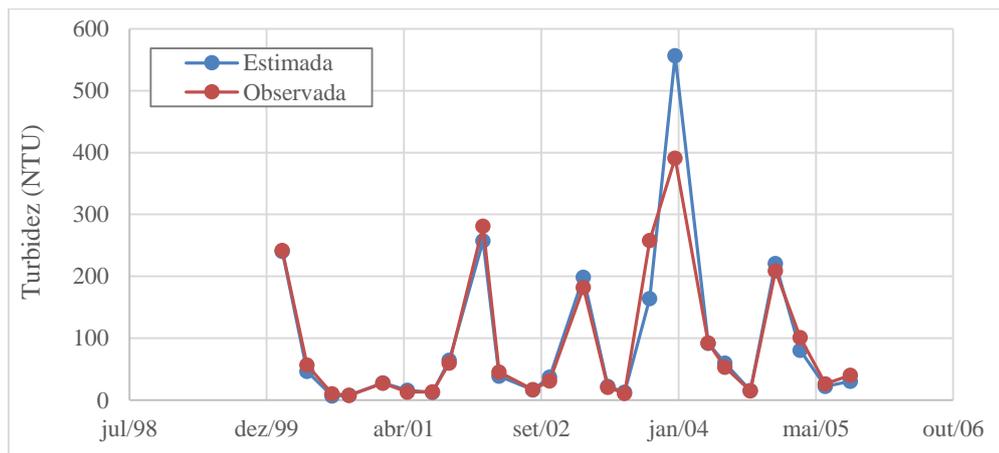


Figura 17. Relação entre turbidez estimada e observada na estação RD058 (rio Doce) no município de Conselheiro Pena (MG).



### 5.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO PROGNÓSTICO DE CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS

A partir da aplicação realizada por Fagundes (2017) - em que realizou-se a calibração do MGB-SED -, foram obtidas correlações entre turbidez e concentração de sólidos suspensos (CSS) para a bacia do rio Doce. Dos dados gerados pelo software, somaram-se as concentrações de argila e silte diárias das minibacias e, com essas concentrações, foram feitas as correlações com a turbidez observada nas estações mais próximas, para o período entre os anos 1997 a 2000.

Segundo Fagundes *et. al.* (2017), o método de extração automática da reflectância mostrou-se adequado para períodos chuvosos, devendo ser analisados mais cuidadosamente em períodos secos, pois os resultados podem sofrer influência do fundo e das margens, principalmente em rios com calhas menores. Assim, seria interessante fazer uma análise do modelo prognóstico separando estes dois períodos, o que não foi feito nesse estudo devido à baixa disponibilidade de dados de turbidez no período analisado.

Nesta aplicação, 22 dos 30 postos analisados obtiveram fator  $R^2$  superior a 0,5, indicando correlações satisfatórias entre turbidez e concentração de sedimentos em suspensão. Nas figuras a seguir estão apresentadas as correlações obtidas para alguns postos ao longo da bacia, no período de calibração. As demais correlações e os resultados são encontrados no anexo C.

Figura 18. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD019 (rio Doce) no município de Rio Casca (MG).

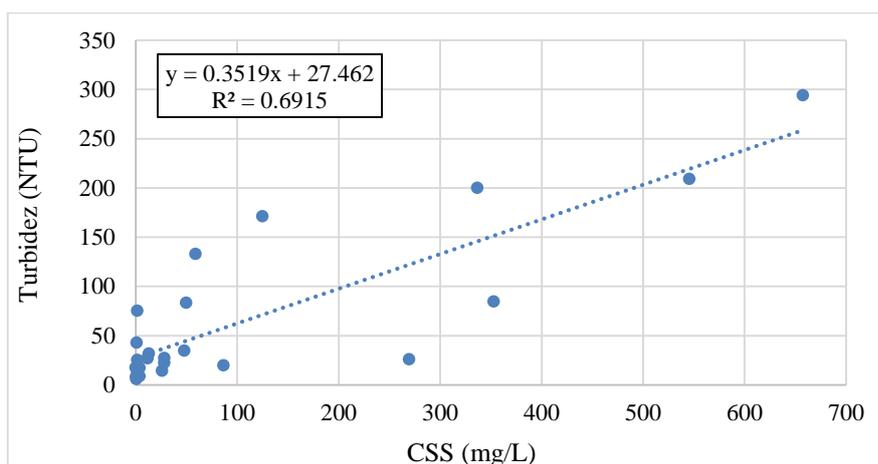


Figura 19. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD040 (rio Corrente Grande) no município de Periquito (MG).

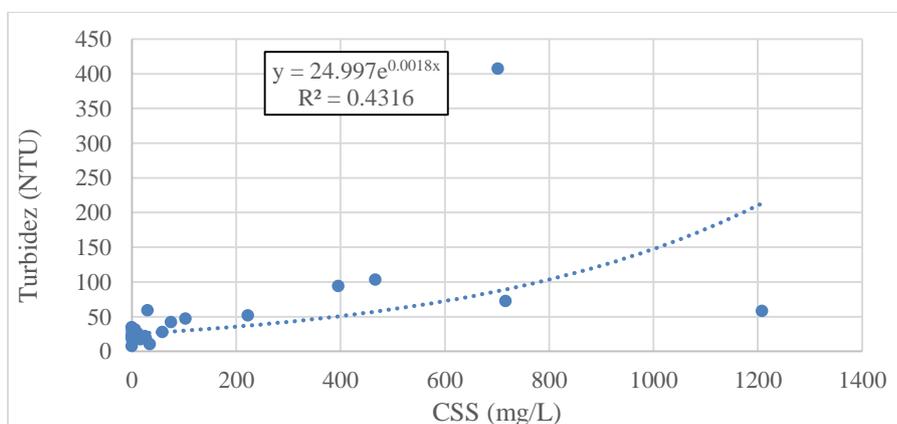


Figura 20. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD058 (rio Doce) no município de Conselheiro Pena (MG).

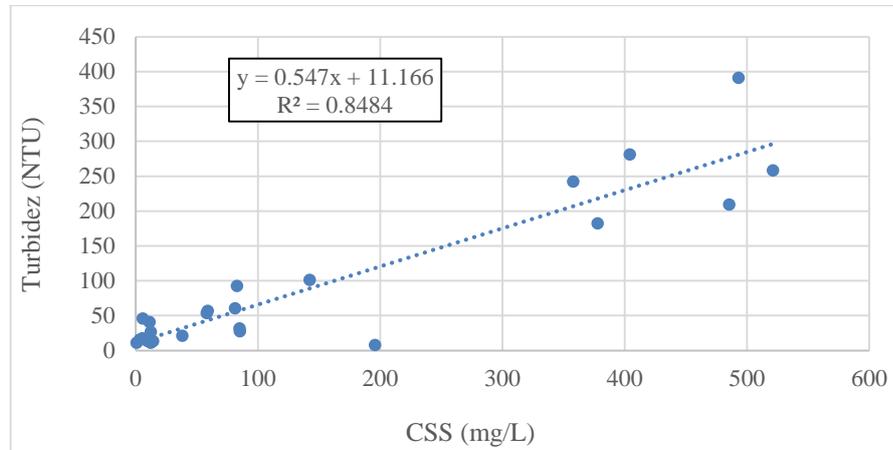
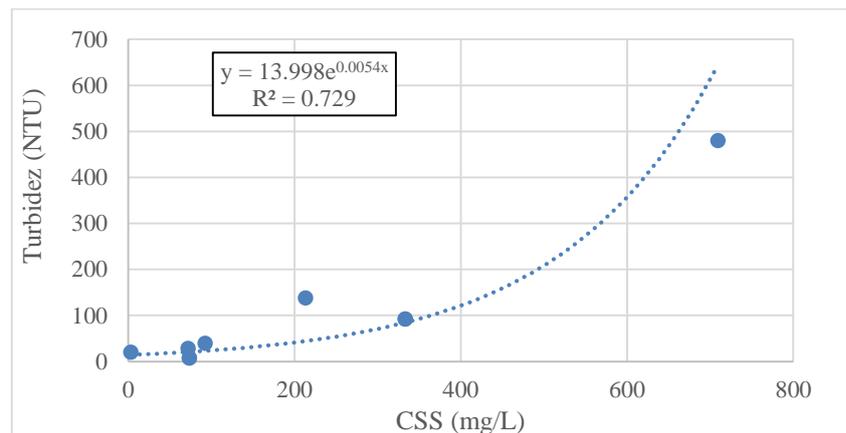


Figura 21. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto 56998300 (rio Doce) no município de Linhares (ES).



## 5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

De maneira geral, os três modelos geraram resultados satisfatórios de prognósticos de turbidez para a bacia hidrográfica do rio Doce. Só foi possível aplicar o modelo baseado na retenção em reservatórios em dois dos postos localizados nos afluentes, visto que é necessário que existam estações com dados de turbidez a montante, o que não havia para o período analisado. Os resultados estão analisados a seguir, de montante para jusante. Na Tabela 5 estão apresentadas as estatísticas de erro dos modelos para a aplicação de 2006 a 2010.

É possível observar que em períodos de pico de turbidez os modelos possuem menor precisão e apresentam, muitas vezes, comportamentos distintos entre estes períodos e os em que é

observada menor turbidez. Observando a Figura 22, percebe-se que o comportamento dos modelos no afluente do Carmo é semelhante nas faixas mais baixas de turbidez, onde os modelos de Tucci e de Fagundes tendem a superestimar seus valores em relação aos observados. Já nos rios Matipó (Figura 25) e Piranga (Figura 23) tendem a subestimá-los. Nos picos, nota-se que nos rios Casca e do Carmo superestimam e os demais subestimam a turbidez.

Das estações localizadas no rio Doce, antes da confluência com o rio Piracicaba (RD023), nota-se que os valores estimados pelo modelo baseado na correlação com a vazão possuem pouca variabilidade, excetuando-se os pontos de pico, e resultam próximos ao valor observado. Na faixa de turbidez de 0 a 100 NTU, os valores resultantes do modelo de Fagundes (2017) são superiores aos de Tucci (2016). A Figura 27 mostra que o modelo baseado na retenção em reservatórios é o que melhor representa o comportamento da turbidez nesta estação.

Figura 22. Resultados comparados para a estação RD009 (rio do Carmo).

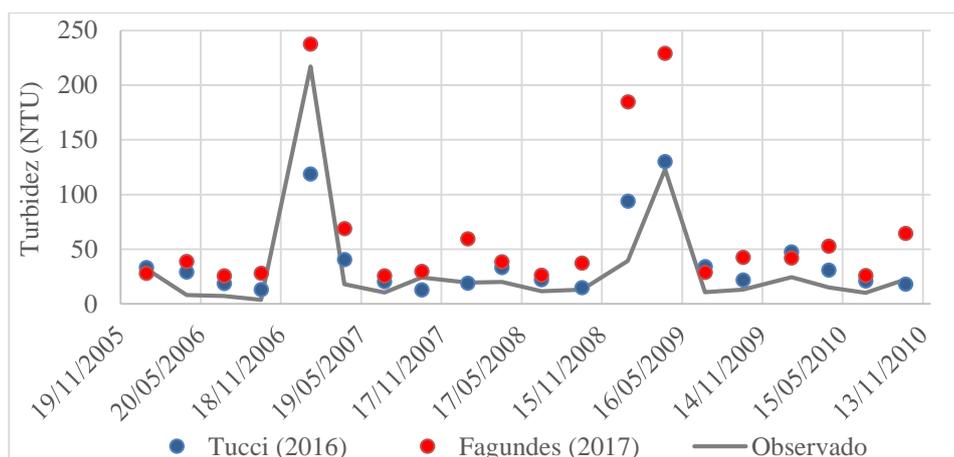


Figura 23. Resultados comparados para a estação RD013 (rio Piranga).

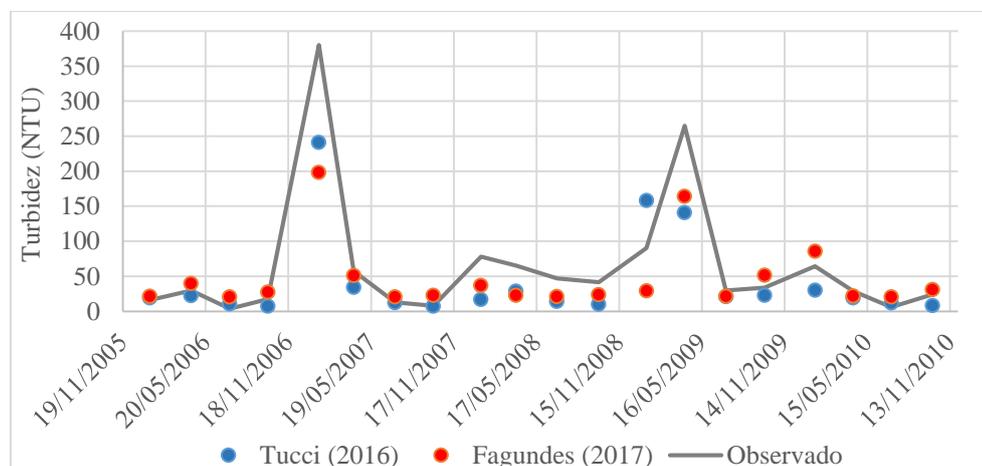


Figura 24. Resultados comparados para a estação RD018 (rio Casca).

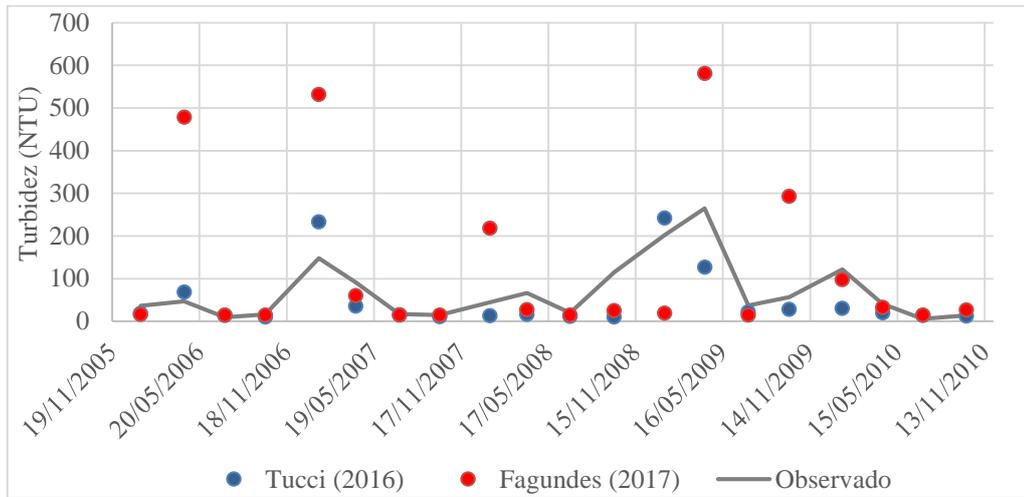


Figura 25. Resultados comparados para a estação RD021 (rio Matipó).

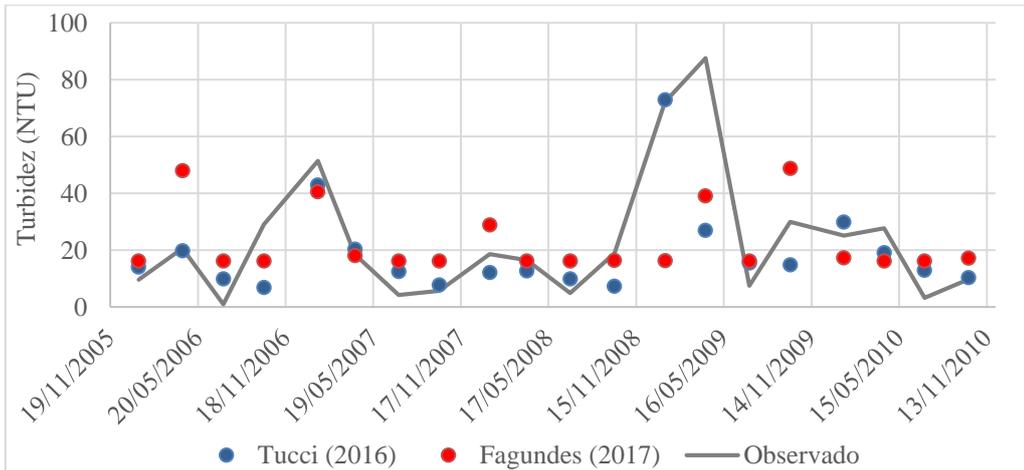


Figura 26. Resultados comparados para a estação RD019 (rio Doce).

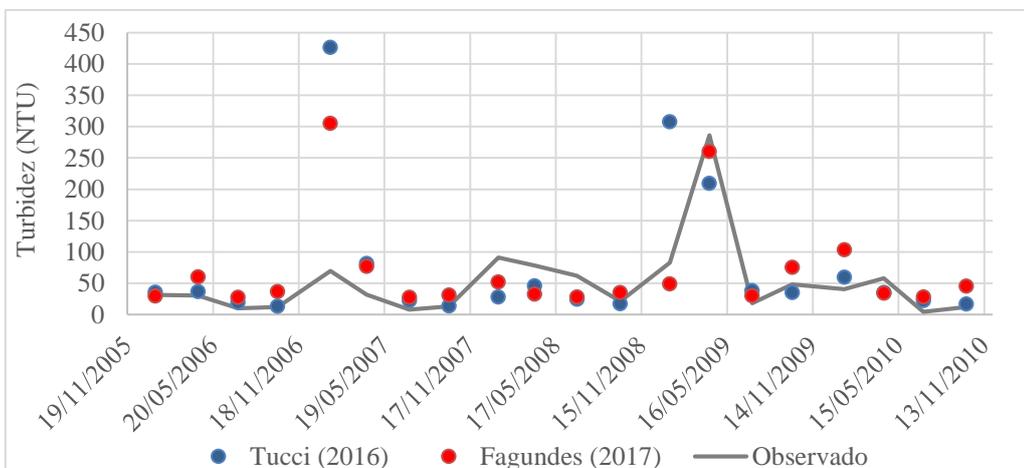
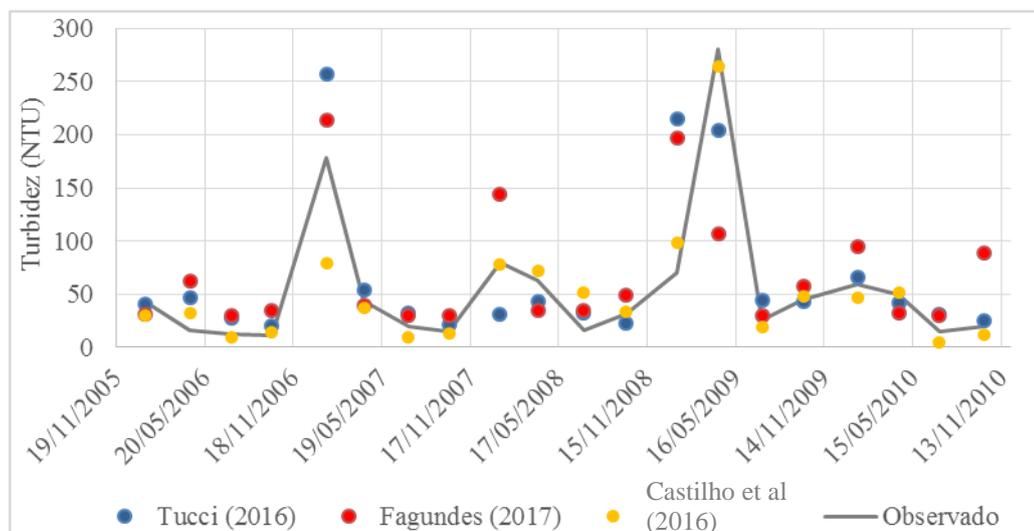


Figura 27. Resultados comparados para a estação RD023 (rio Doce).



Os modelos demonstram comportamentos diferentes no rio Piracicaba antes (Figura 28) e depois (Figura 30) da confluência com o rio Santa Bárbara (Figura 29). Antes, ambos os modelos tendem a subestimar os valores de turbidez, mantendo-se próximos aos valores observados na faixa de 0 a 50 NTU e distanciando-se nos picos. Já após a confluência, tendem a superestimar estes valores, mantendo-se próximos ao observado, mas distanciando-se ainda mais nos picos. Possivelmente isso é explicado pela contribuição do rio Santa Bárbara, em que os modelos também tendem a superestimar os valores, como mostra a Tabela 5, onde estão apresentados os resultados das estatísticas de erro aplicadas.

Nestes afluentes, nota-se que o modelo de Fagundes resulta em valores mais elevados que os de Tucci, confirmando-se ao observar o valor referente à amplitude de erro dos modelos (Tabela 5). Uma das possíveis explicações para isso é a incerteza do modelo em calhas de rios menores. O valor estimado afasta-se mais do observado em períodos de seca, podendo ser resultado de erros na análise devido a influência das margens ou do fundo do rio na reflectância obtida por meio de sensoriamento remoto (rios com calhas de estiagem pequenas).

Em geral, o modelo baseado no desenvolvido por Castilho *et al.* resulta em valores mais próximos dos observados. Contudo, nota-se que na estação RD034 (Figura 32) ele os subestima durante todo o período. Isso pode ser explicado pela localização da estação, a jusante da UHE Sá Carvalho, indicando que a retenção adotada para o reservatório da usina na aplicação do modelo pode ser mais elevada do que a real. Ainda, nota-se que entre as estações RD032 e RD034, em janeiro de 2007 o pico de turbidez é maior na última, mesmo existindo um

reservatório entre ambas. Não é possível afirmar a causa deste aumento de turbidez, podendo ser efeito da cidade próxima, ou mesmo do próprio reservatório, que pode erodir o leito demasiadamente (durante a obra, por exemplo), causando suspensão de sedimentos a jusante.

Na estação RD035 (Figura 33), localizada no rio Doce, logo após a confluência com o rio Piracicaba, os valores nas faixas baixas de turbidez são semelhantes ao valor obtido para a estação RD034. Já nos picos, nota-se um aumento nos valores estimados pelos modelos de Tucci e Fagundes. Um fator que pode explicar este fenômeno é que a partir da confluência, possivelmente ocorra um aumento na seção do rio Doce. Com isso, a velocidade do rio tende a diminuir, ocasionando a deposição de uma parcela de sólidos suspensos em seu leito. Em períodos de cheia (picos de vazão), esses sólidos ficam em suspensão novamente, resultando em um aumento rápido de turbidez no local.

Figura 28. Resultados comparados para a estação RD026 (rio Piracicaba).

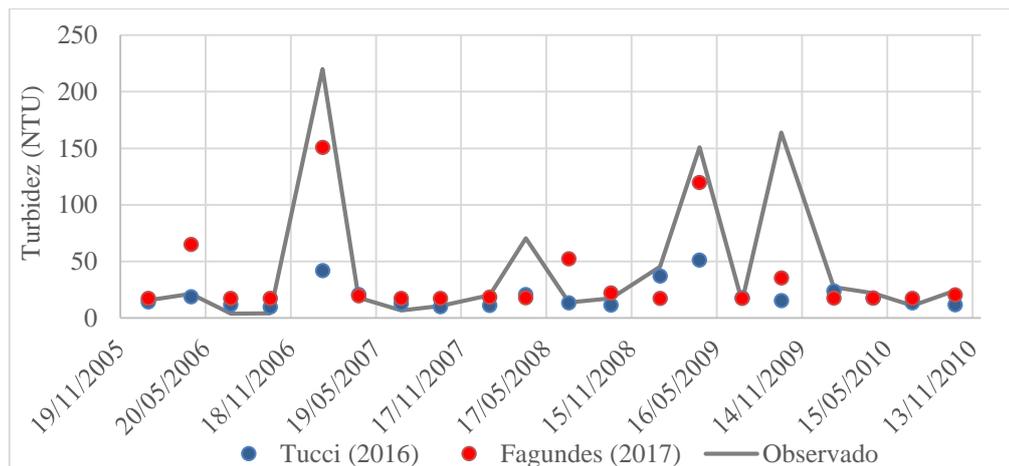


Figura 29. Resultados comparados para a estação RD027 (rio Santa Bárbara).

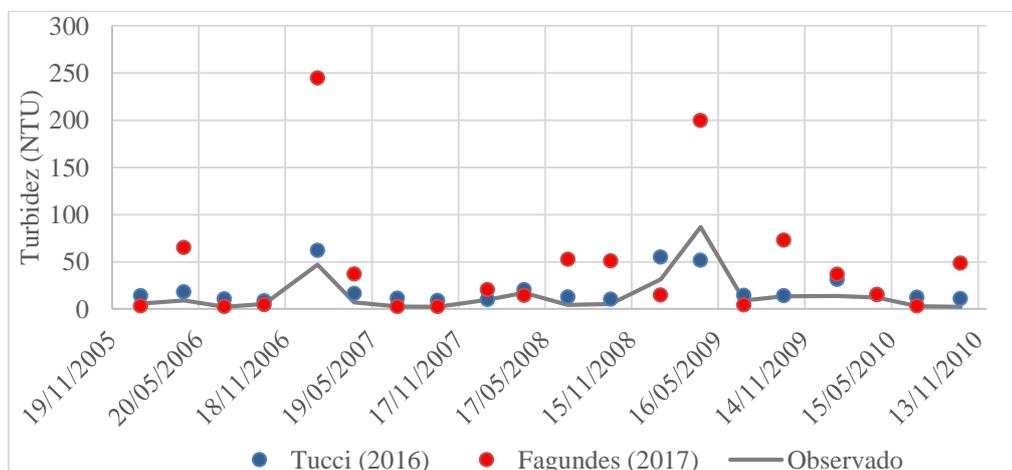


Figura 30. Resultados comparados para a estação RD029 (rio Piracicaba).

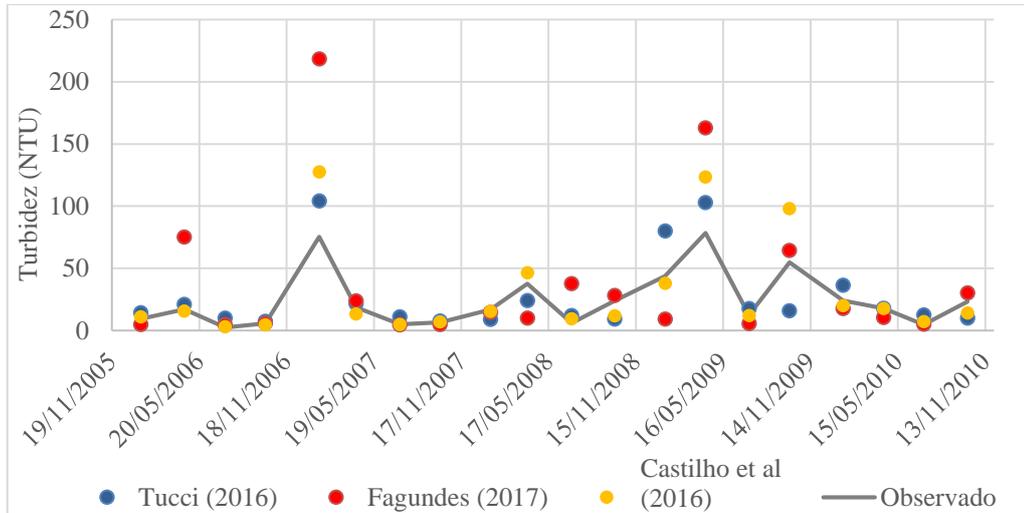


Figura 31. Resultados comparados para a estação RD032 (rio Piracicaba).

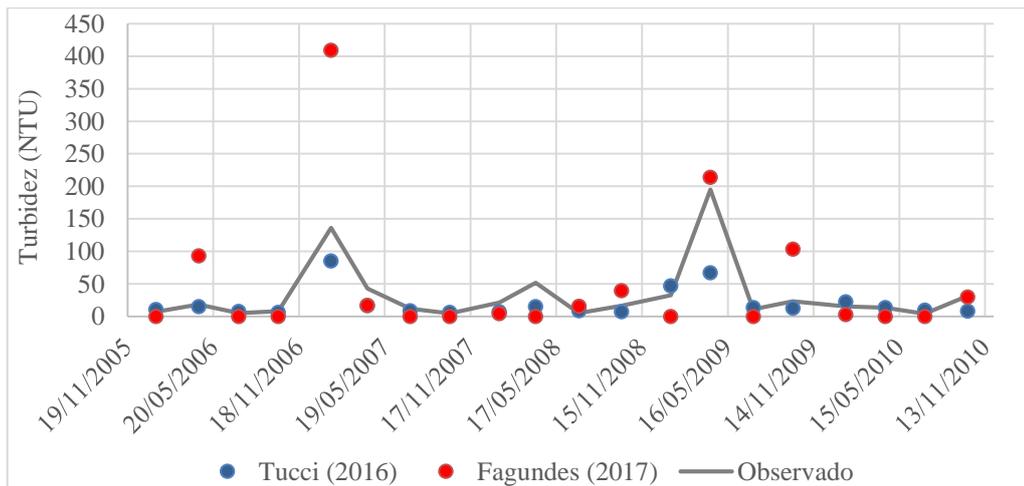


Figura 32. Resultados comparados para a estação RD034 (rio Piracicaba).

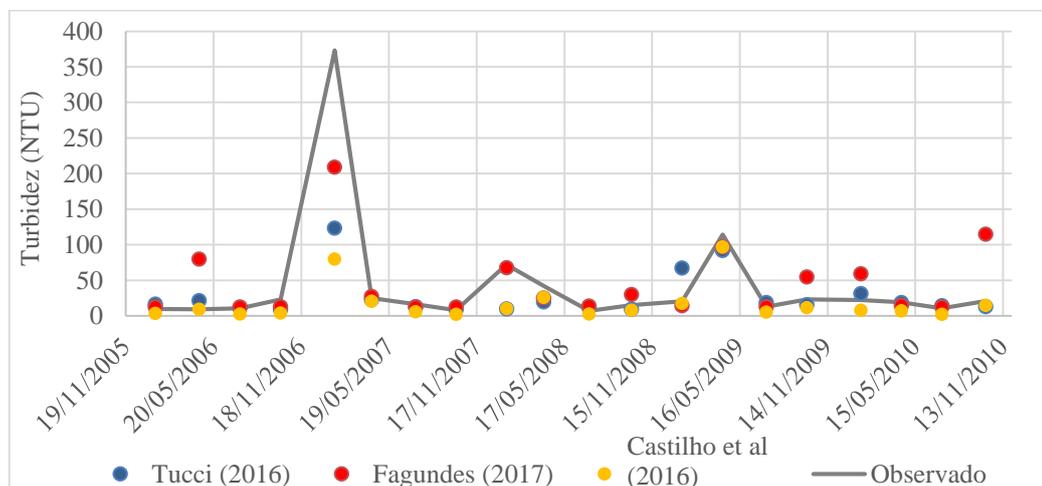
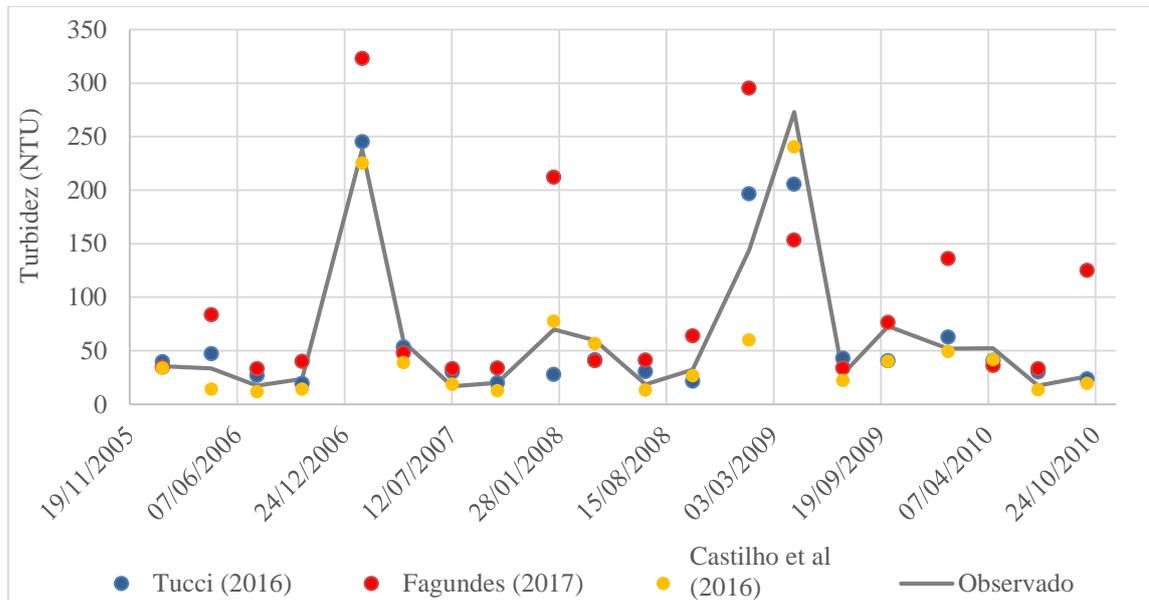


Figura 33. Resultados comparados para a estação RD035 (rio Doce).



A estação RD033 (Figura 34) encontra-se a jusante da RD035, em cerca de 15 km, sem a entrada de afluentes significativos no trecho. Nota-se que a turbidez estimada pelo modelo de Tucci dobra de valor, enquanto o de Fagundes cai à metade. Não é possível explicar o motivo deste acontecimento, porém, uma possibilidade é a vazão incremental no trecho.

Nos afluentes Santo Antônio (Figura 35) e Corrente Grande (Figura 36), é possível observar que, para baixos intervalos de turbidez (10 a 50 NTU), os modelos de Tucci e Fagundes se aproximam dos valores observados, mas tendem a subestimar esses valores. Já no rio Doce (RD044 e RD045), estes dois modelos superestimam a turbidez, enquanto a estimativa realizada pelo modelo baseado na retenção em reservatórios é o que mais se aproxima do comportamento observado da turbidez, como pode-se notar, principalmente, na Figura 37. Para ambas as estações, todos os modelos apresentam coeficiente de correlação próximos e superiores a 0,8, indicando bom desempenho.

Figura 34. Resultados comparados para a estação RD033 (rio Doce).

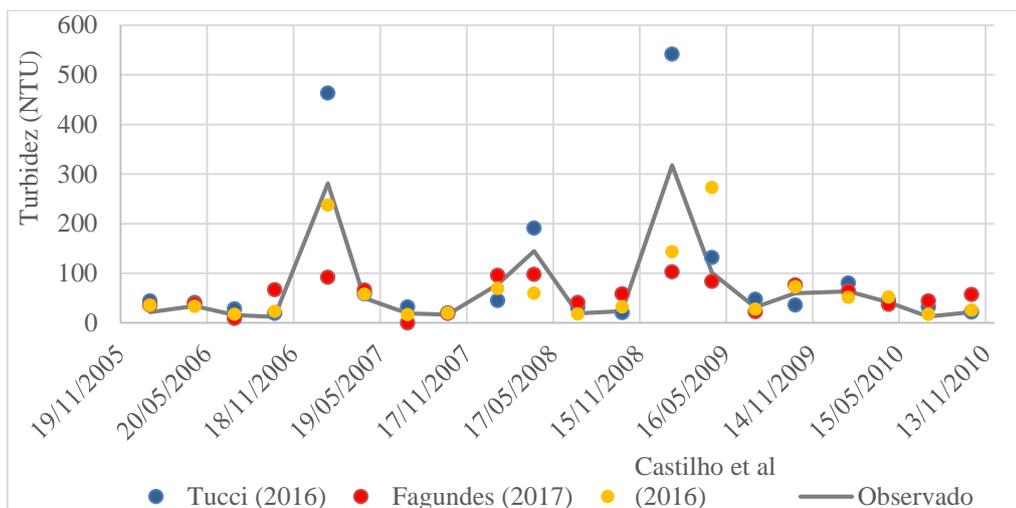


Figura 35. Resultados comparados para a estação RD039 (rio Santo Antônio).

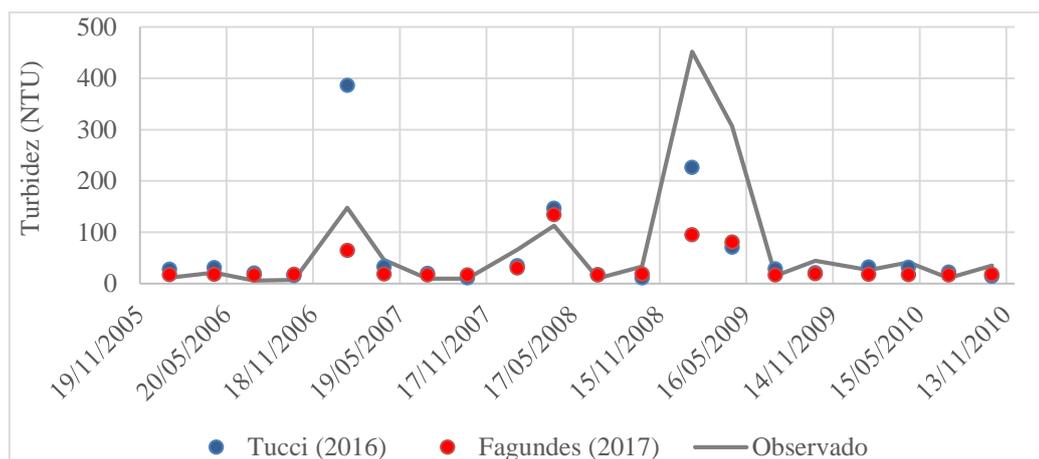


Figura 36. Resultados comparados para a estação RD040 (rio Corrente Grande).

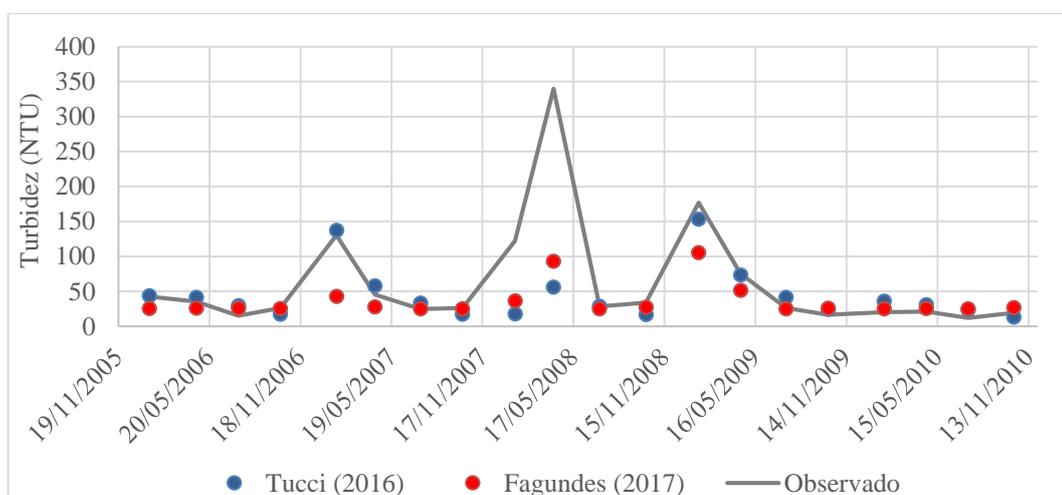


Figura 37. Resultados comparados para a estação RD044 (rio Doce).

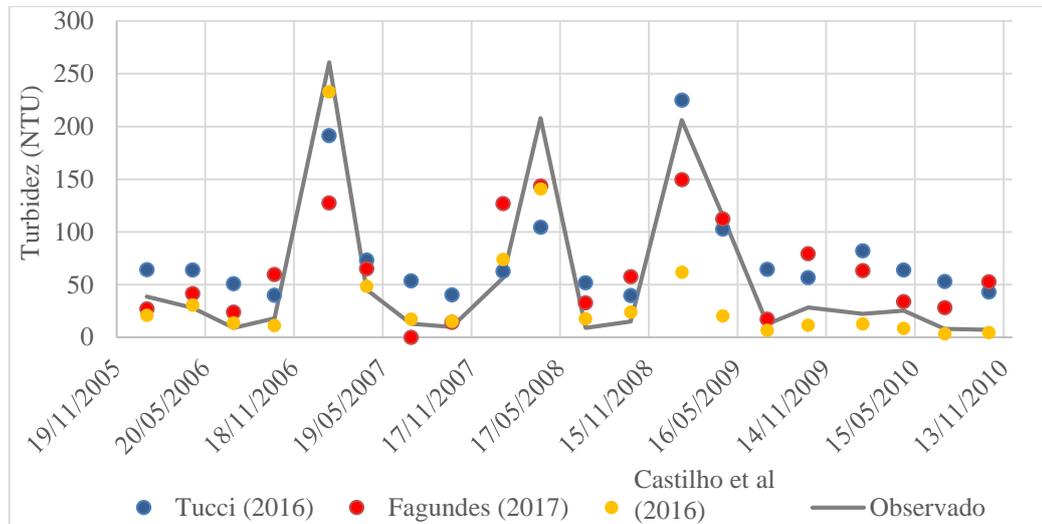
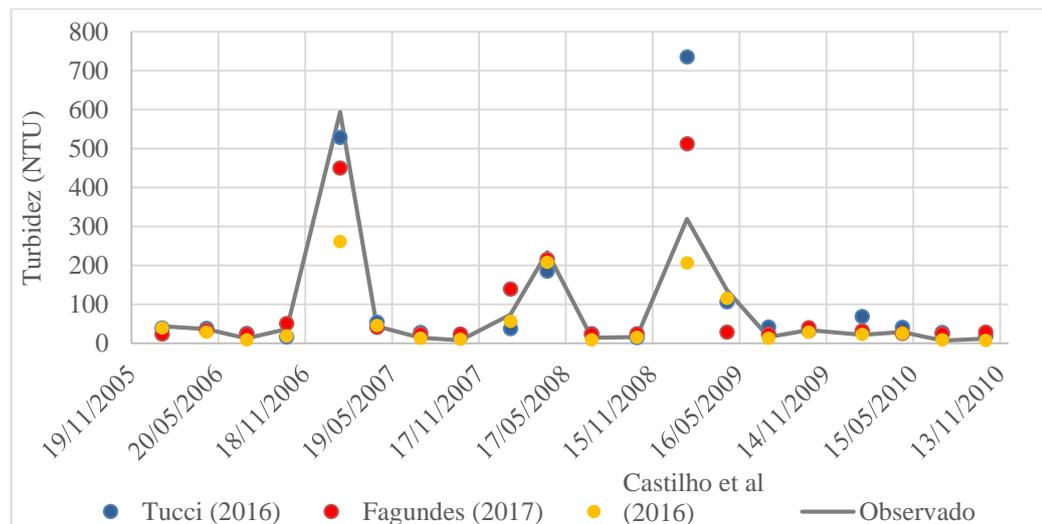


Figura 38. Resultados comparados para a estação RD045 (rio Doce).



Observa-se que nos afluentes Suaçuí Grande (Figura 40), Caratinga (Figura 43) e Manhuaçu (Figura 48) ocorrem picos de turbidez bastante elevada, acima de 1000 NTU. Nestes picos, os modelos tendem a subestimar a turbidez (exceto no rio Caratinga, na medição de janeiro de 2009). Já para a turbidez em faixas menores, aproximam-se dos valores observados, variando entre 20 a 70 NTU.

É possível notar, na estação RD053, a influência do rio Suaçuí Grande, uma vez que a turbidez aumenta em relação ao posto RD045 (primeira a montante). Da estação RD053 para a RD058 os valores não sofrem grande alteração, revelando que o rio Caratinga possivelmente não tem grande influência na turbidez do rio Doce.

Nas estações localizadas no rio Doce, percebe-se que os modelos de Tucci (2016) e Fagundes (2017) superestimam a turbidez em relação a observada (Figura 42, Figura 47 e Figura 50). Possivelmente isso se deva às vazões obtidas na simulação no MGB, que resultaram maiores do que as vazões medidas em parte do período analisado, como mostra a Figura 39. Nas estações RD053, RD058, RD059 e RD067 percebe-se que o modelo baseado na retenção de sedimentos se comporta bem no rio Doce, tendendo a subestimar a turbidez nesta última (Figura 50), que fica a jusante da UHE Aimorés.

Figura 39. Comparação de vazões medidas (ANA) e geradas (MGB-IPH) na estação RD053.

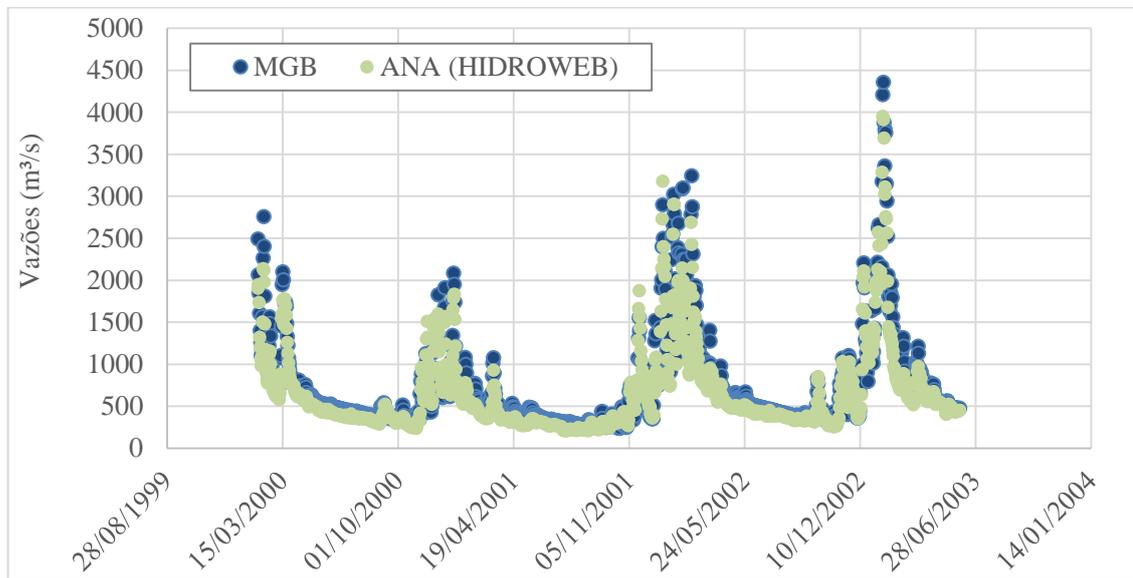


Figura 40. Resultados comparados para a estação RD049 (rio Suaçuí Grande).

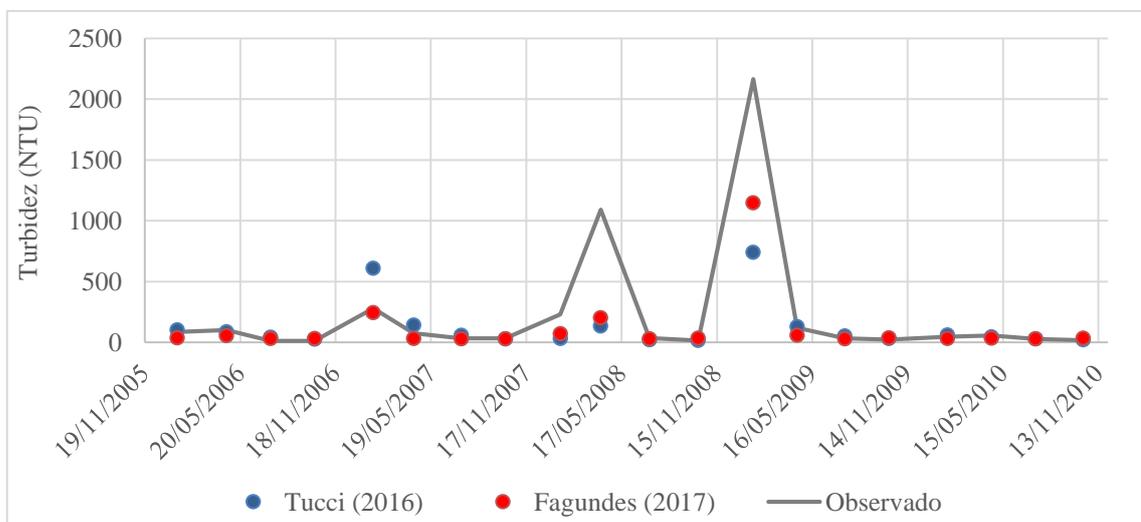


Figura 41. Resultados comparados para a estação RD049 (rio Suaçuí Grande) nas faixas mais baixas de turbidez.

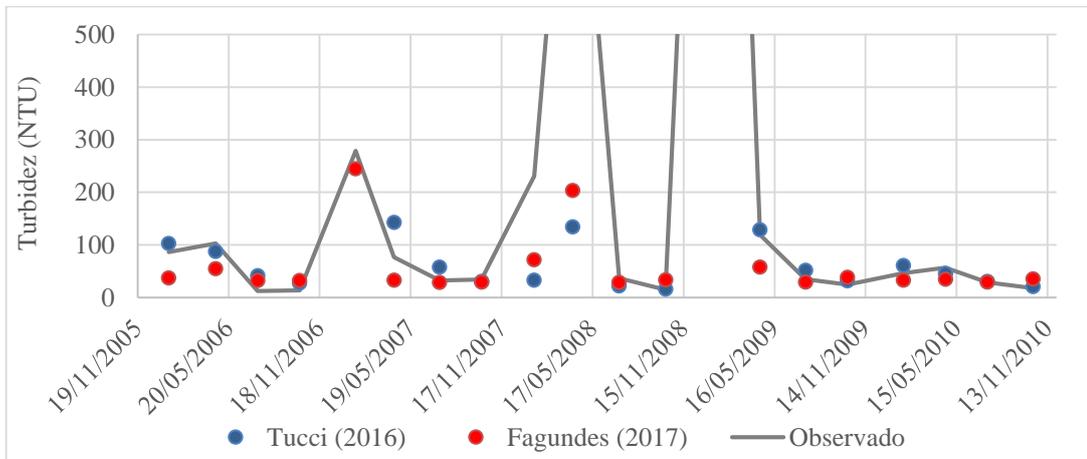


Figura 42. Resultados comparados para a estação RD053 (rio Doce).

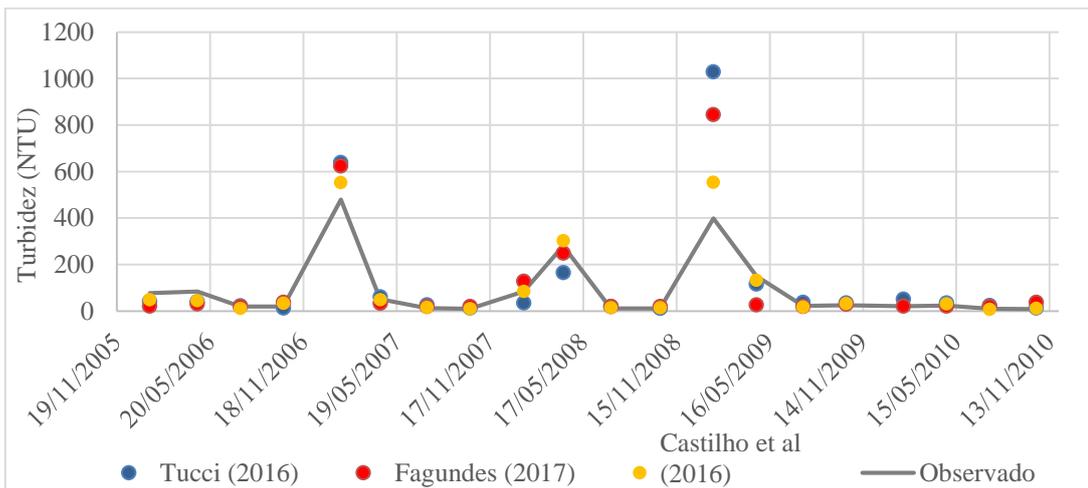


Figura 43. Resultados comparados para a estação RD057 (rio Caratinga).

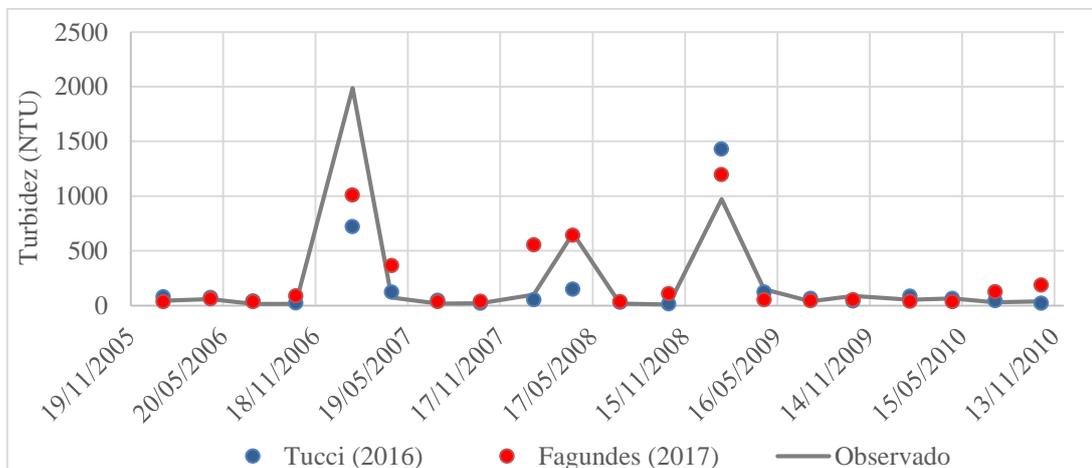


Figura 44. Resultados comparados para a estação RD057 (rio Caratinga) nas faixas mais baixas de turbidez.

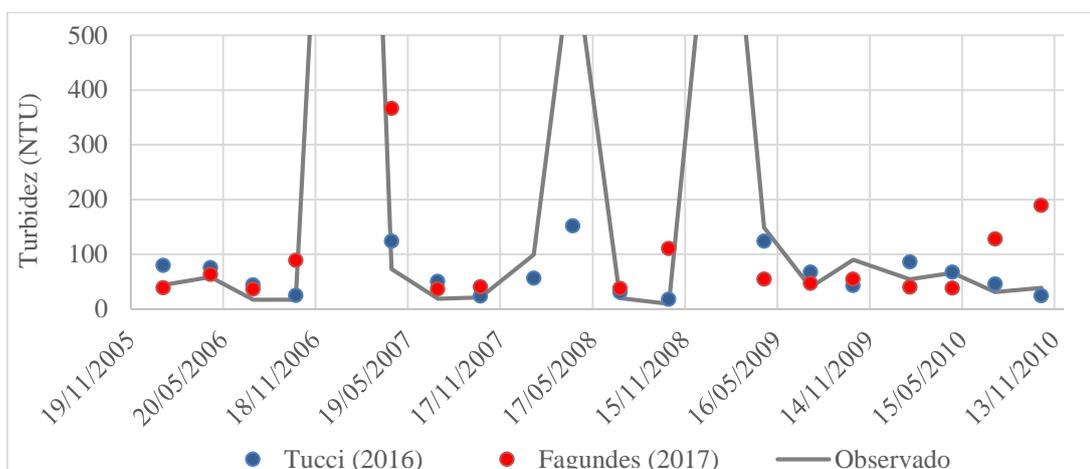


Figura 45. Resultados comparados para a estação RD058 (rio Doce).

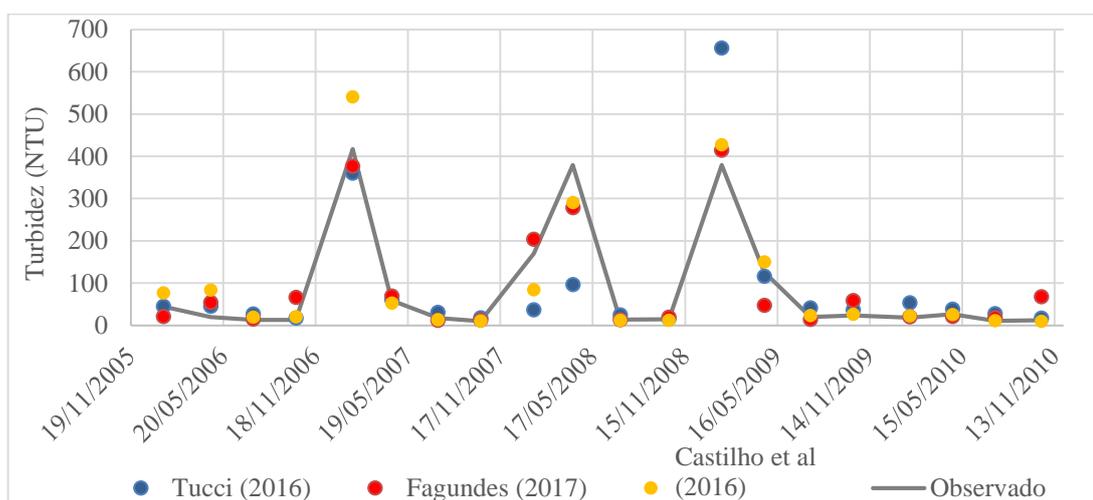


Figura 46. Resultados comparados para a estação RD059 (rio Doce).

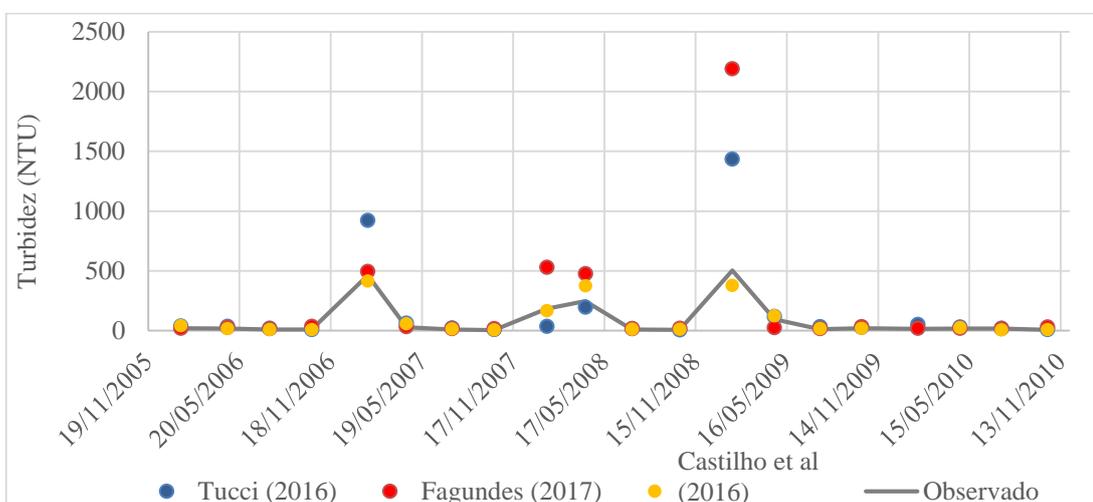


Figura 47. Resultados comparados para a estação RD059 (rio Doce) nas faixas mais baixas de turbidez.

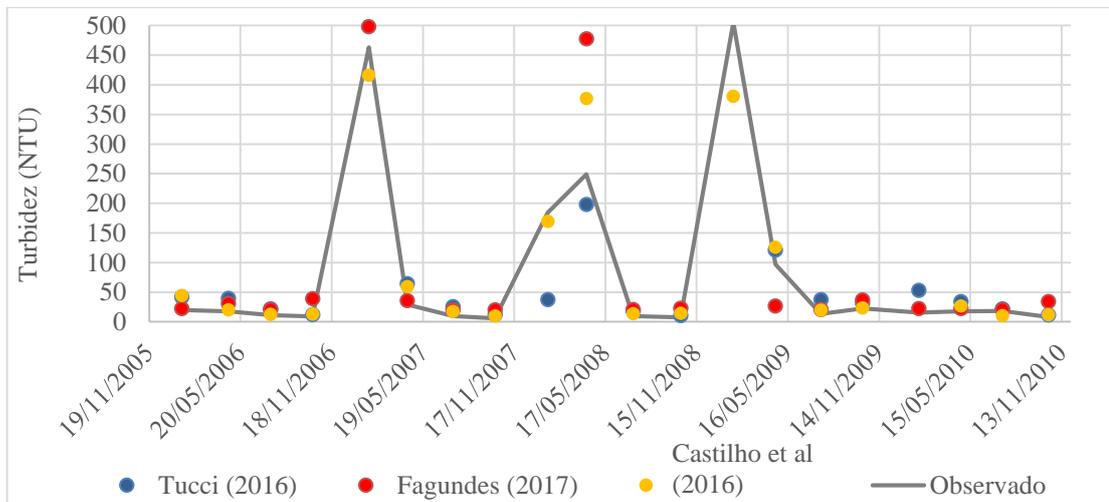


Figura 48. Resultados comparados para a estação RD065 (rio Manhuaçu).

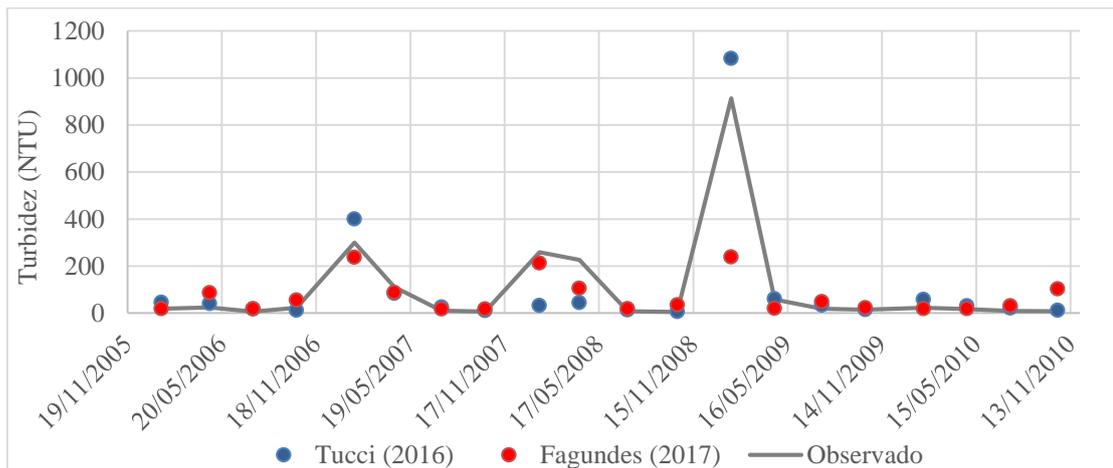


Figura 49. Resultados comparados para a estação RD067 (rio Doce).

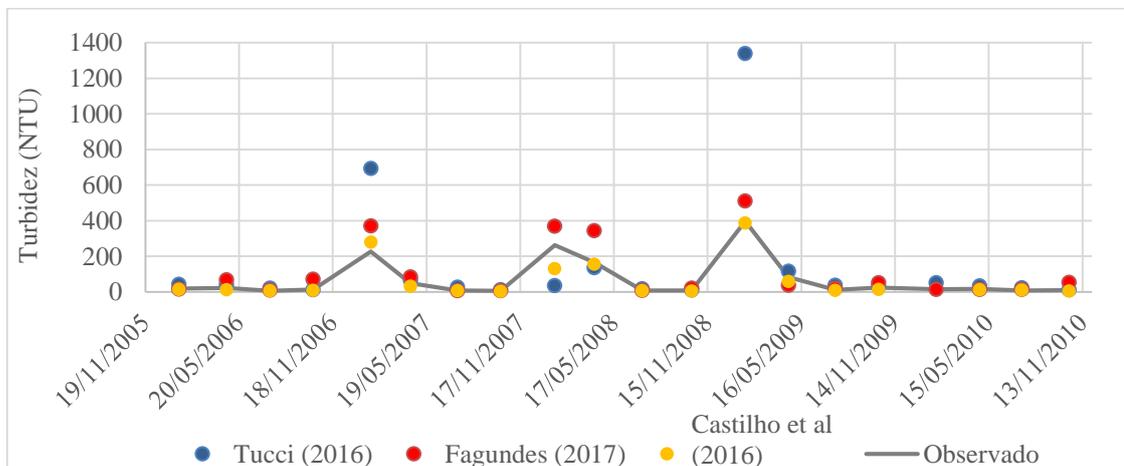
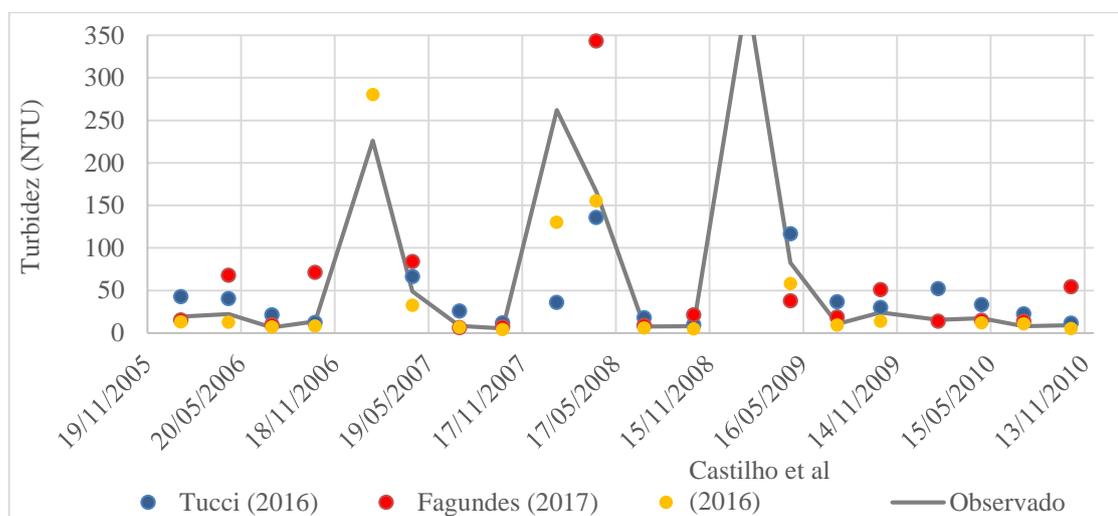


Figura 50. Resultados comparados para a estação RD067 (rio Doce) nas faixas mais baixas de turbidez.



Nos afluentes Guandu e Santa Joana, notam-se comportamentos diferentes entre os modelos, conforme mostram a Figura 51 e a Figura 53. No rio Santa Joana, o modelo de Fagundes (2017) apresenta um pico muito elevado em abril de 2010, o que não ocorre com o modelo de Tucci, indicando que pode ter ocorrido um erro no valor de concentração de sedimentos em suspensão.

Para o rio Doce, o modelo que considera a retenção de reservatórios apresenta um bom ajuste ao comportamento observado da turbidez, exceto na estação 56991400 (Figura 52), primeiro posto a jusante da UHE Mascarenhas, em que os valores são subestimados em relação aos de medição. Assim como nos casos citados anteriormente, deve-se considerar uma menor eficiência de retenção para esta usina.

Nas estações localizadas no rio Doce, percebe-se que o modelo de Tucci (2016) tende a subestimar a turbidez, enquanto o de Fagundes (2017) a superestima (por exemplo, na Figura 56). Nestes postos, o prognóstico baseado na modelagem hidrossedimentológica de grande escala possui um comportamento mais semelhante ao observado que os demais, exceto na estação 56994600, onde o modelo adaptado de Castilho *et al* (2016) apresenta melhor correlação. Este posto, porém, possui dados observados de turbidez apenas até o ano de 2009.

Figura 51. Resultados comparados para a estação 56991200 (rio Guandu).

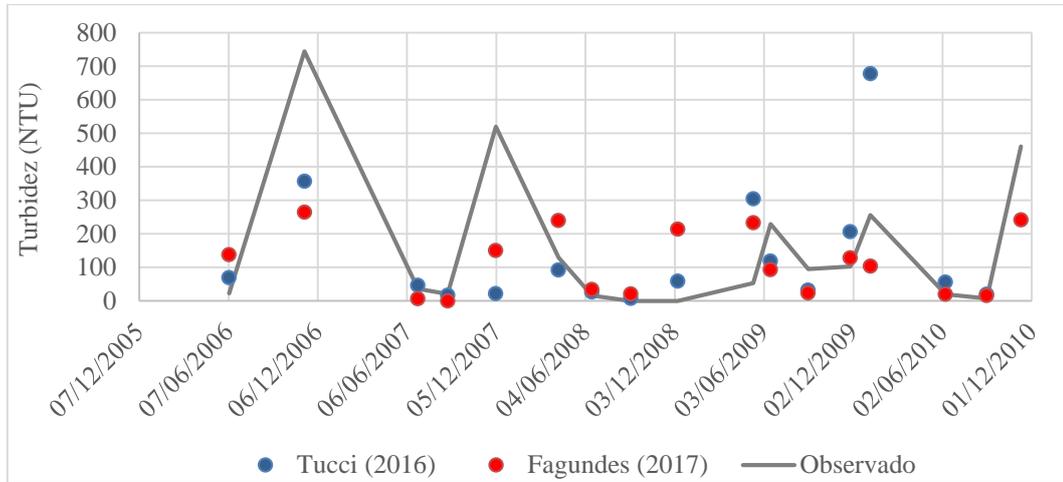


Figura 52. Resultados comparados para a estação 56991400 (rio Doce).

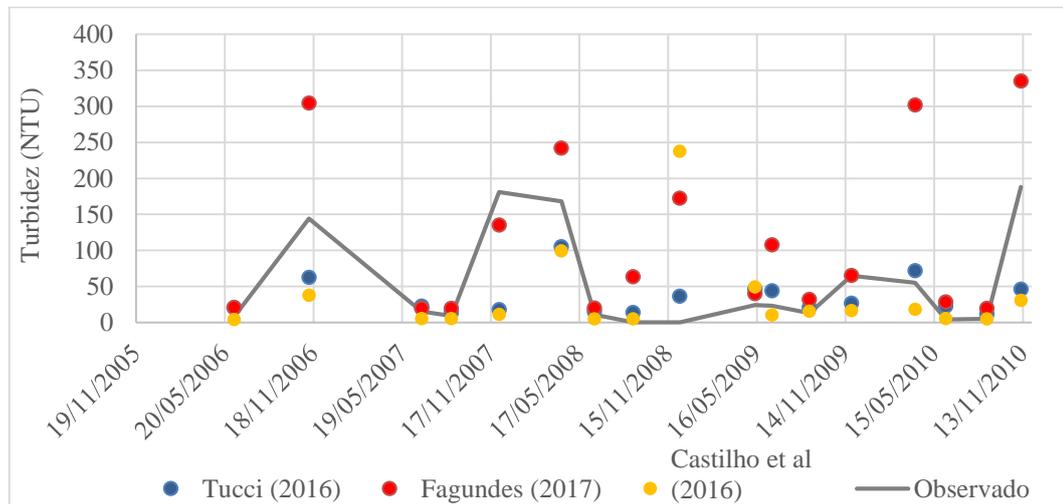


Figura 53. Resultados comparados para a estação 56993400 (rio Santa Joana).

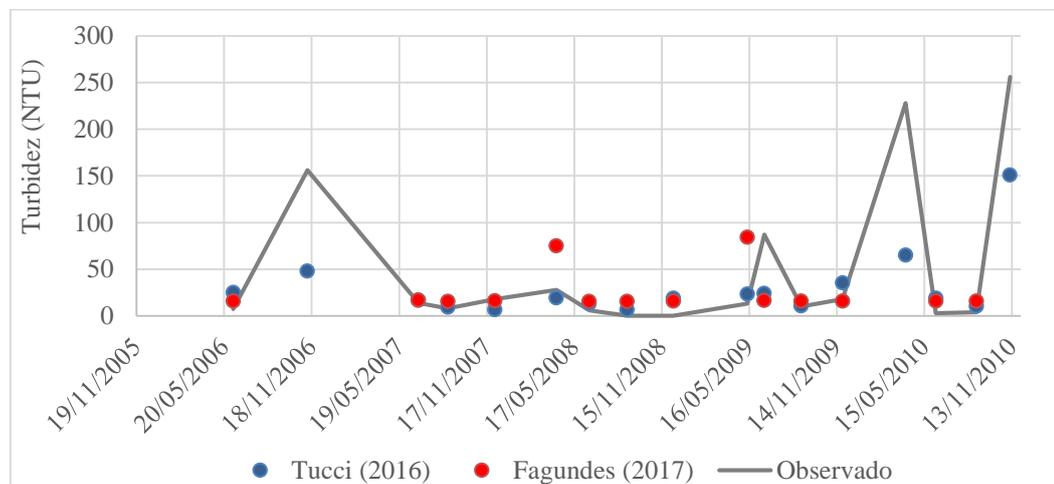


Figura 54. Resultados comparados para a estação 56994600 (rio Doce).

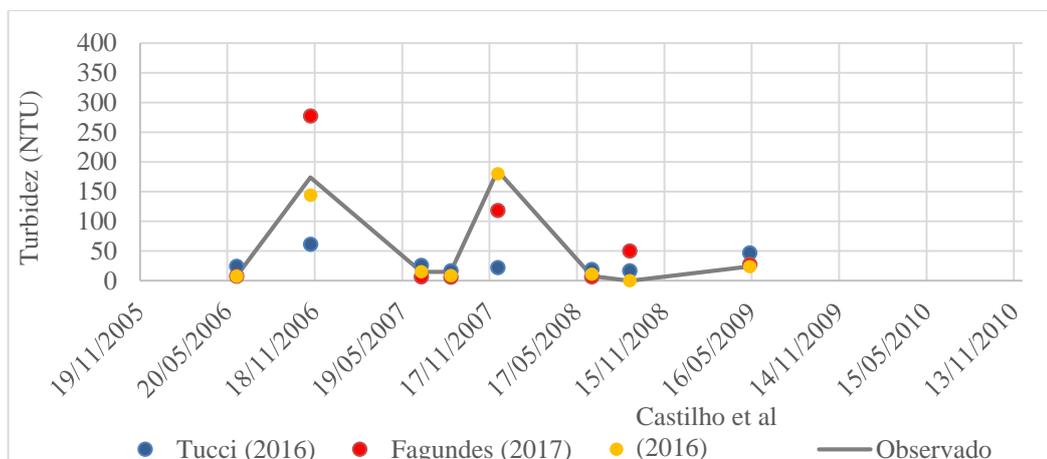


Figura 55. Resultados comparados para a estação 56994700 (rio Doce).

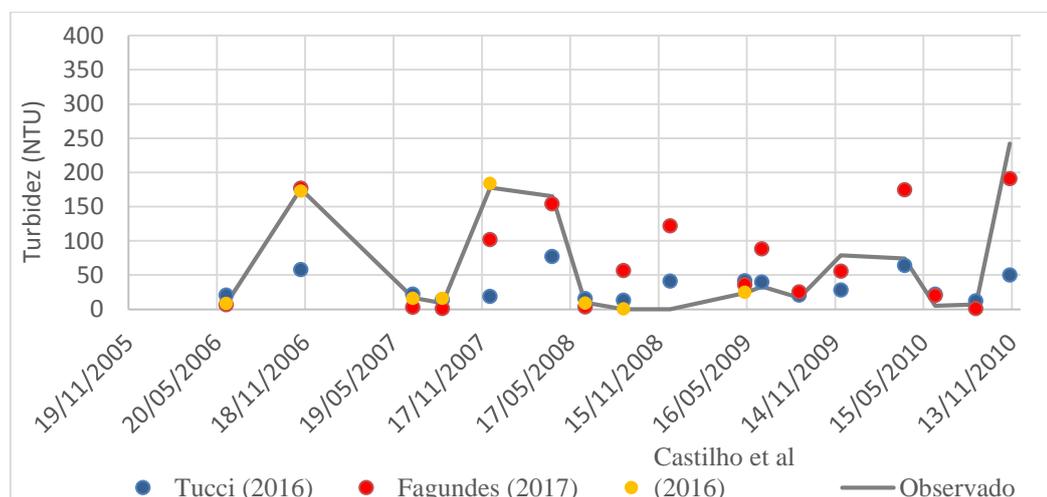
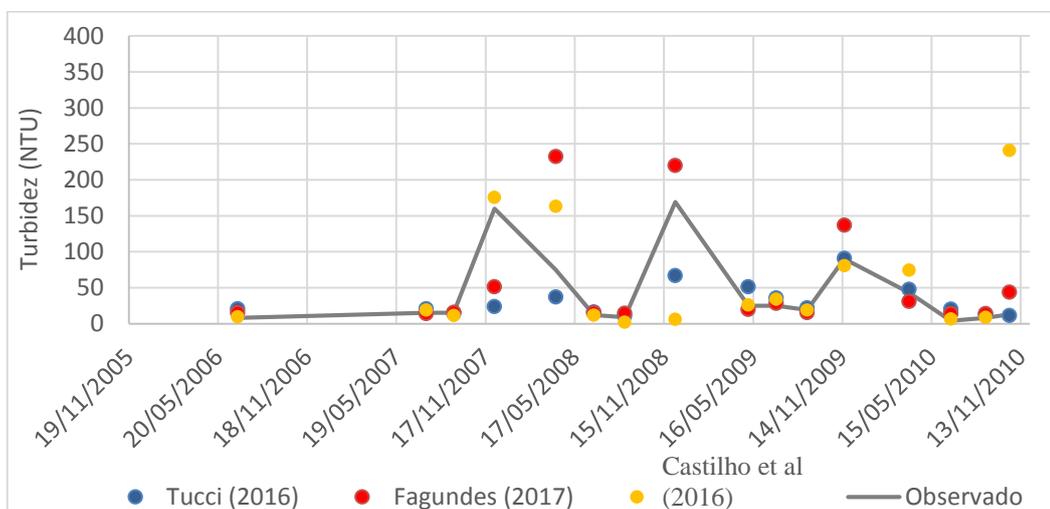


Figura 56. Resultados comparados para a estação 56998300 (rio Doce).



A partir dos resultados apresentados na Tabela 5, foi possível avaliar a direção do erro (viés), sua amplitude (REQM) e o índice de correlação linear entre a turbidez observada e a estimada por cada modelo, para cada estação individualmente. Analisando esta tabela, nota-se que há diferentes desempenhos dos modelos para cada região da bacia.

No Alto rio Doce, as menores amplitudes de erro são apresentadas por Tucci (2016), assim como as melhores correlações. O modelo adaptado de Castilho *et al* (2016) teve menos aplicações nesta região, mas teve desempenho bastante satisfatório, com baixas amplitudes de erro e correlações acima de 0,7.

A aplicação com base nos dados de Fagundes (2017) também apresentou resultados apreciáveis, destacando-se nas regiões do Médio e Baixo rio Doce, em que obteve correlações acima de 0,7, à exceção de dois postos. No rio Santa Joana, foi observado um valor inconsistente de concentração de sólidos suspensos, que acarretou em estatísticas que foram desconsideradas para este modelo.

Observa-se, ainda, que as menores correlações, para todos os modelos, ocorreram na região do Baixo rio Doce. Como mencionado anteriormente, esta área da bacia compreende a porção localizada no Espírito Santo, onde os dados utilizados para a calibração dos modelos eram mais escassos, implicando em menor precisão, o que pode ser constatado a partir destes resultados.

Tabela 5. Estatísticas de erro dos modelos aplicados de 2006 a 2010 (em negrito, o melhor valor entre os três modelos).

Região da Bacia	Estação	Rio	Erro médio (viés)			REQM <sup>A</sup> (amplitude do erro) - NTU			Correlação linear (r)		
			Tucci (2016)	Fagundes (2017)	Castilho <i>et al</i> (2016)	Tucci (2016)	Fagundes (2017)	Castilho <i>et al</i> (2016)	Tucci (2016)	Fagundes (2017)	Castilho <i>et al</i> (2016)
Alto rio Doce	RD009	do Carmo	<b>6,6</b>	33,6	-	<b>28,2</b>	47,6	-	0,84	<b>0,87</b>	-
	RD013	Piranga	-22,9	<b>-18,1</b>	-	<b>49,4</b>	51,6	-	0,91	<b>0,95</b>	-
	RD018	Casca	<b>-20,4</b>	57,4	-	<b>52,9</b>	168,2	-	<b>0,75</b>	0,55	-
	RD019	Doce	24,1	<b>18,0</b>	-	98,7	<b>60,7</b>	-	0,47	<b>0,65</b>	-
	RD021	Matipó	-4,2	<b>-0,5</b>	-	<b>16,0</b>	20,1	-	<b>0,73</b>	0,45	-
	RD023	Doce	10,4	13,8	<b>-4,5</b>	43,8	56,3	<b>25,7</b>	0,80	0,59	<b>0,92</b>
	RD026	Piracicaba	-24,9	<b>-9,4</b>	-	57,9	<b>38,8</b>	-	0,70	<b>0,80</b>	-
	RD027	Santa Bárbara	<b>6,2</b>	30,5	-	<b>12,6</b>	58,0	-	<b>0,83</b>	0,80	-
	RD029	Piracicaba	<b>3,1</b>	12,8	5,9	<b>16,3</b>	41,4	18,8	0,85	0,82	<b>0,96</b>
	RD032	Piracicaba	<b>-13,2</b>	13,7	-	<b>33,3</b>	68,3	-	<b>0,87</b>	0,80	-
	RD033	Doce	28,6	-12,5	<b>-3,8</b>	67,3	68,2	<b>59,1</b>	<b>0,98</b>	0,69	0,72
	RD034	Piracicaba	-15,2	<b>2,2</b>	-25,7	59,2	<b>46,9</b>	67,7	0,83	<b>0,84</b>	0,77
	Médio rio Doce	RD035	Doce	<b>-2,0</b>	29,5	-12,8	24,4	66,2	<b>23,0</b>	0,94	0,73
RD039		Santo Antônio	<b>-10,6</b>	-37,2	-	<b>91,7</b>	97,5	-	0,61	<b>0,74</b>	-
RD040		Corrente Grande	<b>-17,2</b>	-26,1	-	68,6	<b>64,4</b>	-	0,51	<b>0,87</b>	-
RD044		Doce	19,6	<b>6,1</b>	-18,0	43,6	46,0	<b>42,9</b>	<b>0,89</b>	0,83	0,87
RD045		Doce	18,9	<b>4,3</b>	-28,0	96,5	<b>61,7</b>	79,2	0,86	0,90	<b>0,95</b>
RD049		Suaçuí Grande	-103,9	<b>-113,0</b>	-	393,2	<b>304,8</b>	-	0,76	<b>0,94</b>	-
RD053		Doce	31,9	22,5	<b>8,7</b>	149,3	111,0	<b>41,1</b>	0,88	0,92	<b>0,99</b>
RD057		Caratinga	-58,6	<b>16,0</b>	-	322,1	<b>260,1</b>	-	0,74	<b>0,84</b>	-
RD058		Doce	-1,1	<b>0,8</b>	6,2	95,2	<b>38,5</b>	43,9	0,78	<b>0,96</b>	0,96
RD059		Doce	72,1	120,3	<b>2,7</b>	236,0	389,5	<b>43,1</b>	0,92	0,85	<b>0,96</b>
RD065		Manhuaçu	<b>-0,2</b>	-32,0	-	<b>79,8</b>	157,2	-	<b>0,95</b>	0,80	-
RD067		Doce	70,0	36,7	<b>-10,1</b>	241,5	66,7	<b>33,2</b>	0,83	<b>0,97</b>	0,95

Região da Bacia	Estação	Rio	Erro médio (viés)			REQM <sup>A</sup> (amplitude do erro) - NTU			Correlação linear (r)		
			Tucci (2016)	Fagundes (2017)	Castilho <i>et al</i> (2016)	Tucci (2016)	Fagundes (2017)	Castilho <i>et al</i> (2016)	Tucci (2016)	Fagundes (2017)	Castilho <i>et al</i> (2016)
Baixo rio Doce	56991200	Guandu	<b>14,7</b>	-45,8	-	219,4	<b>182,8</b>	-	0,53	<b>0,56</b>	-
	56991400	Doce	<b>-18,7</b>	59,5	-20,9	<b>60,6</b>	96,6	87,7	0,55	<b>0,74</b>	0,06
	56993400	Santa Joana	<b>-20,6</b>	1185455,7 <sup>B</sup>	-	<b>56,7</b>	4887007,9 <sup>B</sup>	-	<b>0,88</b>	0,56	-
	56994600	Doce	-24,4	9,1	<b>-4,7</b>	71,2	47,2	<b>11,0</b>	0,49	0,85	<b>0,99</b>
	56994700	Doce	-28,3	<b>10,3</b>	-35,9	72,5	<b>49,2</b>	76,3	0,59	<b>0,78</b>	0,52
	56998300	Doce	<b>-11,7</b>	12,0	12,4	<b>44,6</b>	51,7	74,0	0,57	<b>0,71</b>	0,33
Média <sup>C</sup>			<b>10.2</b>	<b>21.8</b>	<b>-8.6</b>	<b>88.1</b>	<b>82.5</b>	<b>48.4</b>	<b>0.79</b>	<b>0.81</b>	<b>0.79</b>

<sup>A</sup> REQM: Raiz quadrada do erro quadrático médio.

<sup>B</sup> Valores inconsistentes, desconsiderados na média das estatísticas.

<sup>C</sup> Média obtida apenas com as estações em que os três modelos foram aplicados.

## 5.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Dentre os três modelos analisados, o baseado na retenção de sedimentos em reservatórios é o que melhor se aproxima dos valores observados na maior parte das estações, indicando a possibilidade de calibração por meio de coeficientes de retenção. Foi o modelo que apresentou os melhores coeficientes de correlação (apenas três estações abaixo de 0,7), como é possível verificar na Tabela 5. De maneira geral, houve maior tendência a subestimar os valores de turbidez, porém, apresentou baixa amplitude de erro (em média, 49 NTU). Apresentou resultados superiores aos demais modelos na região do Médio rio Doce, obtendo correlações menores na porção da bacia localizada no estado do Espírito Santo. Como este modelo depende de dados observados, erros maiores nas estações do IEMA-ES são coerentes. Já no Alto rio Doce, seu desempenho foi semelhante ao de Tucci (2016) em termos de coeficiente de correlação, apresentando menores amplitudes de erro que este.

Entre suas desvantagens estão a necessidade de dados de turbidez a montante, que são dados mais difíceis de se obter, além de existirem poucas medições no ano. Para a vazão, pode-se aplicar modelos chuva-vazão (como o MGB-IPH), que implicam em certas imprecisões, ou utilizar dados de séries históricas, havendo sempre o risco de erro nas medições.

O modelo desenvolvido por Tucci (2016) obteve resultados satisfatórios, distanciando-se dos valores observados nos períodos em que ocorreram picos de turbidez. Assim como no modelo baseado na retenção de sedimentos, os níveis de turbidez foram subestimados na região do Baixo rio Doce, possivelmente causados pelos ajustes feitos com menor quantidade de dados (item 5.1). Obteve melhores correlações na região do Alto rio Doce (apenas uma inferior a 0,7), com amplitudes de erro menores em comparação aos resultados da aplicação do modelo de Fagundes (2017). Na região do Médio rio Doce, a partir da confluência com o rio Suaçuí Grande, resultaram as maiores amplitudes de erro (acima de 200 NTU).

Houve tendência a superestimar os valores nas estações localizadas no rio principal, no Alto e Médio rio Doce, o que pode ser explicado pelo fato de que as vazões resultantes da simulação no MGB-IPH são maiores que as observadas (como mostrado no item 5.4). Isso não implica em falha do modelo, mas sim dos seus dados de entrada. Além disso, o modelo empírico possui uma série de incertezas que devem ser consideradas, em que as principais são (TUCCI, 2016):

- pode subestimar os valores de turbidez altas quando ocorre o hidrograma de cheia (utiliza médias, não dados diretos);
- na análise da regressão, não se utilizou a defasagem esperada entre turbidez e vazão. Este tipo de defasagem pode melhorar a regressão;
- a correlação entre vazão e turbidez despreza outras variáveis explicativas para a turbidez;
- desconsidera efeitos dos reservatórios.

Este modelo depende de dados de vazão ou precipitação (estimativa de vazão por modelos como MGB-IPH) e de turbidez (para calibração do modelo), sendo os últimos mais difíceis de obter. Necessita de atualização constante da calibração (incremento de dados futuros) para manter a representatividade do ajuste, podendo piorar seu desempenho se baseado apenas em séries de dados muito defasadas em relação ao período no qual se quer obter a predição.

O modelo aplicado com os resultados de Fagundes (2017) gerou bons resultados ao longo de toda a bacia, destacando-se em relação aos demais na região do Baixo rio Doce, onde todas as correlações foram superiores a 0,5. Tende a superestimar a turbidez em praticamente toda a bacia, principalmente nas estações localizadas no rio principal.

Desconsiderando-se a estação no rio Santa Joana (56994600), sua amplitude de erro média foi em torno de 97 NTU. As maiores amplitudes se concentraram no Médio rio Doce (superiores a 110 NTU), mas, junto com o modelo da Castilho *et al* (2016), foi o que obteve as melhores correlações nesta região (acima de 0,73).

Este modelo depende apenas de dados de precipitação, dados de entrada para MGB-IPH, que são de mais fácil obtenção e monitoramento. Diferentemente dos demais, estima a concentração de sólidos suspensos na bacia, o que, por si só, já permite interpretações sobre o nível de sedimentos na bacia, possibilitando inferências para a tomada de decisão quanto a captações, por exemplo. Desse modo, não é obrigatório o uso de dados de turbidez, a menos que o interesse seja o resultado específico de níveis de turbidez no rio. Além disso, é capaz de gerar resultados em qualquer ponto da bacia, não necessitando sempre de estações para obter as estimativas.

A Tabela 6 mostra um resumo das estatísticas de erro resultantes da aplicação dos modelos de forma geral, enquanto a Tabela 7 os mostra por região da bacia. A Tabela 8 apresenta uma relação de vantagens e desvantagens de cada modelo prognóstico.

Tabela 6. Resumo das estatísticas de erro.

PARÂMETRO	TUCCI (2016)	FAGUNDES (2017)	Castilho <i>et al</i> (2016)
Correlação linear média (r)	0,79	0,81	0,79
Amplitude de erro média (NTU)	88,1	82,5	48,4
Viés	Superestima	Superestima	Subestima
Região da bacia com melhor desempenho	Alto Doce	Médio e Baixo Doce	Alto e Médio Doce

Tabela 7. Resumo das estatísticas de erro por região da bacia hidrográfica.

Região da bacia	Parâmetro	Modelos prognósticos		
		TUCCI (2016)	FAGUNDES (2017)	Castilho <i>et al</i> (2016)
Alto Doce	Correlação linear média (r)	0,87	0,73	0,84
	Amplitude de erro média	46,6	53,2	42,8
	Viés	SUPERESTIMA	SUPERESTIMA	SUBESTIMA
Médio Doce	Correlação linear média (r)	0,87	0,88	0,95
	Amplitude de erro média	126,6	111,4	43,8
	Viés	SUPERESTIMA	SUPERESTIMA	SUBESTIMA
Baixo Doce	Correlação linear média (r)	0,55	0,77	0,47
	Amplitude de erro média	62,2	61,2	62,2
	Viés	SUBESTIMA	SUPERESTIMA	SUBESTIMA

Tabela 8. Tabela comparativa entre os modelos aplicados.

MODELO		PRECISÃO DOS RESULTADOS	APLICAÇÃO DO MODELO
FAGUNDES (2017)	VANTAGEM	Boa precisão para valores baixos	Necessita de poucos dados, em geral de fácil obtenção; gera dados em qualquer ponto da bacia
	DESVANTAGEM	Baixa precisão nos picos	Necessário o conhecimento do software (MGB-SED)
TUCCI (2016)	VANTAGEM	Boa precisão para valores baixos	Modelo empírico de fácil aplicação
	DESVANTAGEM	Baixa precisão nos picos	Necessidade de dados de turbidez, que são de difícil obtenção
CASTILHO <i>et al</i> (2016)	VANTAGEM	Boa precisão para quaisquer faixas de turbidez; menor amplitude de erro que os demais modelos	Fácil aplicação, utiliza apenas o princípio de diluição e retenção de reservatórios
	DESVANTAGEM	Pequena quantidade de dados afeta o modelo, como no Baixo rio Doce	Necessidade de dados de turbidez, que são de difícil obtenção

## 6 CONCLUSÕES

Após aplicação e análise dos três modelos prognósticos, pode-se concluir que todos apresentam resultados satisfatórios como preditores de turbidez para bacia hidrográfica do rio Doce, tanto em afluentes quanto no rio principal, considerando-se um erro aceitável de até cerca de 40%. Aponta-se, assim, a conveniência de utilizar estes modelos para prognósticos de turbidez na bacia. Cada modelo apresenta melhor desempenho em determinada região, podendo ser um fator a considerar na escolha da aplicação a ser utilizada.

A aplicação da correlação de Tucci (2016) mostrou-se com melhores correlações para o Alto rio Doce que a de Fagundes (2017), enquanto o adaptado de Castilho et al (2016) apresentou correlações maiores que as demais no Alto e no Médio Doce, além de apresentar as menores amplitudes de erro em toda a região. Este modelo destaca-se em relação aos demais, pois engloba não somente manipulação de dados, como também o conceito de retenção de sedimentos em reservatórios, que pode ser significativo. Ainda, possui o melhor desempenho nos picos de turbidez. Cabe ressaltar que o modelo desenvolvido por Tucci (2016) utiliza as médias para as correlações, o que amortiza os picos de turbidez, devendo-se considerar a aplicação utilizando os dados diretos de medição.

Mesmo utilizando dados de mais difícil obtenção, os modelos de Tucci (2016) e o modificado de Castilho *et al.* (2016) são mais simples de serem aplicados. Contudo, o de Fagundes (2017) é o que permite inferências com menor necessidade de dados que os demais (menos dados de sedimentos em tempo real), o que é interessante sabendo-se que informações de medição de turbidez são mais complexas de se obter. Como o modelo apresentou resultados satisfatórios em todos os trechos, dentro da faixa de 30% de erro, seu uso pode ser mais indicado pela facilidade de aquisição de informação.

A escolha pelo uso de cada modelo dependerá de fatores como

- disponibilidade dos dados de entrada necessários para aplicação do modelo;
- região de interesse na bacia hidrográfica;
- erro aceitável no prognóstico;
- conhecimento dos softwares de modelagem hidrossedimentológica.

## 7 RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com base nas metodologias analisadas, deve-se considerar as incertezas relativas a cada modelo antes da definição de uso, procurando diminuí-las quando possível. No caso do modelo desenvolvido por Tucci (2016), por exemplo, a regressão deve ser atualizada sistematicamente com a obtenção de dados, permitindo a melhoria das correlações. No modelo modificado de Castilho *et al* (2016), é importante uma análise correta da eficiência de retenção dos reservatórios das usinas, caso contrário podem haver erros significativos no modelo.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, ocorreram certas limitações. É possível perceber que os modelos possuem desempenhos diferentes ao longo de toda a bacia, sem que se possa afirmar a causa desta diferença. Um estudo mais aplicado a cada região, com maior número de estações analisadas e maior detalhamento, poderia solucionar esses questionamentos.

Neste estudo, desconsiderou-se a separação entre período chuvoso e período seco, devido a limitação no número de dados. Entretanto, modelos como o de Tucci (2016) e de Castilho *et al* (2016), que estão diretamente ligados à vazão, podem apresentar comportamentos diferentes entre períodos de cheia e de estiagem. Ainda, o modelo de Fagundes (2017), com calibração baseada em dados de reflectância, também pode apresentar comportamentos diferentes, uma vez que estes dados podem conter erros em períodos de estiagem. Como na região em questão existe um regime sazonal de chuvas, esta análise em separado destes períodos pode gerar resultados mais precisos das aplicações.

Após o desastre de Mariana, muitas cidades tiveram de interromper sua captação de água para abastecimento no rio Doce. Esta foi a motivação do desenvolvimento do modelo de Castilho *et al* (2016), parte do sistema de alerta de eventos críticos, a fim de alertar os usuários quando pudesse haver a necessidade de interrupção da captação. Contudo, fica a questão de quando as águas do rio Doce voltarão ao seu estado natural, com valores regulares de turbidez, sendo um estudo interessante que poderia ser realizado utilizando dados mais recentes nas aplicações destes modelos (pós rompimento), exigindo também uma análise mais aprimorada.

Para uma aplicação após o rompimento da barragem, seria interessante a utilização do modelo de Fagundes (2017), uma vez que, em períodos de cheia, os níveis de turbidez atingem níveis ainda acima do normal, os quais o modelo baseado na correlação com a vazão pode subestimar.

## 8 REFERÊNCIAS

ANA, 2015. Agência Nacional de Águas. HidroSat – Monitoramento Hidrológico por satélite. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/SaibaMais/Sobre>>. Último acesso em 19 de junho de 2017.

ANA, 2016. Agência Nacional de Águas. Monitoramento especial do rio Doce. Disponível em: < <http://www2.ana.gov.br/Paginas/Riodoce/defaultxp.aspx>>. Último acesso em outubro de 2017.

ANA, 2017. Agência Nacional de Águas. HidroWeb – Sistema de Informações hidrológicas. Disponível em: < <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Último acesso em outubro de 2017.

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

BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; GUYOT, J. (2016). **Modelagem computacional da dinâmica de sedimentos em suspensão na bacia do rio Madeira**. Anais do XII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Velho (RO), 2016.

BURK, S. (1985). *Methods of computing sedimentation in lakes and reservoirs*. *Internacional Hydrological Programme, IHP – II Project A. 2.6.1 Panel*. 1985.

CARVALHO, J.C; COCHONNEAU, G.; PISCOYA, R. C. C. C.; MARTINEZ, J. M.; SOUZA, E. A.; ANTUNES, M. A.; TOSETTO, D. V.; OLIVEIRA, E.; LOPES, W. T. A.; GUIMARÃES, V. S. (2015). **HidroSat – Sistema integrado para gerenciamento, processamento e difusão de dados hidrológicos obtidos a partir de monitoramento por satélites**. Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Brasília, Nov. 2015.

CARVALHO, N. O. (2008). **Hidrossedimentologia prática**. 2ª edição, ver., atual e ampliada. Rio de Janeiro, 2008.

CASTILHO, A. S.; MOTTA, B. G; MARTINS, L. K. L. A. (2016). **Modelo de previsão de turbidez do rio Doce após a ruptura da barragem de rejeitos**. Anais do XII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Velho (RO), 2016.

COLLISCHONN, W. (2001). **Simulação Hidrológica em grandes bacias**. Tese de Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

FAGUNDES, H. O. (2017). **Modelagem hidrossedimentológica de grandes bacias com apoio de dados *in situ* e sensoriamento remoto**. Plano de dissertação de mestrado. IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS. Porto Alegre, abril de 2017.

FAGUNDES, H. O.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C. **Simulação hidrossedimentológica preliminar na bacia do rio Doce com o modelo MGB-SED**. Anais do II Congresso Internacional de Hidrossedimentologia. Foz do Iguaçu, junho de 2017.

FAGUNDES, H. O.; FASSONI-ANDRADE, A. C.; PAIVA, R. C. D. **Análise dos sedimentos em suspensão na bacia hidrográfica do rio Doce com imagens de satélite**. Anais do II Congresso Internacional de Hidrossedimentologia. Foz do Iguaçu, junho de 2017.

IGAM, 2017. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Portal Info Hidro – Informações de recursos hídricos. **Dados de Monitoramento de Qualidade**. Disponível em: <<http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/serie-historica>>. Último acesso em 7 de outubro de 2017.

LIMA, J. E. F. W. *et al* (2011). **Relação entre turbidez e concentração de sedimentos em suspensão em rios de uma bacia agrícola típica do cerrado: o caso da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim, DF**. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Maceió (AL), 2011.

MAHMOOD, K. (1987). *Reservoir Sedimentation – Impact, extent and mitigation*. World Bank Tech. Paper n° 71. Washington, DC. 1987

MENEZES, P. H. B. J. (2013). **Estudo da dinâmica espaço-temporal do fluxo de sedimentos a partir das propriedades ópticas das águas no reservatório de Três Marias-MG**. Tese de

doutorado em Geociências Aplicadas – Instituto de Geociências. Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. (2003). *A review of erosion and sediment transport models*. *Environmental Modelling and Software*, v. 18, 2003.

MORRIS, G.L.; FAN, J. (1998). *Reservoir sedimentation handbook*. McGraw-Hill, New York. 1998.

PIRH (2010). **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce: Relatório Final-Volume I**. Consórcio Ecoplan-Lume, 2010.

PISCOYA, R. C. C. C.; MARTINEZ, J. M.; COCHONNEAU, G.; LOPES, W. T. A.; CARVALHO, J.C; OLIVEIRA, E. (2016). **Monitoramento automatizado da concentração de sedimentos em suspensão em rios por meio de satélites da Agência Nacional de Águas: ferramentas computacionais e aplicações**. Anais do XII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Velho (RO), 2016.

RUDORFF, C. M.; ARRAUT, E. M.; BARBOSA, C. C. F.; CARVALHO, J. C.; FILHO, W. P.; NOVO, E. M. L. M. (2005). Avaliação de algoritmos bio-óticos em massas d'água amazônicas. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - Goiânia, Brasil. São José dos Campos: INPE, 2005. p 431-438.

RYMSZEWICZ, A.; O'SULLIVAN, J.J; BRUEN, M; TURNER, J.N.; LAWLER, D.M.; CONROY, E.; KELLY-QUINN, M. (2017). *Measurement differences between turbidity instruments, and their implications for suspended sediment concentration and load calculations: A sensor inter-comparison study*. *Journal of Environmental Management*. 2017.

SACE – Sistema de Alerta de Eventos Críticos. CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Disponível em <[http://www.cprm.gov.br/sace/index\\_bacias\\_monitoradas.php#](http://www.cprm.gov.br/sace/index_bacias_monitoradas.php#)>. Último acesso em agosto de 2017.

SANTOS, B. B; ESTIGONI, M. V.; MIRANDA, R. B.; BOTELHO, D. A; MAUAD, F. F. (2014). **Estudo da relação entre a concentração de sedimentos em suspensão e turbidez no reservatório de Mogi-Guaçu (SP)**. Anais do XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos. João Pessoa (PB), 2014.

SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION (1963). *Determination of fluvial sediment discharge*. Inter-Agency Committee on Water Resources. Report nº14. Washington, DC. 1963.

TEIXEIRA, E. C.; SENHORELO, A. P. (2000). **Avaliação de correlação entre turbidez e concentração de sólidos suspensos em bacias hidrográficas com uso e ocupação diferenciada**. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre. 2000.

TUCCI, C. E. M. (2005). **Modelos hidrológicos**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, Porto Alegre, 2005.

TUCCI, C. E. M. (2016). **Prognóstico de turbidez no rio Doce**. Rhama Consultoria, Pesquisa e Treinamento Ambiental. Porto Alegre, novembro de 2016.

VANONI, V. A. (1977). *Sedimentation Engineering*. Edition by ASCE. Nova York. 1977.

WALSKI, T.; MINNICH, K.; SHERMAN, C.; STRAUSE, L.; WHITMAN, B. (2016). *Can there be a Law of Conservation of Turbidity*. XVIII International Conference on Water Distribution Systems Analysis. Cartagena, Colombia, julho de 2016.

YANG, C. T. (1996). *Sediment transport: Theory and practice*. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, McGraw-Hill, New York ~reprinted by Krieger, Malabar, Fla, 1996.

## ANEXOS

A. VALORES DE R<sup>2</sup> PARA OS MODELOS DE TUCCI E FAGUNDESTabela 9. Valores de R<sup>2</sup> encontrados nos ajustes dos modelos de Tucci e Fagundes.

Estação Turbidez	RIO	R <sup>2</sup>	
		TUCCI	FAGUNDES
56991200	GUANDU	0,75	0,49
56991400	DOCE	0,54	0,93
56993400	SANTA JOANA	0,54	0,34
56994600	DOCE	0,46	0,85
56994700	DOCE	0,55	0,65
56998300	DOCE	0,76	0,73
RD009	DO CARMO	0,44	0,56
RD013	PIRANGA	0,84	0,65
RD018	CASCA	0,62	0,69
RD019	DOCE	0,92	0,69
RD021	MATIPÓ	0,70	0,26
RD023	DOCE	0,83	0,55
RD026	PIRACICABA	0,28	0,67
RD027	SANTA BÁRBARA	0,36	0,48
RD029	PIRACICABA	0,66	0,58
RD032	PIRACICABA	0,56	0,72
RD033	DOCE	0,82	0,41
RD034	PIRACICABA	0,58	0,70
RD035	DOCE	0,69	0,64
RD039	SANTO ANTÔNIO	0,75	0,44
RD040	CORRENTE GDE	0,69	0,43
RD044	DOCE	0,35	0,56
RD045	DOCE	0,88	0,51
RD049	SUAÇUÍ GDE	0,80	0,71
RD053	DOCE	0,84	0,64
RD057	CARATINGA	0,83	0,57
RD058	DOCE	0,87	0,85
RD059	DOCE	0,90	0,64
RD065	MANHUAÇU	0,81	0,46
RD067	DOCE	0,87	0,67

## B. CORRELAÇÕES OBTIDAS ENTRE TURBIDEZ E VAZÃO

Aqui são apresentadas as correlações obtidas para os postos distribuídos na bacia. Nos gráficos de ajuste, os pontos azuis são a média dos intervalos de turbidez dos valores dos pontos em vermelho. O ajuste da curva de regressão é realizado para a média dos intervalos.

Figura 57. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD009 (rio do Carmo) no município de Mariana (MG).

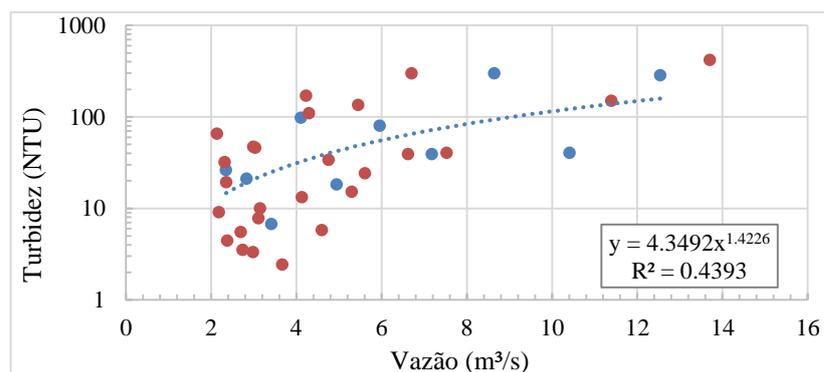


Figura 58. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD013 (rio Piranga) no município de Ponte Nova (MG).

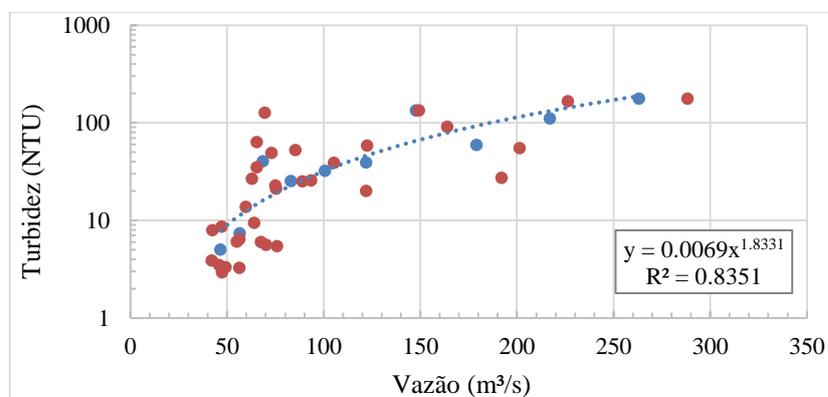


Figura 59. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD018 (rio Casca) no município de Rio Casca (MG).

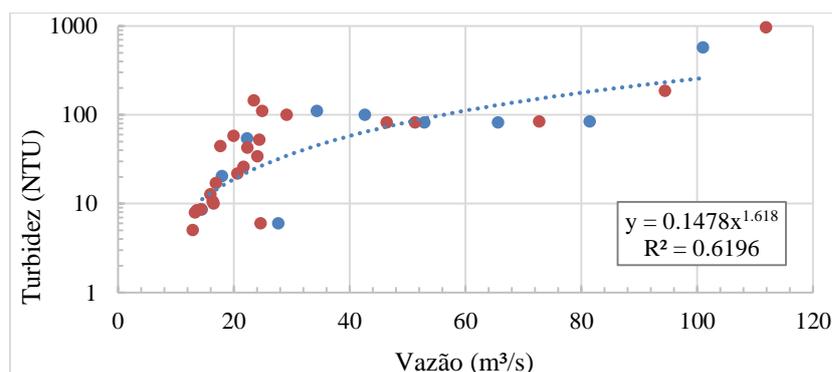


Figura 60. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD023 (rio Doce) no município de Mariléia (MG).

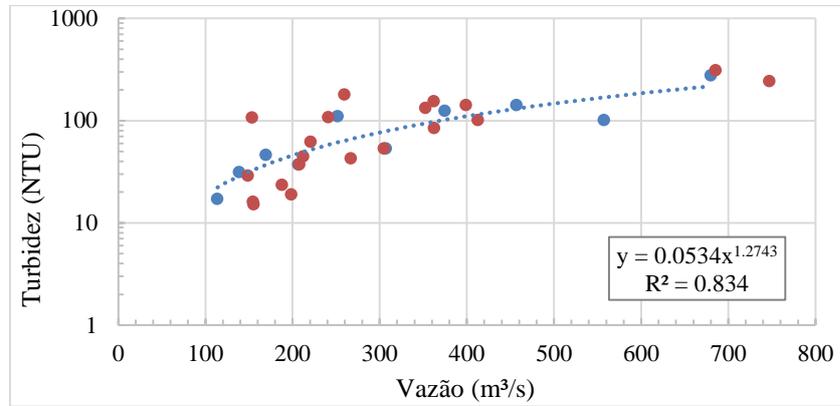


Figura 61. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD026 (rio Piracicaba) no município de João Monlevade (MG)

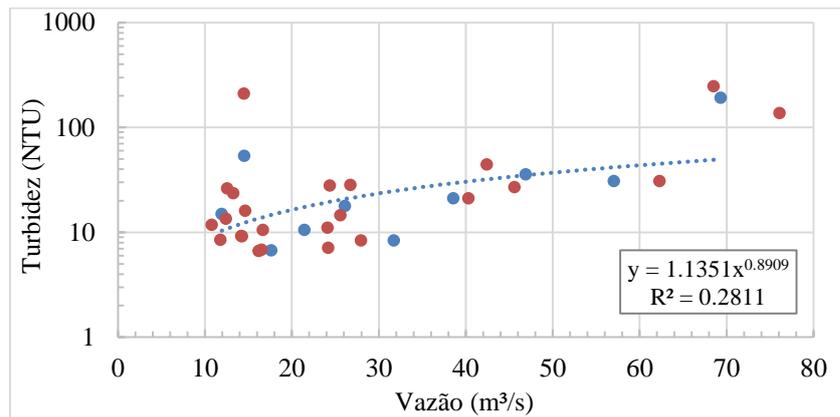


Figura 62. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD027 (rio Santa Bárbara) no município de São Gonçalo do Rio Abaixo (MG)

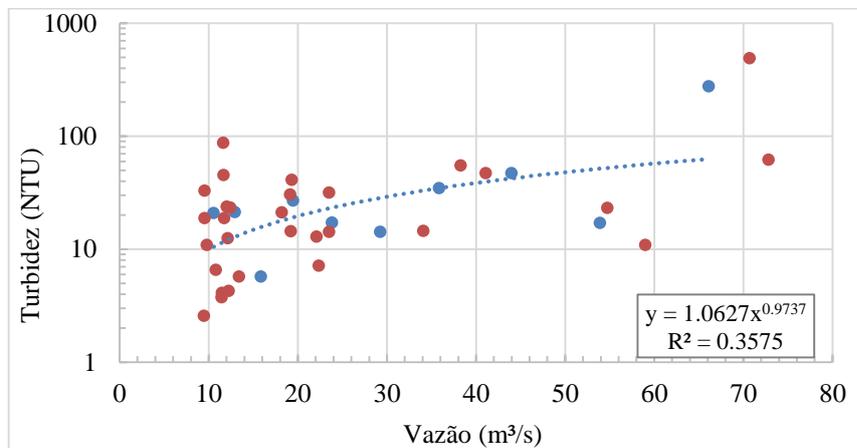


Figura 63. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD029 (rio Piracicaba) no município de Nova Era (MG)

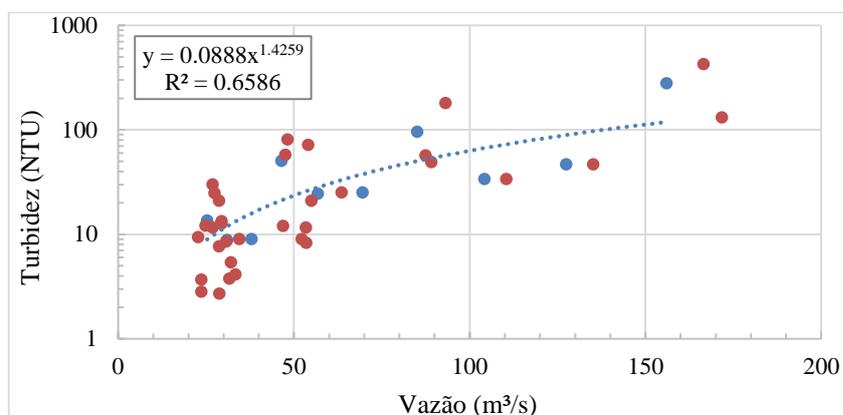


Figura 64. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD032 (rio Piracicaba) no município de Antônio Dias (MG).

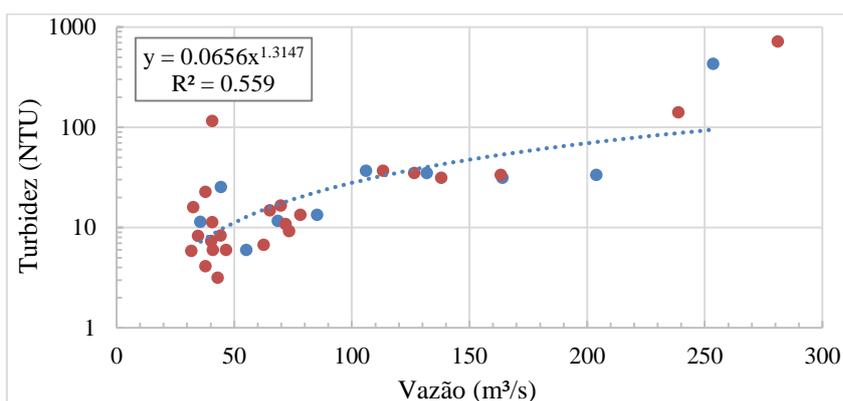


Figura 65. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD034 (rio Piracicaba) no município de Coronel Fabriciano (MG).

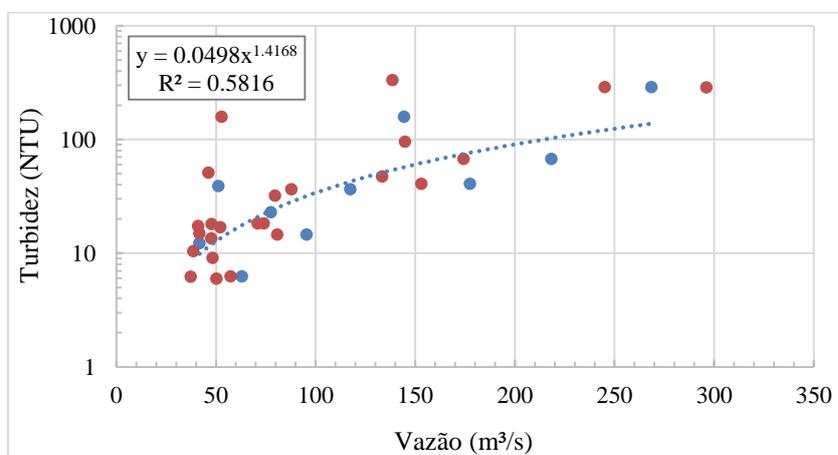


Figura 66. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD035 (rio Doce) no município de Ipatinga (MG).

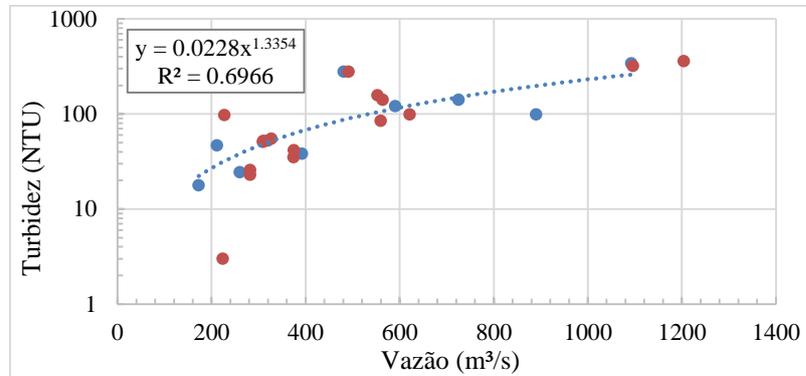


Figura 67. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD039 (rio Santo Antônio) no município de Naque (MG)

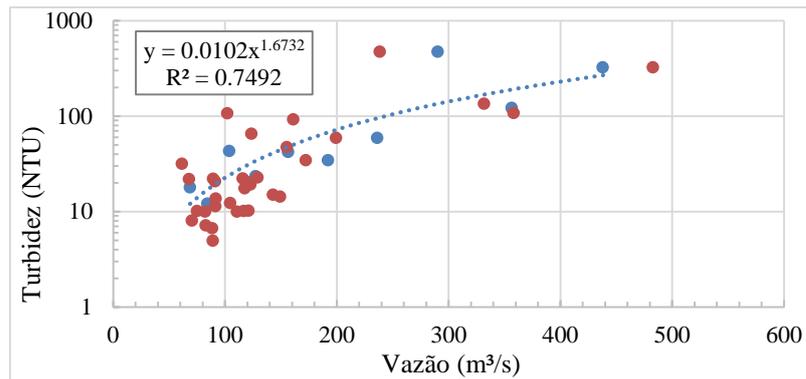


Figura 68. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD044 (rio Doce) no município de Governador Valadares (MG)

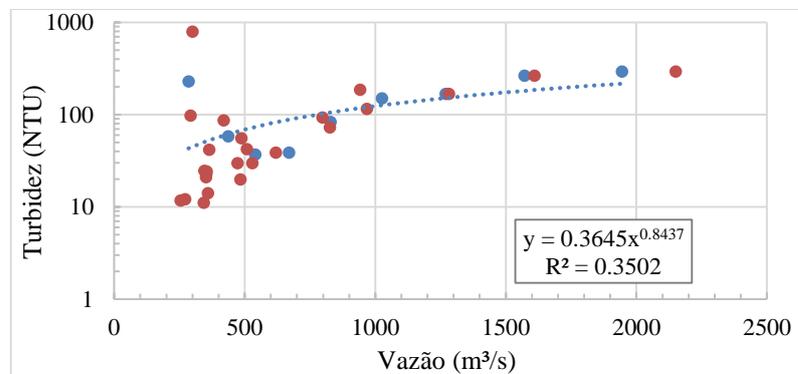


Figura 69. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD045 (rio Doce) no município de Governador Valadares (MG)

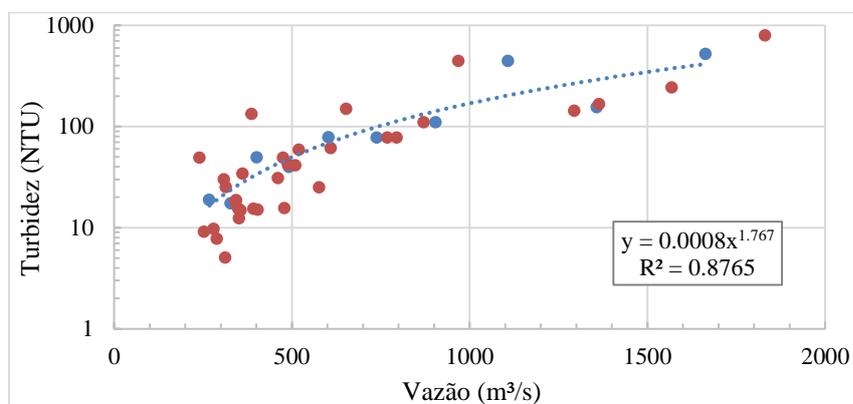


Figura 70. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD049 (rio Suaçuá Grande) no município de Frei Inocência (MG)

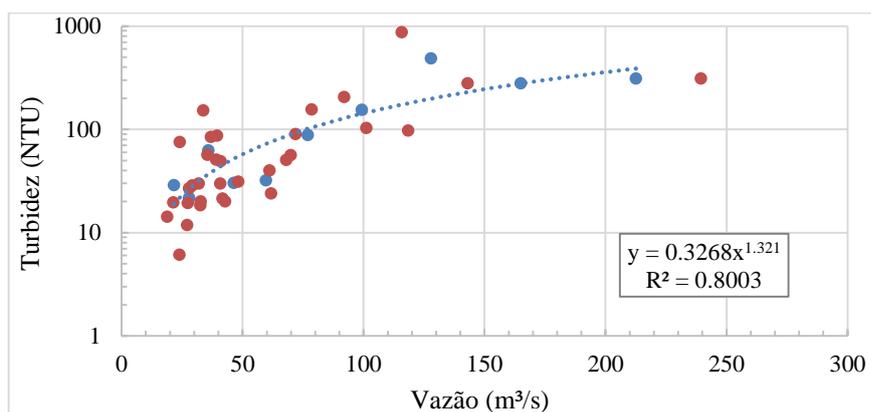


Figura 71. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD053 (rio Doce) no município de Galiléia (MG)

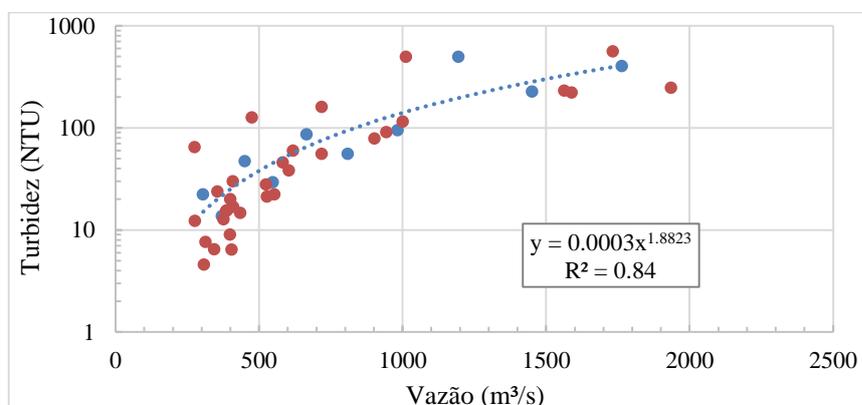


Figura 72. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD057 (rio Caratinga) no município de Conselheiro Pena (MG)

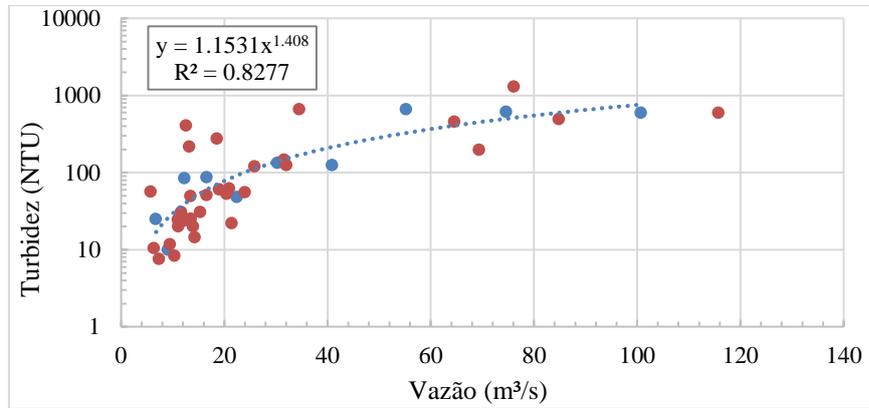


Figura 73. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD059 (rio Doce) no município de Resplendor (MG)

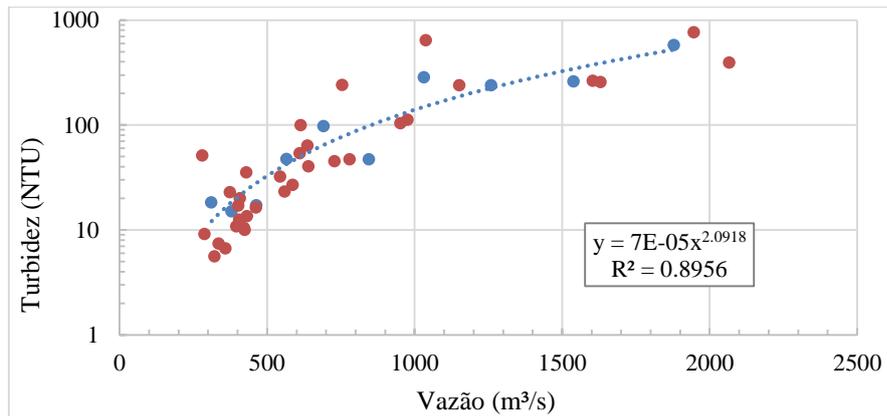


Figura 74. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD065 (rio Manhuaçu) no município de Aimorés (MG)

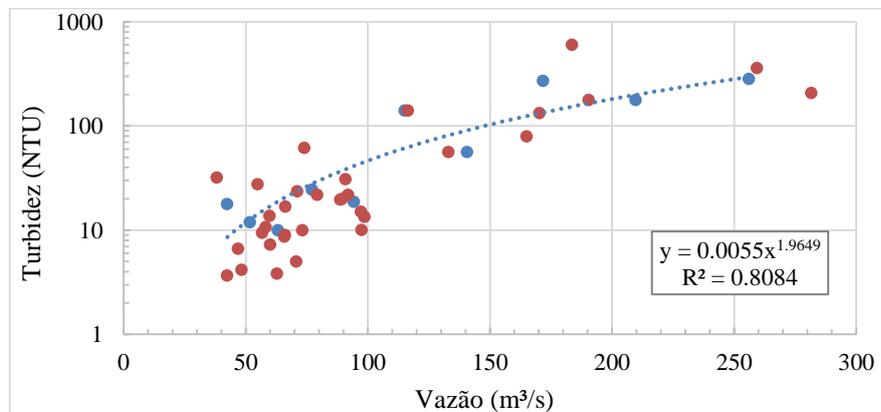


Figura 75. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto RD067 (rio Doce) no município de Aimorés (MG)

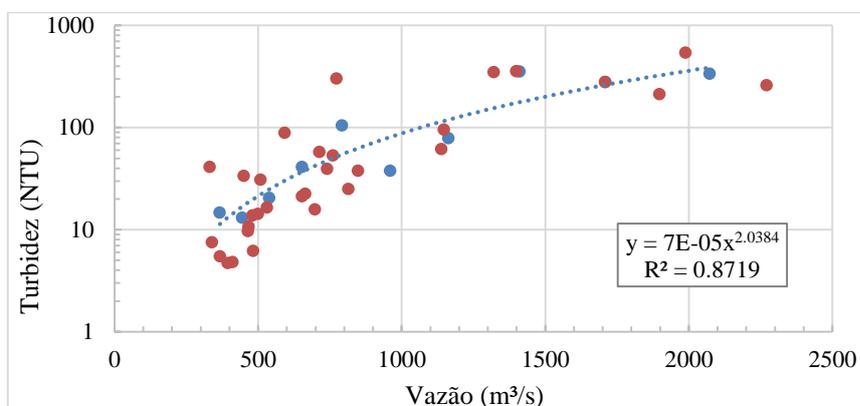


Figura 76. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto 56991200 (rio Guandu) no município de Afonso Cláudio (ES)

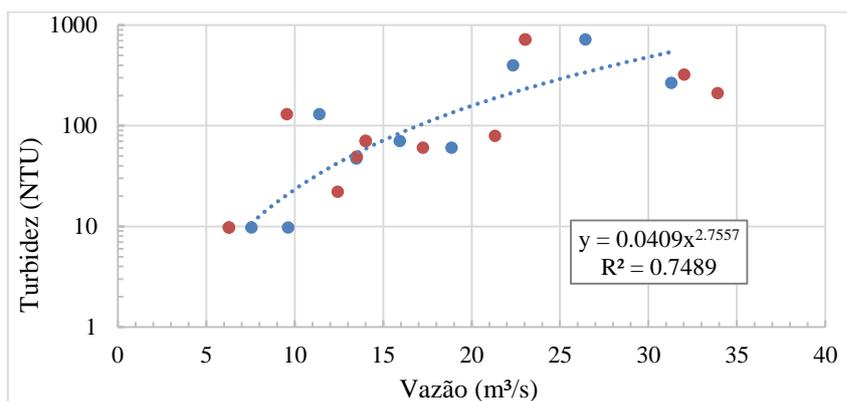


Figura 77. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto 56991400 (rio Doce) no município de Colatina (ES)

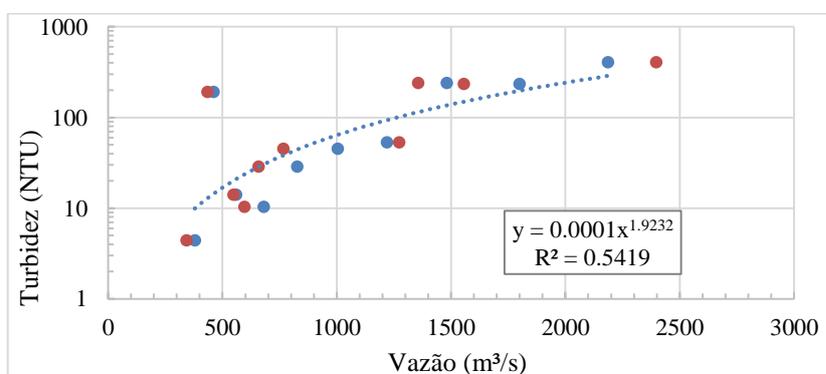


Figura 78. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto 56993400 (rio Santa Joana) no município de Baixo Guandu (ES)

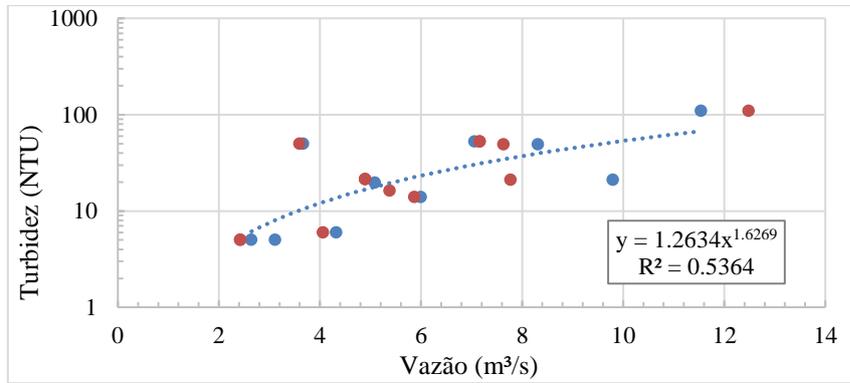


Figura 79. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto 56994600 (rio Doce) no município de Colatina (ES)

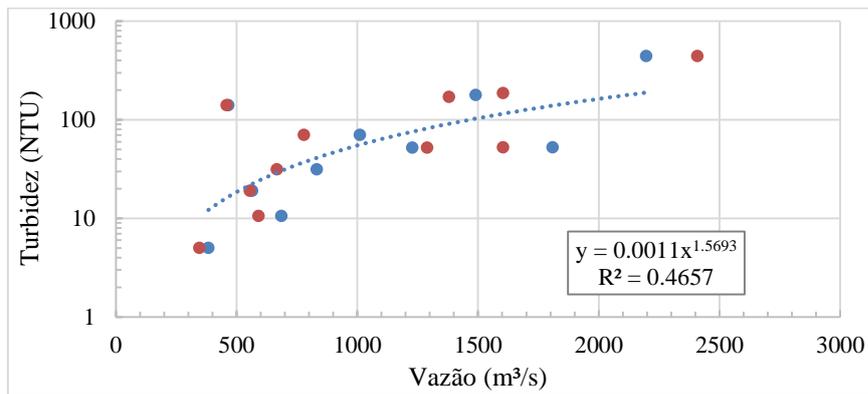
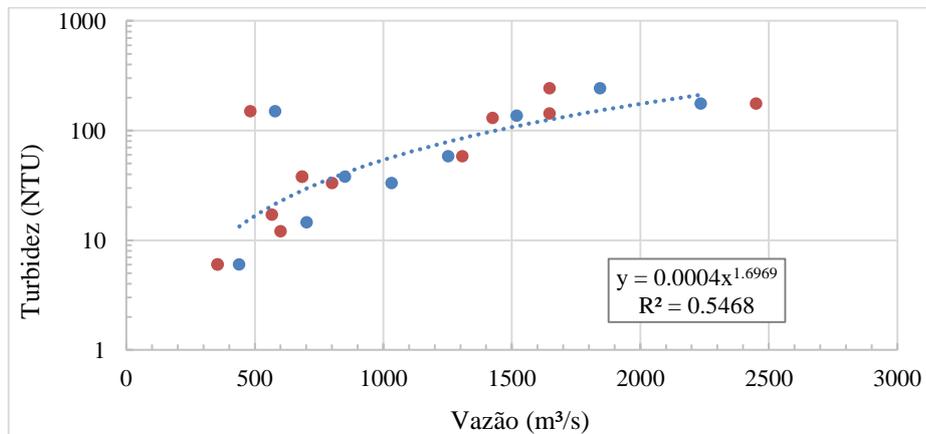


Figura 80. Relação entre turbidez e vazão dos dados do posto 56994700 (rio Doce) no município de Colatina (ES)



### C. CORRELAÇÕES OBTIDAS ENTRE TURBIDEZ E CSS

Figura 81. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD009 (rio do Carmo) no município de Mariana (MG).

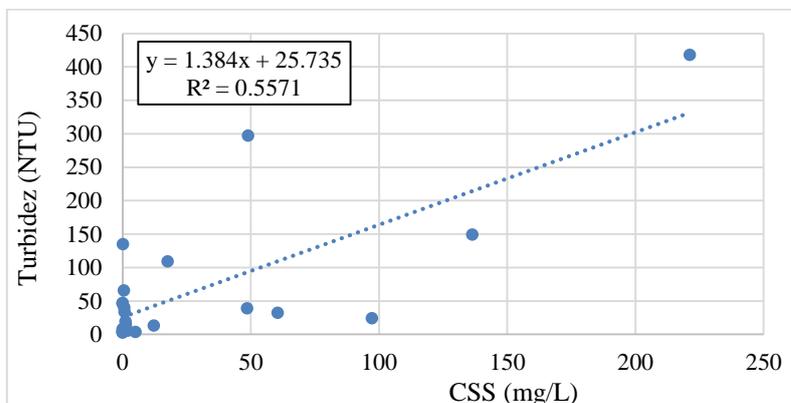


Figura 82. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD013 (rio Piranga) no município de Ponte Nova (MG).

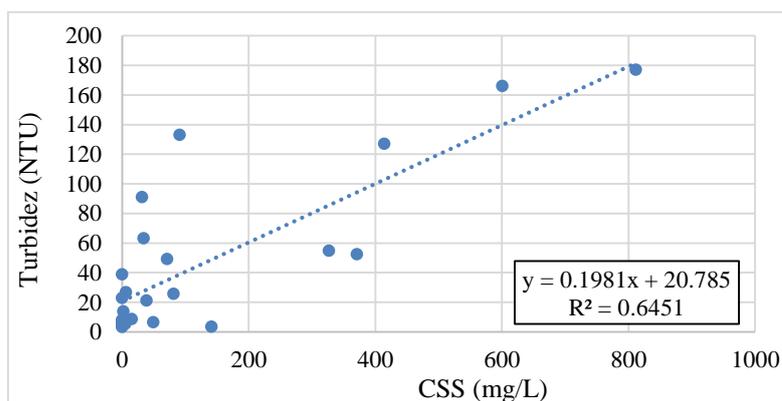


Figura 83. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD018 (rio Casca) no município de Rio Casca (MG).

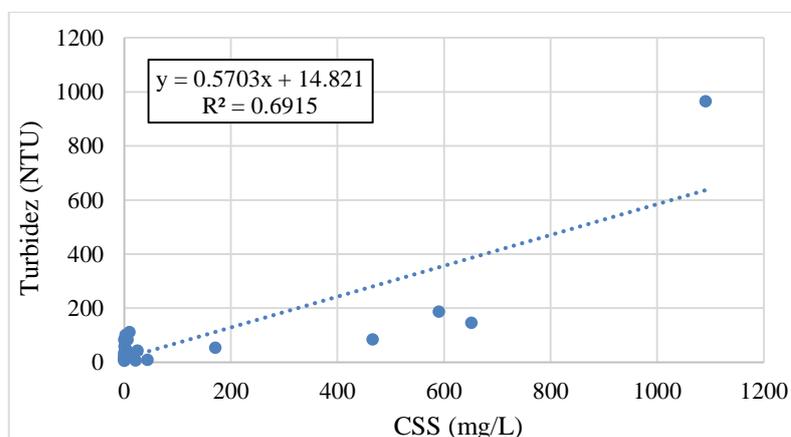


Figura 84. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD021 (rio Matipó) no município de Raul Soares (MG).

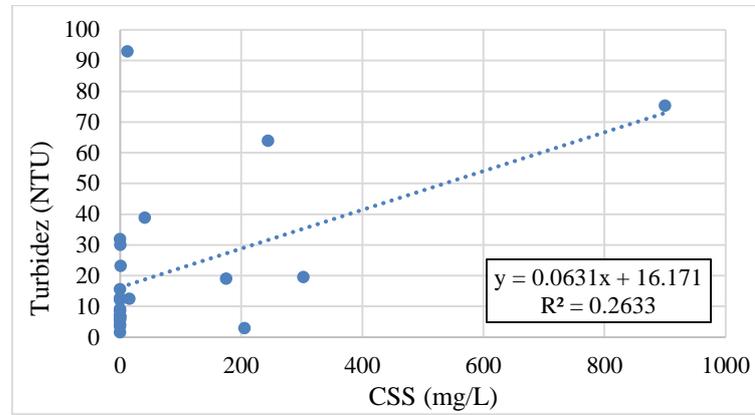


Figura 85. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD023 (rio Doce) no município de Marilândia (MG).

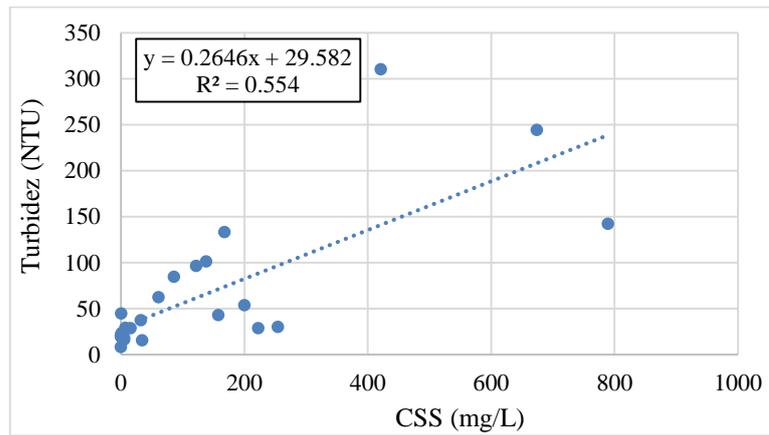


Figura 86. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD026 (rio Piracicaba) no município de João Monlevade (MG).

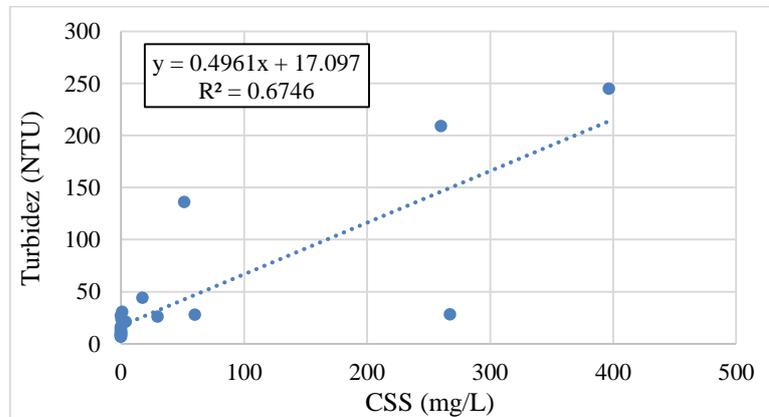


Figura 87. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD027 (rio Santa Bárbara) no município de São Gonçalo do Rio abaixo (MG).

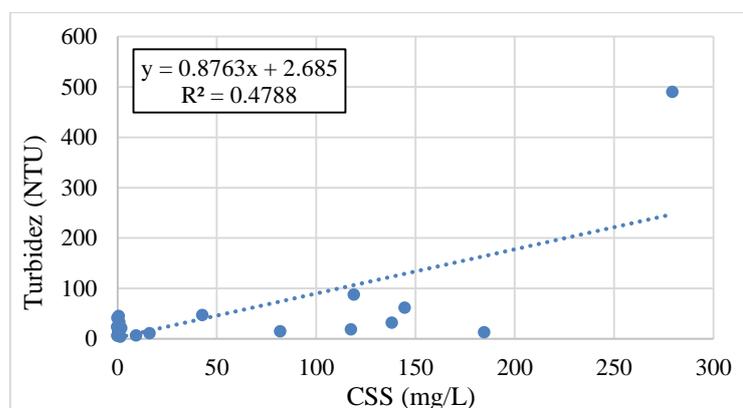


Figura 88. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD029 (rio Piracicaba) no município de Nova Era (MG).

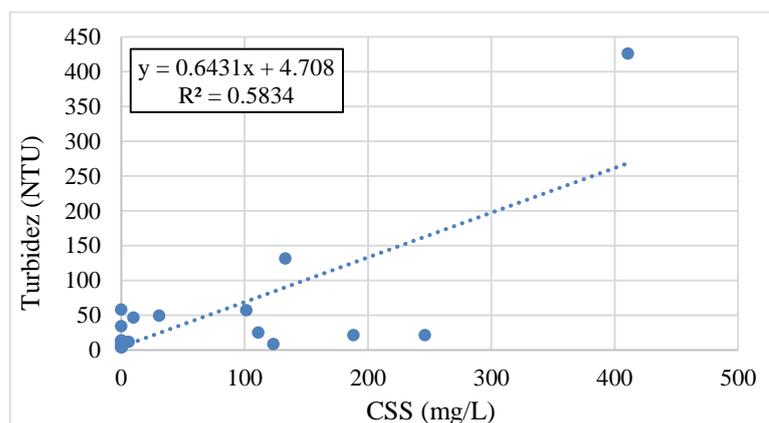


Figura 89. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD032 (rio Piracicaba) no município de Antônio Dias (MG).

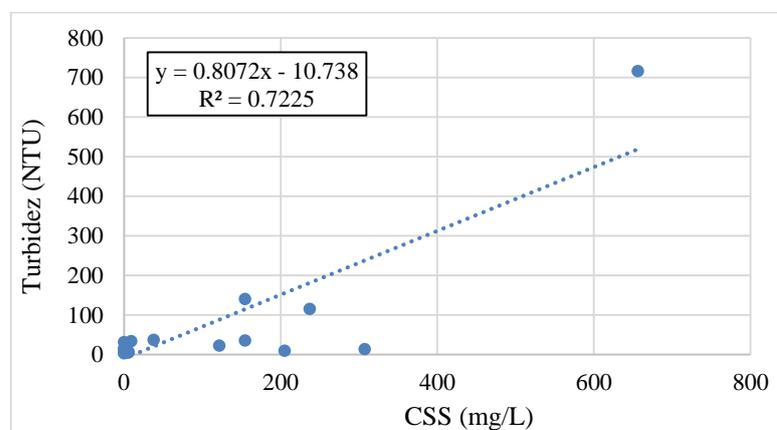


Figura 90. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD033 (rio Doce) no município de Belo Oriente (MG).

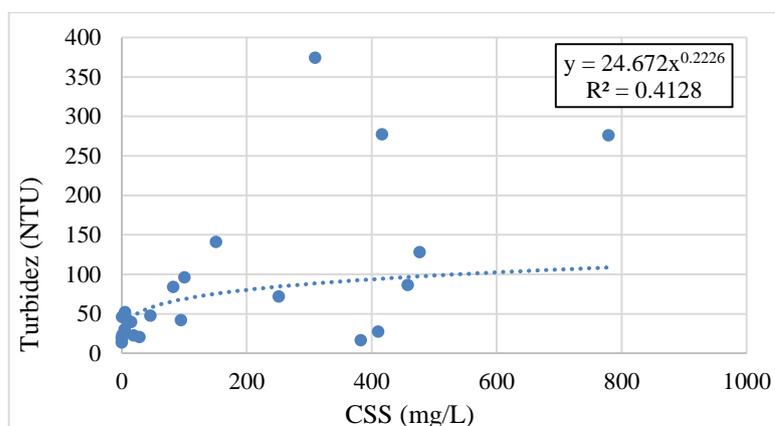


Figura 91. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD034 (rio Piracicaba) no município de Coronel Fabriciano (MG).

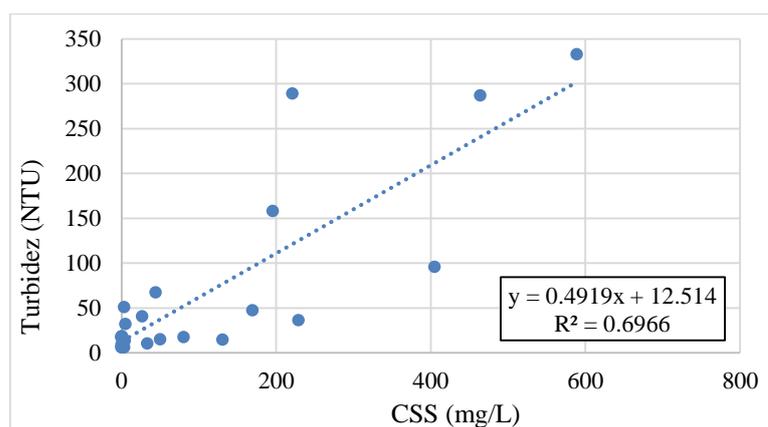


Figura 92. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD035 (rio Doce) no município de Ipatinga (MG).

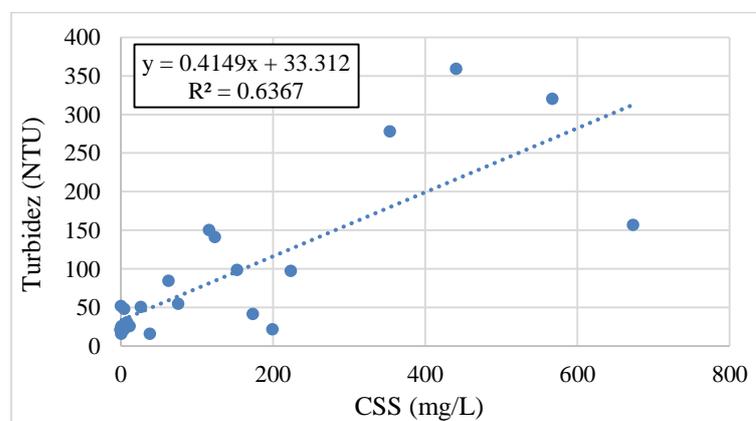


Figura 93. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD039 (rio Santo Antônio) no município de Naque (MG).

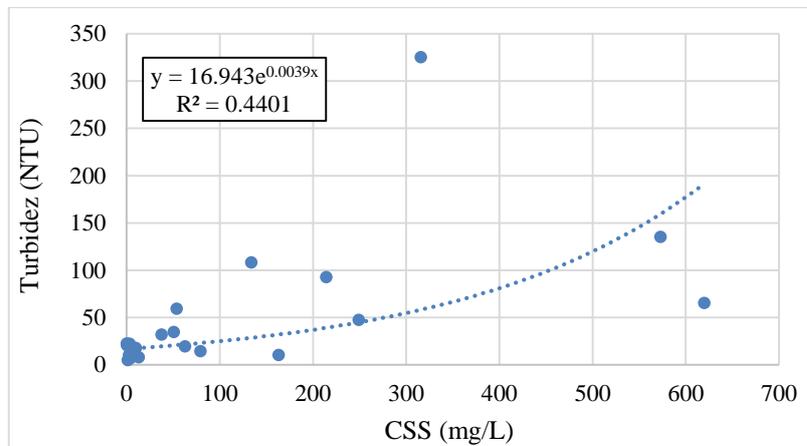


Figura 94. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD044 (rio Doce) no município de Governador Valadares (MG).

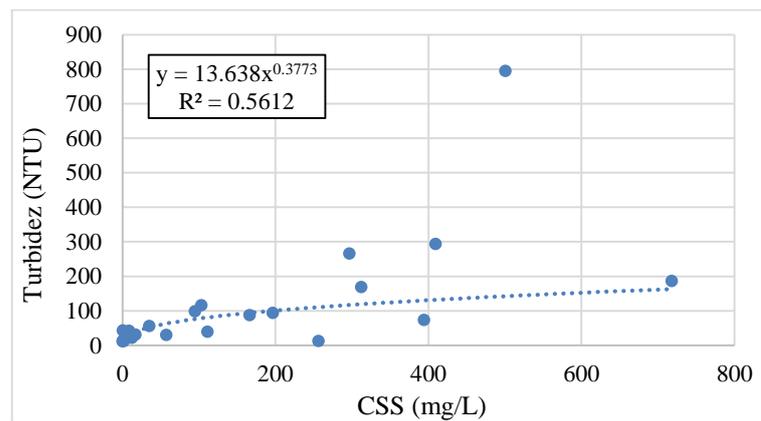


Figura 95. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD045 (rio Doce) no município de Governador Valadares (MG).

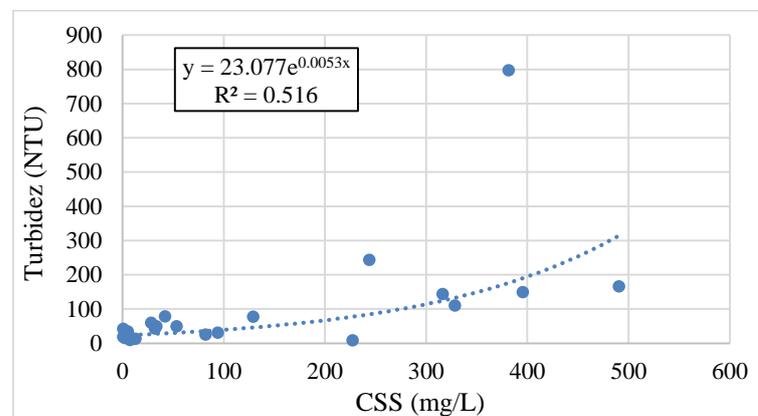


Figura 96. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD049 (rio Suaçuá Grande) no município de Frei Inocência (MG).

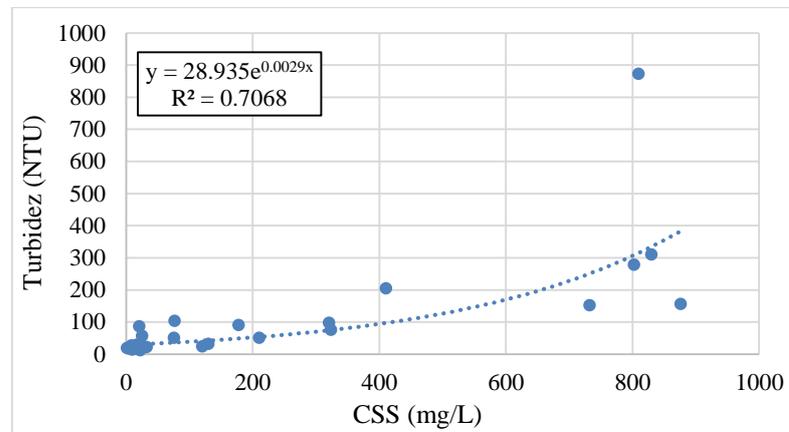


Figura 97. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD053 (rio Doce) no município de Galiléia (MG).

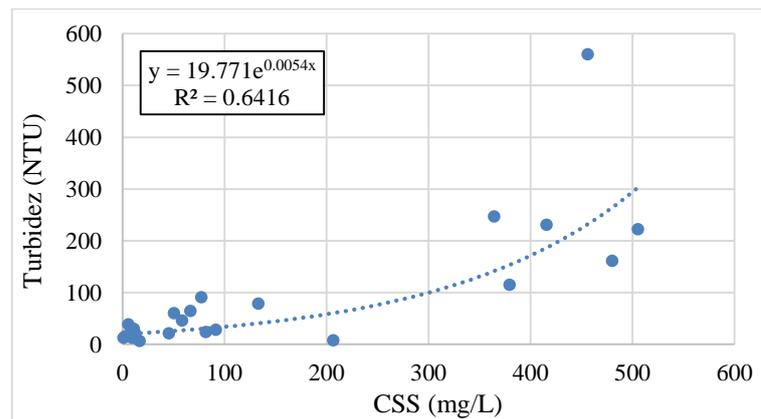


Figura 98. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD057 (rio Caratinga) no município de Conselheiro Pena (MG).

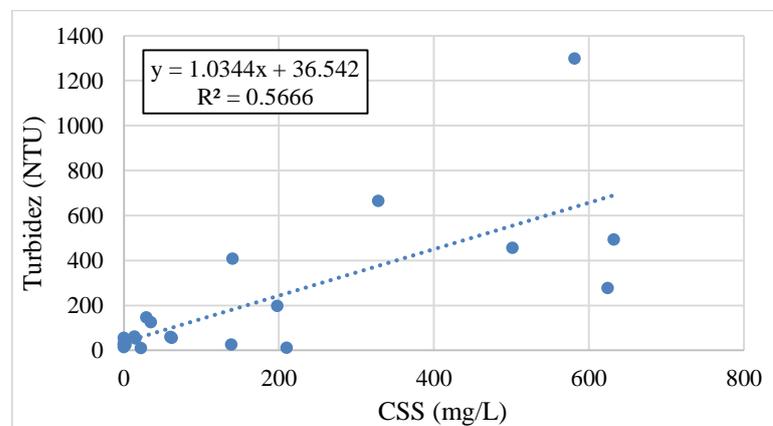


Figura 99. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD059 (rio Doce) no município de Resplendor (MG).

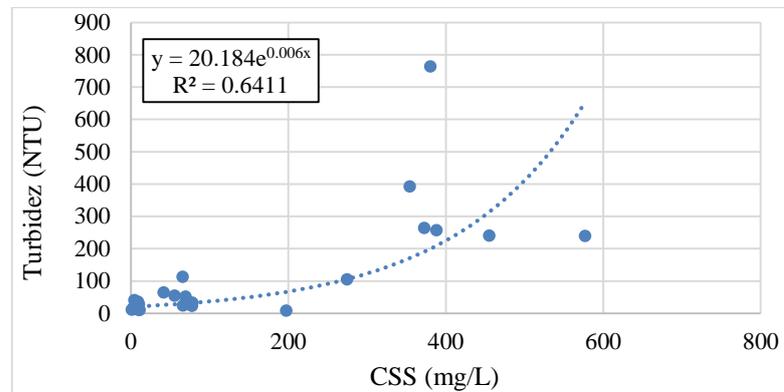


Figura 100. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD065 (rio Manhuaçu) no município de Aimorés (MG).

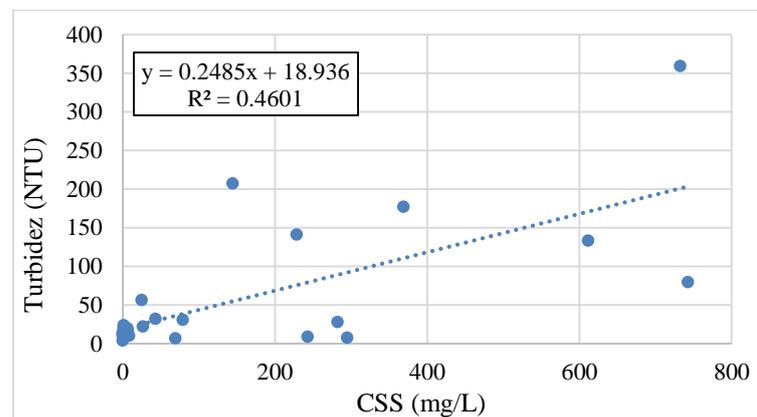


Figura 101. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD067 (rio Doce) no município de Aimorés (MG).

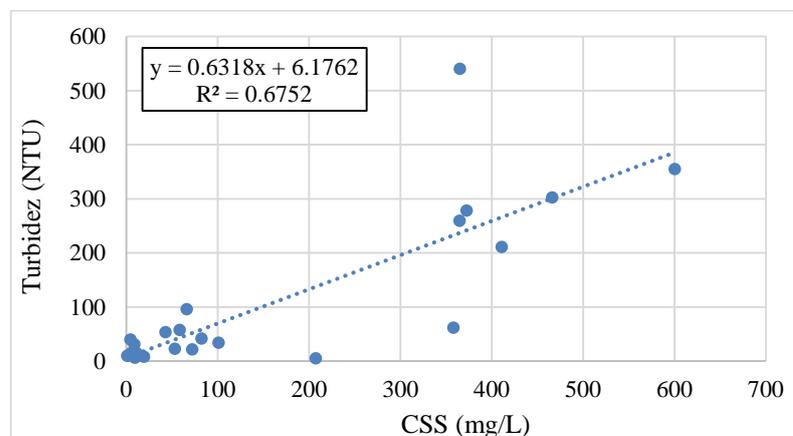


Figura 102. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto 56991200 (rio Guandu) no município de Afonso Cláudio (ES).

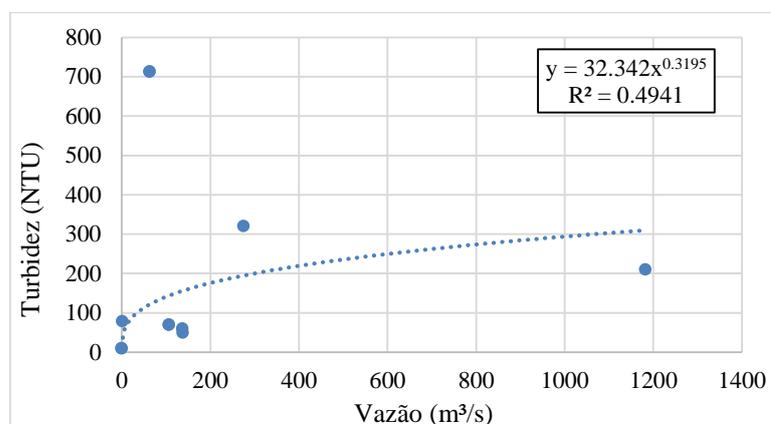


Figura 103. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto 56991400 (rio Doce) no município de Colatina (ES).

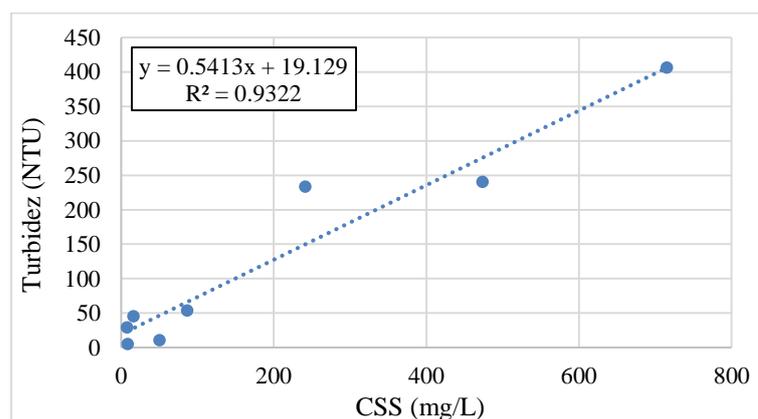


Figura 104. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto 56993400 (rio Santa Joana) no município de Baixo Guandu (ES).

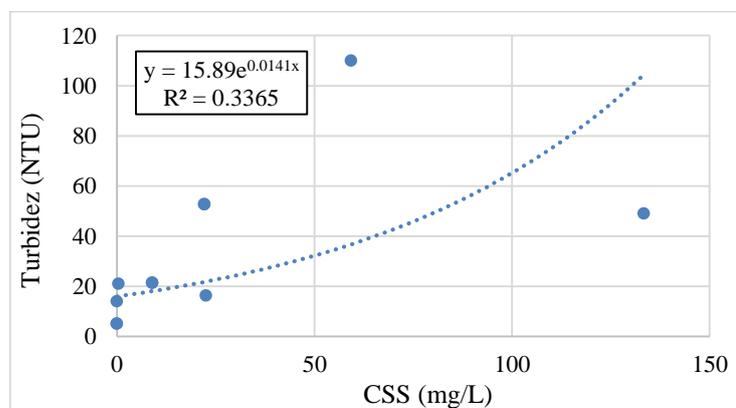


Figura 105. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto 56994600 (rio Doce) no município de Colatina (ES).

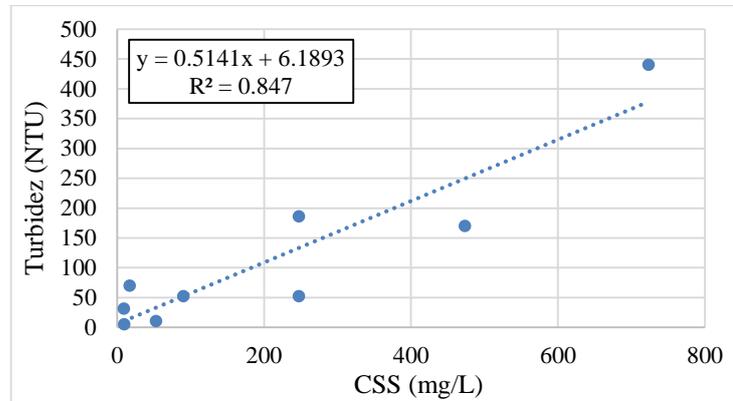


Figura 106. Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto 56994700 (rio Doce) no município de Colatina (ES).

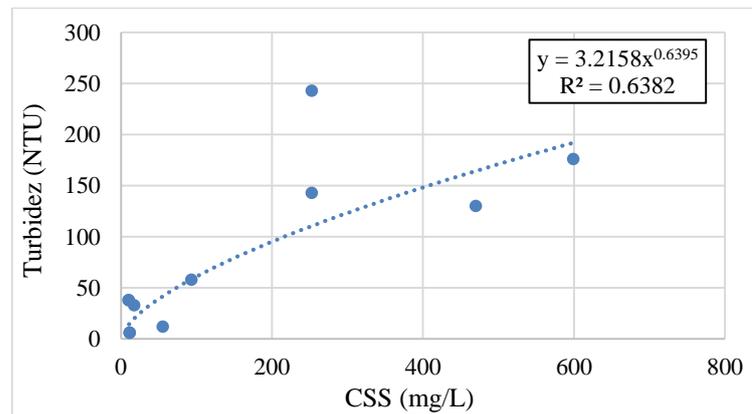




Figura 110. Relação entre turbidez estimada e observada na estação RD035 (rio Doce) no município de Ipatinga (MG).

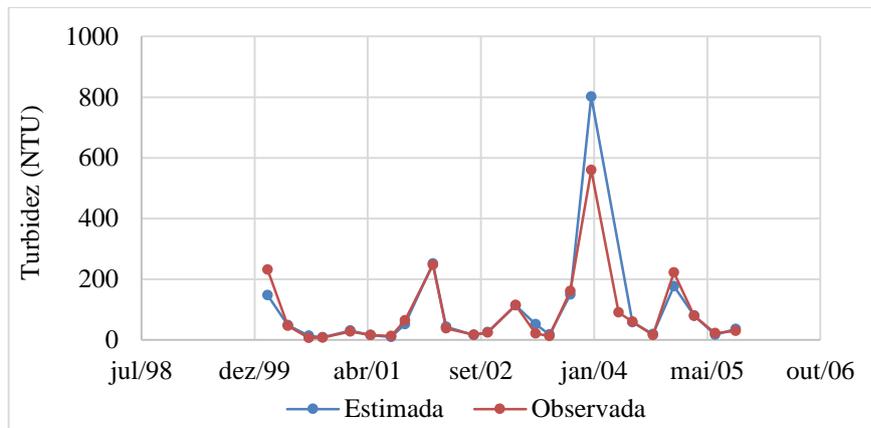


Figura 111. Relação entre turbidez estimada e observada na estação RD044 (rio Doce) no município de Governador Valadares (MG).

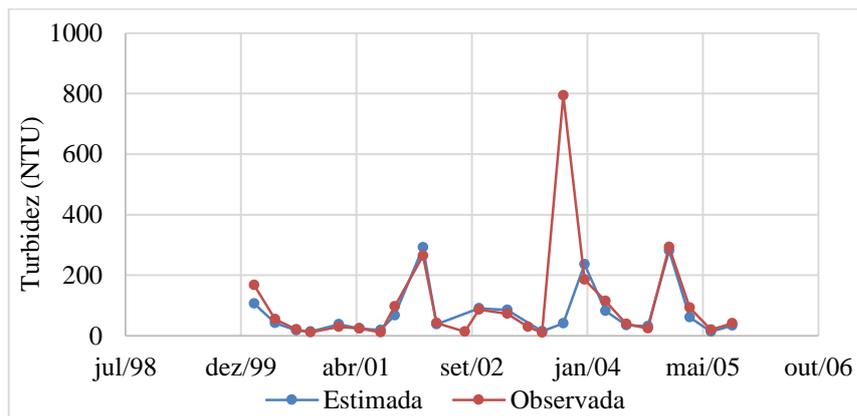


Figura 112. Relação entre turbidez estimada e observada na estação RD053 (rio Doce) no município de Galiléia (MG).

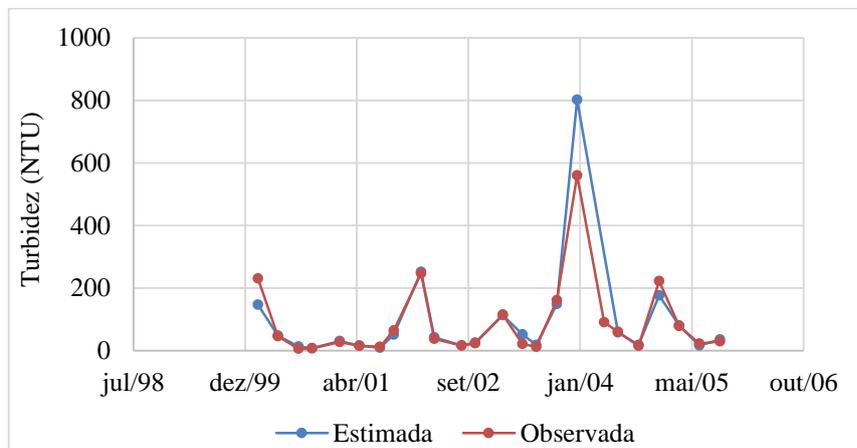


Figura 113. Relação entre turbidez estimada e observada na estação RD059 (rio Doce) no município de Resplendor (MG).

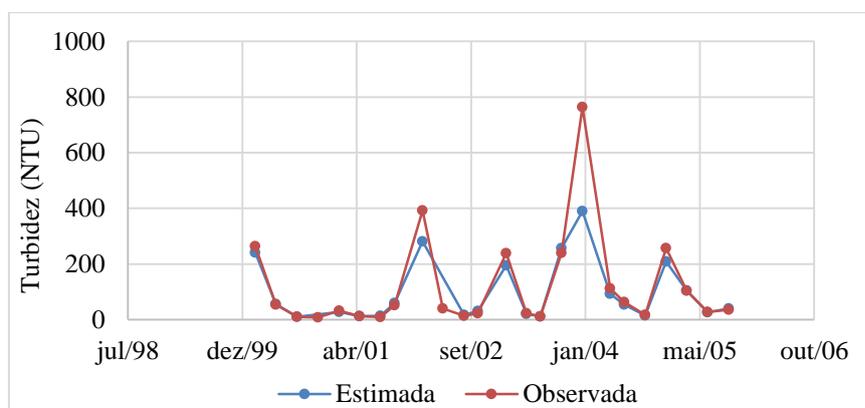


Figura 114. Relação entre turbidez estimada e observada na estação RD067 (rio Doce) no município de Aimorés (MG).

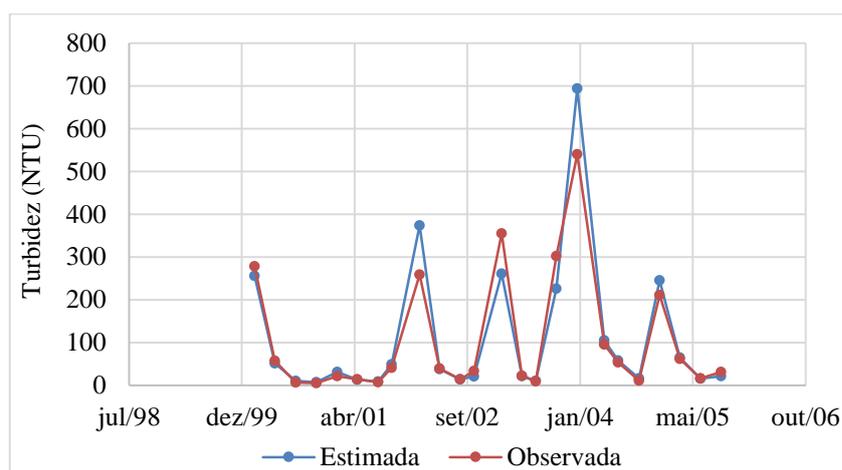


Figura 115. Relação entre turbidez estimada e observada na estação 56991400 (rio Doce) no município de Colatina (ES).

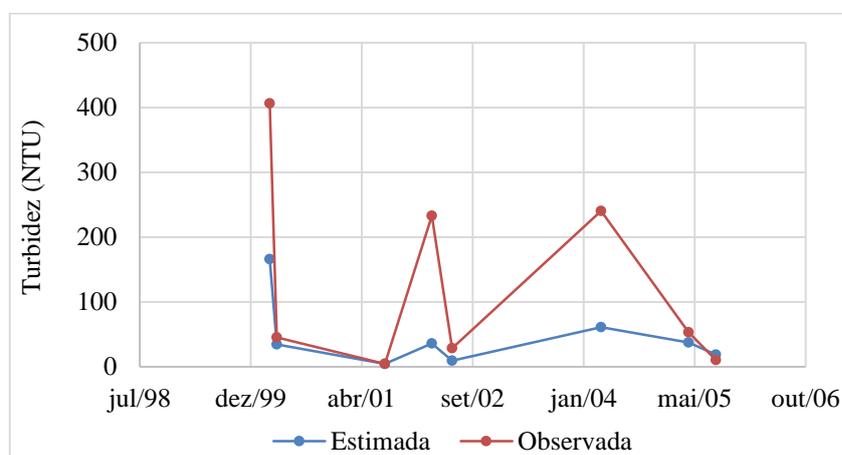


Figura 116. Relação entre turbidez estimada e observada na estação 56994600 (rio Doce) no município de Colatina (ES).

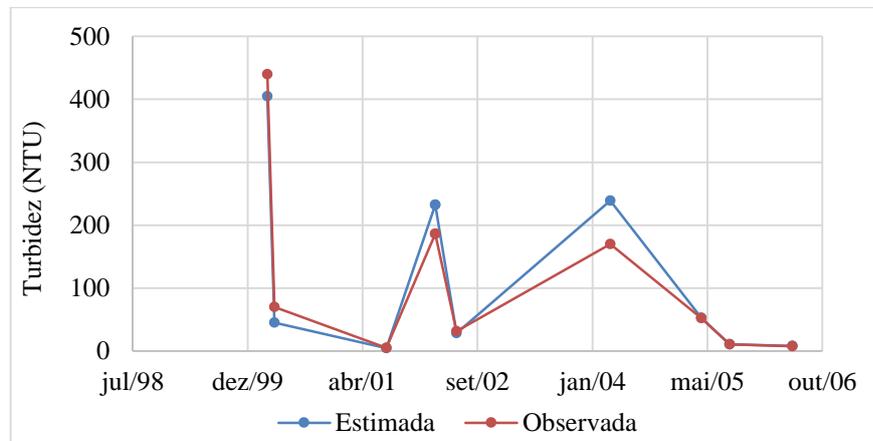


Figura 117. Relação entre turbidez estimada e observada na estação 56994700 (rio Doce) no município de Colatina (ES).

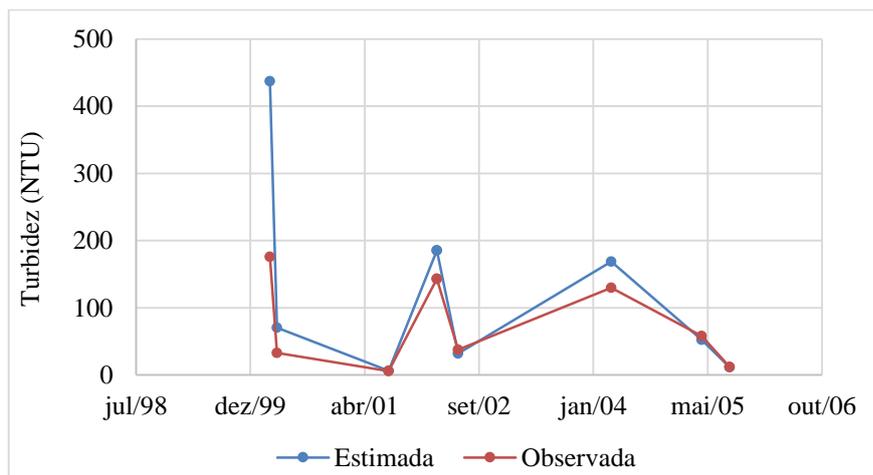


Figura 118. Relação entre turbidez estimada e observada na estação 56998300 (rio Doce) no município de Linhares (ES).

