UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

Luis Fernando Murillo Bermudez

CORRELAÇÃO ENTRE TURBIDEZ E CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO PARA ANÁLISES HIDROSSEDIMENTOLÓGICAS UTILIZANDO DADOS DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

CAMPINAS

2021

CORRELAÇÃO ENTRE TURBIDEZ E CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO PARA ANÁLISES HIDROSSEDIMENTOLÓGICAS UTILIZANDO DADOS DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil na área de Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais.

Orientador(a): Prof. Dr. André Luís Sotero Salustino Martim.

Co-orientador(a): Prof. Dr. José Gilberto Dalfré Filho

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO OU TESE DEFENDIDA PELO ALUNO LUIS FERNANDO MURILLO BERMUDEZ E ORIENTADA PELO PROF. DR. ANDRÉ LUÍS SOTERO SALESTINO MARTIM.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

_____

CAMPINAS

2021

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

M945c

Murillo-Bermúdez, Luis Fernando, 1994-
Correlação entre turbidez e concentração de sedimentos em suspensão para análises hidrossedimentológicas utilizando dados de uma estação de tratamento de água / Luis Fernando Murillo Bermúdez. – Campinas, SP : [s.n.], 2021.

Orientador: André Luís Sotero Salustiano Martim.
Coorientador: José Gilberto Dalfré Filho.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Transporte de sedimentos. 2. Turbidez da água. 3. Sedimentos em suspensão. 4. Bacias hidrográficas. 5. Estações de tratamento de água. I. Martim, André Luís Sotero Salustiano, 1976-. II. Dalfré Filho, José Gilberto, 1976-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Correlation between turbidity and suspended sediment concentration for hydrossedimentologicals analysis using data from a water treatment plant
Palavras-chave em inglês:
Sediment transport
Water turbidity
Suspended sediments
Watershed
Water treatment plant
Área de concentração: Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais
Titulação: Mestre em Engenharia Civil
Banca examinadora:
André Luís Sotero Salustaino Martim
Cristiano Poleto
Ana Elisa Silva de Abreu
Data de defesa: 06-10-2021
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)
- ORCID do autor: https://orcid.org/0000-0001-7564-487X
- Currículo Lattes do autor: http://lattes.cnpq.br/8471710414686256

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

CORRELAÇÃO ENTRE TURBIDEZ E CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO PARA ANÁLISES HIDROSSEDIMENTOLÓGICAS UTILIZANDO DADOS DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Luis Fernando Murillo Bermudez

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. André Luís Sotero Salustino Martim.
Presidente e Orientador(a)/UNICAMP

Prof. Dr. Cristiano Poleto
UFRGS

Prof. Dra. Ana Elisa Silva de Abreu
UNICAMP

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 06 de outubro de 2021

DEDICATORIA

Dedico amorosamente este trabalho à memória de Luis Antonio Murillo, Uldarico Murillo e Martha Murillo.
Dedico em forma de eterno agradecimento à minha mãe Carmen Sofia Bermúdez e ao meu irmão David Alejandro.

When I heard the learn'd astronomer,
When the proofs, the figures, were ranged in columns before me,
When I was shown the charts and diagrams, to add, divide, and measure them,
When I sitting heard the astronomer where he lectured with much applause in the lecture-room,
How soon unaccountable I became tired and sick,
Till rising and gliding out I wander'd off by myself,
In the mystical moist night-air, and from time to time,
Look'd up in perfect silence at the stars.

Walt Whitman

AGRADECIMENTOS

À minha família pelo apoio incondicional e grande afeto que sempre foram, são e serão o pilar fundamental para este constante trafegar da vida.

À Tao pela inefável e inestimável companhia.

Ao meu orientador, professor André Luis Sotero Salustino Martin por toda a colaboração, apoio, ensinamentos, prestatividade e paciência no desenvolvimento deste projeto e de muitos outros.

Á prezada professora Ana Elisa Silva de Abreu pela confiança depositada sempre, pelo apoio mais que acadêmico e pelas contribuições finais para o melhoramento do trabalho.

Ao professor José Gilberto Dalfré Filho pela co-orientação.

Ao professor Ricardo de Lima Isaac, Cristiano Poleto pelos comentários técnicos no intuito de aprimorar a pesquisa.

Aos professores Jean Minella e Carlos Zuffo pela aceitação do convite para ser membros da minha banca.

Aos técnicos de laboratório do Saneamento, Fernando, Daniel e especialmente ao Thiago que durante o transcurso da pandemia foi um aliado incondicional para a realização final das análises.

Aos funcionários do Departamento de Hidrologia Marcelo e Carlão pela colaboração e logística para a toma de amostras e de dados de campo, como também para o Diniz, colega de graduação.

Aos funcionários da SABESP divisão Campo Limpo Paulista por sempre estar prestes para socializar, colaborar e questionar. Especialmente ao Eduardo Leite e os técnicos de laboratório pelos inúmeros favores solicitados para o bom andamento do projeto dentro das instalações da estação de tratamento.

Aos funcionários da UNICAMP, especialmente os membros da DAC e da Secretaria da FEC, por fazer a vida do estudante muito mais fácil e colaborar além das suas próprias obrigações. Uma grande gratidão para o pessoal de segurança e da limpeza da FEC que foram grata companhia em tempos pandémicos.

À Mariana, Mauro e Jasmim pela desinteressada recepção e ajuda ao longo do caminho.

Aos prezados amigos: Estefy, Ricardo, Diego, Lila, Berdi, Marquinhos, Jozelito, que disponibilizaram seus veículos e parte de seu valioso tempo para transportar-me

em cada uma das visitas de campo. Também um agradecimento de coração para minha querida amiga Arisa e toda sua família pela recepção numa destas visitas.

Aos moradores e demais frequentadores da querida casa velha que tanto ajudaram na minha imersão na vida brasileira, especialmente ao Pacho, amigo desde os tempos da graduação, que me fez sentir mais perto a minha terra com suas “santanderianidades” no dia a dia.

Às moradoras da jabuticabeira Nelly, Bia, Moara, Aleja, por se tornarem minha segunda família no Brasil.

Aos colegas do Departamento, especialmente ao Adriano e Diego, pelas valiosas confraternizações e pela ajuda nos trabalhos de campo e pela convivência no Simpósio.

Ao meu amigo Mehdi Mohamedzized que durante o isolamento converteu-se num parceiro de sala e almoços com grandes conversas trilíngues em torno aos recursos hídricos, cultura, gastronomia e geopolítica que tanto serviu para meu desenvolvimento como cidadão do mundo.

Ao Edward, Beethoven, Sandra, Maria, Martín, Beatriz (in memoriam), Bárbara, Carlos, Pascal, Franx, Mari e muitos mais com os quais formei lindas relações de amizade durante meu intercambio e mestrado.

Aos amigos de longa data que ainda existindo a barreira da distância sempre estão presentes na minha vida.

A cada um dos professores e mestres que ajudaram na minha formação, especialmente aos professores do curso de mestrado que abriram as portas da UNICAMP para novas perspectivas dos processos naturais desde um olhar mais abrangente.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Fundo de Apoio ao Ensino, à Pesquisa e à Extensão (FAEPEX) com número de solicitação: 2300/19 e com o processo nº 2017/09921-2, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

RESUMO

A dinâmica de transporte de sedimentos nos cursos d'água tem relação direta com sérios danos ambientais e econômicos. Medições da descarga de sedimentos são de extrema importância e necessárias para correta avaliação do impacto causado por esse processo. Porém, o monitoramento hidrossedimentométrico tradicional não é uma tarefa trivial e de baixo orçamento, fazendo com que tecnologias substitutas sejam empregadas atualmente. Entre estas, as medições de turbidez. Uma adaptação desta técnica foi desenhada e avaliada para a verificação do uso secundário de dados turbidimétricos realizados por uma empresa de tratamento de água potável na parte alta da bacia do rio Jundiaí, município de Campo Limpo Paulista, Estado de São Paulo, onde não existe um histórico de dados. Medições diretas com amostrador manual e automático, além da caracterização da distribuição do tamanho das partículas serviram para estabelecer correlações empíricas entre turbidez-concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e para a construção da curva chave de sedimentos com dados de vazão tomados com molinete fluviométrico e dados fornecidos pela rede telemétrica do Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo. A definição dos modelos mais adequados foi realizada com base na análise estatística dos parâmetros (R^2, RMSE e PRESS) e estatística de resíduos. Quando comparadas a relação turbidez-CSS mostrou uma descrição mais precisa das concentrações em eventos de chuva do que as calculadas a partir das curvas chaves sendo a mais adequada para definir a série histórica de descarga de sedimentos solida em suspensão (DSS). Usando a equação de correlação de turbidez-CSS, aproximadamente 67,5% da carga total transportada em suspensão no rio Jundiaí para o período monitorado (novembro-2018/março-2021) ocorreu em apenas o 5% do tempo, sendo que a média anual de produção de sedimentos para 2019 e 2021 foi de 127 $t/km^{2.}$ ano.

Palavras-chave: Transporte de sedimentos, turbidez da água, sedimentos em suspensão, bacias hidrográficas, estações de tratamento de água.

ABSTRACT

The dynamics of sediment transport in water courses is directly related to serious environmental and economic damage. Sediment discharge measurements are extremely important and necessary for the correct assessment of the impact caused by this process. However, traditional hydrosedimentometric monitoring is not a trivial and low-cost task, causing substitute technologies to be used today, among these, the turbidity measurements. An adaptation of this technique was designed and evaluated to verify the secondary use of turbidimetric data carried out by a drinking water treatment company in the upper part of the Jundiaí river watershed, municipality of Campo Limpo Paulista, State of São Paulo, where there is no data history. Direct measurements with manual and automatic samplers, in addition to the characterization of the particle size distribution served to establish empirical correlations between turbidity- suspended sediments concentration (SSC) and to construct the sediment rating curve with flow data taken with current meter and data provided by the telemetric network of the São Paulo Flood Alert System. The definition of the most suitable models was performed based on the statistical analysis of the parameters (R2, RMSE and PRESS) and residual statistics. When compared, the turbidity-CSS relationship showed a more accurate description of the concentrations in rain events than those calculated from the sediment rating curves, being the most adequate to define the historical series of suspended sediment discharge (SSD). Using the turbidity-SSC correlation equation, approximately 67.5% of the total load transported in suspension in the Jundiaí River for the monitored period (November-2018/March-2021) occurred in only 5% of the time, with the average annual sediment production for 2019 and 2021 was 127 t/km^2. year.

Keywords: Sediment transport, water turbidity, suspended sediments, watersheds, water treatment plants.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Desenho simplificado do sistema sedimentar terrestre e seus subsistemas elementares de erosão, transferência e sedimentação. 23
Figura 2 - Modelo de erosão e remoção da solo, relacionado com o intemperismo e a intensidade do processo erosivo (gelo, água ou vento). 25
Figura 3 - Classificação da carga total de sedimentos pela origem, modo de transporte e método de amostragem. 28
Figura 4 - Esquema representativo da classificação de carga de sedimentos fluviais. 29
Figura 5 - Geomorfologia fluvial dentro da bacia hidrográfica. 30
Figura 6 - Fatores espaciais e temporais envolvidos no transporte de SS na escala de bacia hidrográfica. 32
Figura 7 - Amostragem isocinética e não isocinética e sua influência na CSS coletada. 35
Figura 8 - Diferentes configurações para medição de turbidez. 40
Figura 9 - Desenvolvimento histórico das medições de turbidez, transporte de sedimentos e aplicação da turbidez como medida auxiliar de CSS. 45
Figura 10 - Linha de tempo de trabalhos empregando métodos ópticos (77) como medida indireta da concentração de sedimentos em suspensão. 47
Figura 11 - Distribuição dos estudos nas bacias hidrográfica brasileiras e número de trabalhos publicados. 49
Figura 12 - Desenho conceptual dos métodos e materiais aplicados ao estudo de TSS na parte alta bacia hidrográfica o rio Jundiaí. 55
Figura 13 - Vazões medias históricas da parte alta do rio Jundiaí. 58
Figura 14 - Mapa de usos e cobertura do solo da bacia hidrográfica do rio Jundiaí. 59
Figura 15 - Localização das duas seções de amostragem no rio Jundiaí. 60
Figura 16 - Esquema ilustrativo dos pontos de amostragem no rio Jundiaí. 62
Figura 17– Desenho conceitual da seção transversal do rio Jundiaí para medição de vazão. 63
Figura 18 - Equipamento e configuração interna do turbidímetro HANNA-HI 98703.64
Figura 19 - Amostragem manual de SS com emprego do amostrador USDH 48 no Local 1. 66
Figura 20 - Instalação e uso do amostrador automático ISCO 6712. 67

Figura 21 - Difratômetro a laser Malvern Mastersizer 2000. 68
Figura 22 - Processo de filtração de amostras. 69
Figura 23 - Distribuição granulométrica média para o Local 1 e Local 2 de medição no rio Jundiaí. 76
Figura 24 - Box plot para as distribuições dos D_{10}, D_{50} e D_{90} para os dois locais de amostragem no rio Jundiaí. 77
Figura 25 - Variação temporal da distribuição granulométrica média para o rio Jundiaí. 78
Figura 26 - Distribuição granulométrica média dos sedimentos por modo de transporte (material suspenso e material do leito). 79
Figura 27 - Gráfico de dispersão com os dados de CSS para o Local 1 e Local 2. ..80
Figura 28 - Curva de permanência de vazão para o rio Jundiaí. 82
Figura 29 - Gráfico de frequências de vazões e número de dados usados para a calibração da relação turbidez-CSS. 82
Figura 30 - Curva de permanência de turbidez e valores usados na elaboração da correlação entre turbidez-CSS para o rio Jundiaí. 83
Figura 31 - Gráfico de frequências de vazões e número de dados usados para a calibração da relação turbidez-CSS. 83
Figura 32 - Regressão linear entre turbidez e CSS para o rio Jundiaí. 84
Figura 33 - Regressão linear entre turbidez e CSS em unidades logarítmicas. 85
Figura 34 - Regressão não linear entre turbidez e CSS. 86
Figura 35 - Linhas de tendência das correlações turbidez e CSS e comparação de CSS medidos e calculados. 87
Figura 36 - Curva chave a partir de regressão linear com transformação logarítmica de vazão medida pelo método do molinete e CSS. 88
Figura 37 - Linha de tendência da curva chave e comparação de CSS medidos e calculados. 89
Figura 38 - Curva chave de sedimentos usando dados do sistema da SAISP e medições de CSS com uso de RLS. 90
Figura 39 - Curva chave de sedimentos usando dados do sistema da SAISP e medições de CSS com uso de regressão não linear. 91
Figura 40 - Comparação de linhas de tendência extrapoladas e gráficos comparativos entre dados medidos e calculados. 91

Figura 41 - Curvas chaves de sedimentos definidas para o rio Jundiaí e dados vazão-CSS calculados a partir da correlação com as medidas de turbidez.....93
Figura 42 - Série histórica de CSS para o rio Jundiaí usando a correlação com dados de turbidez, a curva chave de sedimentos com dados de vazão pelo método do molinete e curva chave com dados do SAISP.....94
Figura 43 - CSS medidos e calculados para o evento de chuva entre o 6/01/2021 e 7/01/2021. 95
Figura 44 - a. Série histórica de DSS baseado na correlação e curvas chaves. b. Gráfico de frequências de DSS em função do tempo. C. DSS acumulado no período analisado para os três métodos propostos.....97
Figura 45 - DSS mensal no período monitorado usando os três métodos propostos. 98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Especificações técnicas para instrumentos de medição de turbidez. 42
Tabela 2 - Fatores de influência e seu efeito na medição de turbidez. 43
Tabela 3 - Classificação dos estudos em função do tipo de produção científica e sua aplicação. 48
Tabela 4 - Bacias hidrográficas brasileiras com estudos de transporte de sedimentos em suspensão por métodos ópticos, classificadas por área de drenagem. 50
Tabela 5 - Tipos de turbidímetros usados no Brasil. 51
Tabela 6 - Distribuição do total de equações de correlação de turbidez-CSS considerando o número de pares de dados para a calibração. 52
Tabela 7 - Estudos selecionados no Brasil com período de calibração definido. 53
Tabela 8 - Características físicas e socioeconômicas da parte alta da bacia hidrográfica do rio Jundiaí. 56
Tabela 9 - Características morfométricas da bacia hidrográfica da parte alta do rio Jundiaí. 57
Tabela 10 - Distribuição percentual por faixas granulométricas para o Local 1 e Local 2 de medições no rio Jundiaí. 75
Tabela 11 - Diâmetros representativos para o Local 1 e Local 2 de medições no rio Jundiaí. 77
Tabela 12 - Concentrações de sedimentos suspensos (mg/l) no Local 1 e Local 2 de medições no rio Jundiaí. 80
Tabela 13 - Resumo estatístico dos dados medidos usados nos processos de calibração e das series históricas. 81
Tabela 14 - Resumo estatístico do desempenho das correlações de turbidez e CSS para o rio Jundiaí. 86
Tabela 15 - Resumo estatístico do desempenho para a curva chave de sedimentos para o rio Jundiaí usando dados de vazão medidos com molinete fluviométrico. 88
Tabela 16 - Resumos estatístico do desempenho para a curva chave de sedimentos para o rio Jundiaí usando dados de vazão medidos pelo SAISP. 92
Tabela 17 - Resumo estatístico das concentrações de sedimentos suspensos do rio Jundiaí para os métodos de correlação turbidez-CSS e curvas chaves 94
Tabela 18 - Concentração de sedimentos em suspensão medidos e calculados para o evento de chuva entre o 6/01/2021 e 7/01/2021. 95

Tabela 19 - Descarga de sedimentos em suspensão para os três métodos empregados no cálculo de CSS. 97
Tabela 20 - Produção de sedimentos da parte alta da bacia do rio Jundiaí para cada mês monitorado (todos os dados são expressos em t/km^{2}ano). 98

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 18

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA 18

1.2.2. OBJETIVOS 20

1.2.2.1. Objetivo principal 20

1.2.2.2. Objetivos secundários 20

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 22

2.1. DEFINIÇÕES PARA A COMPREENSÃO DO CICLO SEDIMENTOLÓGICO 22

2.1.1. Transporte fluvial de sedimentos 26

2.2.2. Transporte de sedimentos em suspensão na escala de bacia hidrográfica 29

2.3. MONITORAMENTO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO E NOVAS TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO 33

2.3.1. Métodos e protocolos tradicionais de monitoramento de sedimentos em suspensão 33

2.3.2. Métodos substitutos para o monitoramento de sedimentos em suspensão 37

2.4. MEDIDAS DE TURBIDEZ PARA ESTIMATIVA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO. 38

2.4.1 Turbidez e suas aplicações 38

2.4.2. Teoria da turbidimetria e tipos de turbidímetros 39

2.4.3. Fatores que alteram o sensor 41

2.4.4. Estudos de transporte de sedimentos aplicando métodos substitutos de turbidez 43

2.4.5. Estudos de transporte de sedimentos em suspensão usando métodos alternativos de Turbidez-CSS no Brasil 46

2.4.5.1. Estado atual de pesquisa e distribuição dos estudos que relacionam medições óticas e CSS 47

2.4.5.2. Dimensão das bacias hidrográficas objeto de estudo 49

2.4.5.3. Tipos de sensores ópticos empregados em medições de sedimentos em suspensão 50
2.4.5.4. Quantidade de dados usados na correlação e período de calibração 51
3. MATERIAIS E MÉTODOS 54
3.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E CARACTERÍSTICAS GERAIS 54
3.1.1. Localização da bacia hidrográfica 54
3.1.2. Características da bacia hidrográfica de estudo 55
3.2.1.1. Características físicas 56
3.2.1.2. Características hidroclimatológicas 58
3.2.1.3 Características socioeconômicas e de uso e cobertura do solo. 59
3.2. MONITORAMENTO HIDROSSEDIMENTOLÓGICO 60
3.2.1. Monitoramento fluviométrico 61
3.2.1.1. Medição de vazão 61
3.2.2. Monitoramento da turbidez 63
3.2.3. Monitoramento de concentração de sedimentos suspensos 64
3.2.3.1. Amostragem de sedimentos em suspensão 65
3.2.3.2. Análise granulométrica de sedimentos em suspensão 67
3.2.3.3. Análises de concentração de sedimentos em suspensão 68
3.2.3. Granulometria de sedimentos do fundo 69
3.3. CARACTERIZAÇÃO HIDROSSEDIMENTOLÓGICA 70
3.3.1. Comparação entre os locais de amostragem. 70
3.3.3. Correlação de turbidez e CSS 70
3.3.4. Curva chave de sedimentos 73
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 75
4.1. COMPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA E DE CSS ENTRE LOCAIS DE AMOSTRAGEM. 75
4.2. ANÁLISES DA ABRANGÊNCIA DE DADOS DE VAZÃO E TURBIDEZ A PARTIR DE CURVAS DE PERMANÊNCIA 81

4.3. CORRELAÇÃO DE TURBIDEZ-CSS.....84
4.3. CURVA CHAVE DE VAZÃO-CSS.....87
4.3.1. Curva chave a partir de dados de vazão medidos com molinete fluviométrico 87
4.3.2. Curva chave a partir de dados de vazão fornecidos pela SAISP 89
4.4. COMPARAÇÃO DO MÉTODO POR TURBIDEZ E COM EMPREGO DE CURVAS CHAVES.....92
4.4.1 Avaliação para eventos de chuva.....93
4.5. DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO PARA O RIO JUNDIAÍ.....95
5. CONCLUÇÕES.....100
REFERÊNCIAS.....103
ANEXO 1. Tabela resumo de estudos com emprego de turbidimetria para avaliação de transporte de sedimentos em suspensão no Brasil.....132

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

O transporte excessivo de sedimentos é considerado um dos maiores poluentes ambientais causando alterações diretas na qualidade da água que por sua vez podem trazer consequências graves para a fauna e flora dentro do corpo hídrico (BILOTTA E BRAZIER, 2008). De outro lado, a perda de vida útil das estruturas hidráulicas, pela deposição de sedimentos e, consequente, diminuição do armazenamento dos reservatórios, além da erosão por abrasão pelas partículas que passam pelos vertedores e outras estruturas hidráulicas são outras problemáticas relacionadas (CARVALHO, 2008). Paralelamente, devido a interferências antrópicas como obras hidráulicas inadequadas, o manejo e planejamento desordenado do solo, o aporte de sedimentos nos corpos hídricos pode ser intensificado (VERCRUYSSE, GRABOWSKI E RICKSON, 2017).

Deste modo, as taxas de sedimentos podem ser um critério fundamental para estabelecer causas especificas de deterioração da qualidade da água dos rios e a criação de planos conjuntos de conservação do solo e do recurso hídrico para a bacia hidrográfica. A quantificação de sedimentos presentes em corpos hídricos é um dos passos iniciais para prevenção e controle dos problemas causados pelo transporte e deposição de sedimentos. No Brasil, país com dimensões continentais, existe ainda um déficit para o entendimento adequado dos processos de transporte de sedimentos dentro de seu território. Um dos fatores que causam esta situação é a falta de um sistema de monitoramento adequado e robusto de suas bacias hidrográficas (SARI et al., 2015).

Existem diversos métodos de amostragem, coleta e análise usados para o monitoramento da carga solida, Carvalho e Hora (2014) ressaltam que a geração destes dados hidrossedimentométricos por técnicas tradicionais exige a escolha de métodos, análise e calibragem de valores, sendo um processo ainda mais oneroso se comparado com a aquisição de dados puramente hidrológicos.

Neste contexto, investigações e estudos começaram a ser desenvolvidos nas últimas décadas com foco em métodos alternativos (substitutos) que promovam a aquisição com maior detalhe de dados hidrossedimentométricos em escalas espaciais

e temporais, apresentado assim, vantagens técnicas e econômicas (GRAY et al., 2003; GRAY E LANDERS, 2014, GRAY E GARTNER, 2009). Entre as distintas técnicas encontramos os métodos acústicos baseados na diferença de níveis de intensidade do eco (GUERRERO, et al. 2015; GUERRERO, et al. 2017) e a técnica de difração a laser baseado na lei de Mie, que mede a dissipação de energia de uma fonte de laser devido às propriedades das partículas em suspensão (AGRAWAL E POTTSMITH, 2000).

No entanto, a técnica mais amplamente aceita e difundida é o monitoramento por meio de medições de turbidez, que conta com uma longa história de desenvolvimento desde os primeiros trabalhos na década dos 30 e 40 do século passado (JAKUSCHOFF, 1932 citado FEDERAL INTERAGENCY SEDIMENTATION –FISP-, 1940; GRASSY, 1943), até sua consolidação nas últimas décadas, promovido pelo próprio aval do USGS como medida substituta em programas operacionais de monitoramento hidrossedimentológico (GRAY E GARNERT, 2010).

Essas medições indiretas de CSS com dados de turbidez requerem calibrações no local, além de equipamentos especializados. Algumas abordagens recentes buscam procedimentos mais simples (sem a necessidade de treinamento especializado e custos de implementação mais baratos), como medições com o disco preto (WEST E SCOTT, 2016). No entanto, o desempenho estabelecido pela instrumentação turbidimétrica em monitoramento contínuo e em eventos de chuva não pode ser descartado (LANDERS E STURM, 2013).

Um outro aspecto das medições de turbidez, é o fato de serem usadas nas estações de tratamento de água potável para controlar os processos de acordo com os padrões regulamentados em cada país (ANDERSON, 2005). Essas medições de água bruta na captação são importantes para definir a proporção de dosagem química a ser aplicada na fase de coagulação e floculação em estações de tratamento de água (ETA) (AHMAD, AHMAD E ALAM, 2017) ou mesmo em casos extremos para alertar os operadores de fechamento do sistema devido a cargas excessivas de sedimentos que podem danificar os instrumentos de filtração (VOICHICK, TOPPING E GRIFFITHS, 2018; CHANG, LIAO, 2012).

Estudos descrevem as variáveis hidrológicas de precipitação e fluxo como correlacionáveis com dados de turbidez de ETAs, no intuito de analisar as variações espaço-temporais dessas medições (GORANSSON et al. 2013; KOBIYAMA et al.

2011) e também para prever o risco de abastecimento de água insuficiente devido à alta turbidez (CHANGE E LIAO, 2012).

No Brasil, Laguna, Barroso e Cordeiro (2013) relatam que existiam cerca de 7.500 ETAs no país onde a grande maioria possui mananciais superficiais Além, dentro das operações realizadas pelas estações .é exigido por lei o monitoramento da qualidade das águas para abastecimento humano por meio de ensaios laboratoriais em todo o sistema, desde a zona de captação até sua distribuição (Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde), entre os parâmetros monitorados, está o de turbidez.

Nesse sentido, este estudo tem como objetivo avaliar a utilização dos dados de turbidez de uma ETA para análises hidrossedimentológicas, especificamente, para a medição indireta de CSS e a geração de séries temporais de DSS, tomando-se como estudo de caso, o rio Jundiaí, no Estado de São Paulo, Brasil, que conta com a ETA na cidade de Campo Limpo Paulista propriedade da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Com base nos resultados obtidos, espera-se contribuir para a adaptação do método turbidimétrico e a especificação de requisitos básicos para o uso secundário desses dados provenientes de ETAs, no intuito de futuras aplicações em outros locais com indisponibilidade desses tipos de dados, abrindo, assim, uma possibilidade de auxiliar na necessidade de monitoramento do transporte de sedimentos em rios.

1.2.2. OBJETIVOS

1.2.2.1. Objetivo principal

Avaliar o uso secundário de dados de turbidez para análises hidrossedimentológicas provenientes de uma estação de tratamento de água localizada no rio Jundiaí como procedimento de medição indireta da concentração de sedimentos suspensos.

1.2.2.2. Objetivos secundários

Entre os objetivos secundários planteados estão:

1. Revisar os conceitos e trabalhos que aplicam o método de turbidez como medida auxiliar de CSS realizados no Brasil.
2. Analisar as características granulométricas dos sedimentos transportados na seção de monitoramento no rio Jundiaí.
3. Verificar os fatores que podem influenciam a viabilização do método substituto de medição de sedimentos usando dados de turbidez de ETAs e curva chave de sedimentos no local de estudo.
4. Desenvolver uma correlação estatisticamente significativa entre as medidas de turbidez de água bruta com a concentração de sedimentos em suspensão de coletas de amostras físicas.
5. Elaborar uma curva chave de sedimentos e vazão para o rio Jundiaí.
6. Desenvolver a série histórica de concentração de sedimentos suspensos e descarga solida em suspensão.
7. Comparar os resultados das estimativas de descarga solida em suspensão pelo método auxiliar de turbidez e curva chave dos sedimentos que foi gerada para o rio Jundiaí.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda definições e tópicos relevantes para o estudo e monitoramento da dinâmica do transporte de sedimentos, podendo ser subdivido em dois seções principais. O primeiro descrevendo os processos presentes em bacias hidrográficas, os fatores naturais e antrópicos que condicionam o transporte. Esclarecendo desta forma a relevância de estudos do transporte de sedimentos fluviais especificamente no concernente à carga do material em suspensão em rios.

Em segundo lugar, sintetizam-se as técnicas hidrossedimentométricas tradicionais e as tecnologias substitutas que atualmente estão sendo implementadas para o monitoramento de sedimentos suspensos, entre estas, a turbidimetria como medida indireta da concentração de sedimentos (CSS). Relatando suas vantagens e limitações em comparação com os métodos tradicionais, considerando estudos na esfera mundial como no âmbito nacional.

2.1. DEFINIÇÕES PARA A COMPREENSÃO DO CICLO SEDIMENTOLÓGICO

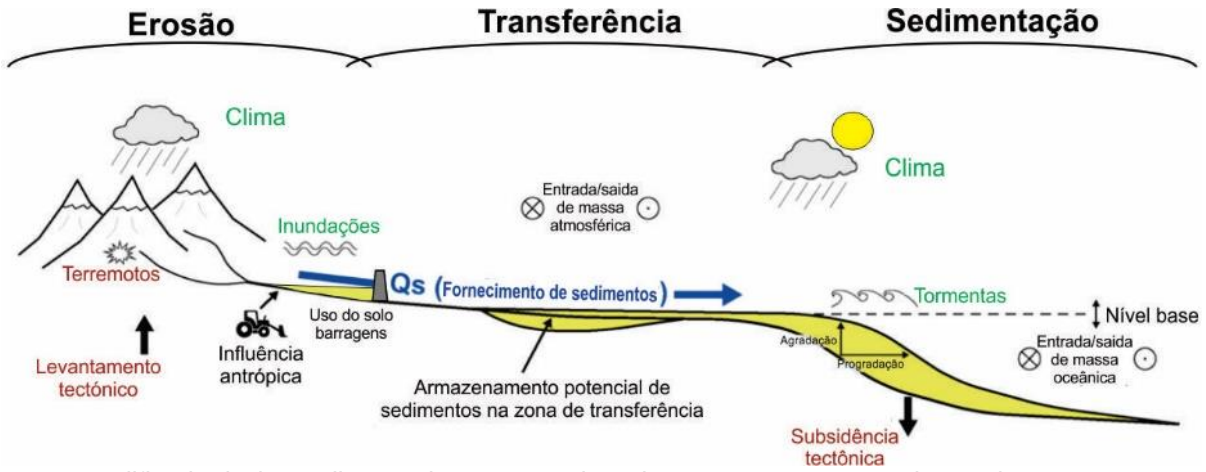
Desde uma perspectiva abrangente , o ciclo sedimentar classicamente consiste nas fases de intemperismo químico e físico, erosão, transporte, deposição e litificação, os quais são processos naturais que modelam o relevo terrestre e estão ativos em uma escala de tempo geológica, onde a água, vento, gravidade e gelo são considerados os agentes externos que promovem estes processos (SELLEY, 2000; MACARTHUR ET AL., 2008).

Castelltort e Van Den Driessche (2003) consideraram o sistema sedimentar nos dominios da interface litosfera/atmosfera, Visando o entendimento primario de sua dinâmica natural este ciclo é subdividido em três subsistemas, cada um caracterizado pelo processo dominante: erosão, transferência (equilibrio entre erosão e depositação) e finalmente, sedimentação.

Na Figura 1 é esquematizado um sistema sedimentar genérico com seus subsistemas, além dos fatores naturais e as modificações antrópicas desses processos, que incluim a construção de barragens e outras atividades relacionadas com diferentes uso do solo/terra associadas à agricultura, construção e mineração.

Este sistema apresenta-se em distintas escalas espaciais, desde pequenas a grandes áreas caracterizadas por longas zonas de transferência e numa escala temporal, estes processos podem ser visualizados em escalas de minutos, horas ou dias quando referidos a fenômenos imediatos como inundações, tempestades ou terremotos; de maneira decadal, quando se faz ênfase nas consequencias das alterações no uso e cobertura da terra e finalmente, até em longas escalas milenares e de "tempo profundo" (CASTELLTORT AND VAN DEN DRIESSCHE, 2003; ROMANS ET AL., 2016)

Figura 1 - Desenho simplificado do sistema sedimentar terrestre e seus subsistemas elementares de erosão, transferência e sedimentação.



Fonte: Modificado de (Castelltort and Van Den Driessche, 2003; Romans *et al.*, 2016).

O transporte de sedimentos do continente para o oceano pelos rios deve ser considerado uma via fundamental de transferência de material na Terra. Seu significado varia desde sua atuação no ciclo geológico ou denudacional global que reflete a denudação dos continentes e a transferência de sedimentos para novos ambientes deposicionais. Syvitski (2003), estima que cerca de 95% do sedimento que entra nos oceanos provem dos aportes das cargas fluviais. Concomitantemente a este fato está sua relevância no funcionamento ecossistêmico costeiro refletido na evolução geomorfológica do relevo, além da importância nos distintos ciclos geoquímicos e finalmente no seu papel potencial como caminho de transferência de poluentes dentro dos sistemas terrestres e para os sistemas costeiros e marinhos (WALLING, 2006).

Destaca-se que o ciclo não acontece de uma forma sequencial simples na qual a erosão ocorreria consequentemente após o intemperismo, a deposição após o transporte e a litificação após a deposição final do sedimento. Exemplo disso são as

áreas de altos relevos, onde a erosão por gravidade pode ocorrer tão rapidamente que as rochas não atingem algum grau significativo de intemperismo ao não estarem expostas tempo suficiente para este desencadear algum efeito perceptível. Por outro lado, a existência de processos de retrabalhamento de materiais depositados previamente podem iniciar novamente a fase de transporte.

O diagrama de fluxo da Figura 2 mostra parte do ciclo sedimentar (intemperismo, erosão e transporte), desenhando as inter-relações entre água, vegetação e rocha, descrito por Leeder, Harris e Kirkby (1998) da seguinte forma:

> A erosão resulta quando o escoamento superficial excede algum valor crítico. Para solos e para rochas “mais frágeis”, as taxas de erosão são limitadas pelo transporte, no sentido de que dependem não linearmente da magnitude do escoamento. Os movimentos de massa das encostas de captação são considerados parte deste caso, podendo-se argumentar que uma vez que um fluxo de gravidade derivado das encostas alcança um curso de corrente, a taxa de remoção depende da magnitude do escoamento. No caso de rochas "duras", as taxas de erosão são limitadas pelo tempo, no sentido de que dependem da disponibilidade de material desgastado para o transporte.

Morgan (2005) assinala que o processo de erosão está principalmente vinculado à erosividade do agente erosivo, a erosibilidade do solo/rocha (suscetibilidade à erosão), inclinação da topografia, caracteristicas da cobertura da superfície que inclui o uso da terra e das práticas de gestão. Paralelamente, García (2008) e Vanoni, (2006) cunham o termo de erosão antrópica devido às atividades do homem, alterações das caracteristicas do solo provocadas por degradação da cobertura vegetal, alterações na própria estrutura dos canais de fluxo, acelerando drasticamente as taxas de erosão, que sob circunstâncias especificas podem aumentar em até 100 vezes a taxa normal ou geológica.

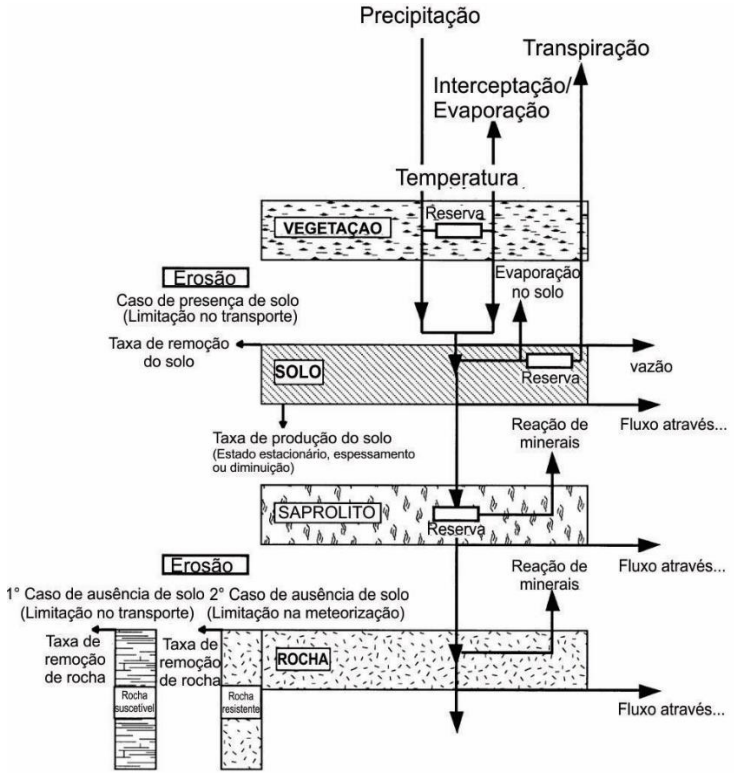
Num sentido restrito dentro do campo da engenharia de sedimentos e a hidrossedimentologia o agente principal de erosão capaz de remover o material da sua fonte original ou local de descanso é a água (força da chuva e escoamento) e o transporte de sedimentos é definido como um transporte bifásico em que a fase sólida é referida às partículas granulares e a fase fluida na água do rio. (VAN RIJN, 2007; GARCÍA, 2008).

Deste modo, convêm introduzir uma definição do conceito de hidrosedimentologia, Zanandrea, Kobiyama e Michel (2017) o descrevem como: uma ciência que busca a compreensão da interação entre processos hidrológicos e

processos sedimentológicos (desagregação, transporte e deposição de sedimentos) na bacia hidrográfica, em diferentes escalas temporais e espaciais.

Existem diversas definições para o termo “sedimento”, palavra com raiz no latim *sedis*, que significa assento ou deposição. Deste modo, sedimento seria aquele material solido que se depositou, deposita ou que é passível de se depositar (GIANNINI AND RICCOMINI, 2000). Além dessa, outra definição básica dentro do campo hidrossedimentológico proposta por Maza e García (1996) é enunciada como quaisquer partículas de solo e rocha de uma bacia hidrográfica que são arrastadas e transportadas pela corrente d’água.

Figura 2 - Modelo de erosão e remoção da solo, relacionado com o intemperismo e a intensidade do processo erosivo (gelo, água ou vento).



Fonte: Tomado de (Leeder, Harris and Kirkby, 1998).

Para Van Rijn (2007), o sedimento é qualquer material fragmentado, formado principalmente pela desintegração física e química das rochas da crosta terrestre. Tais partículas variam em tamanho, desde pedregulhos grandes a fragmentos de tamanho coloidal e em forma, de arredondados a angulares. Eles também variam em gravidade específica e composição mineral, sendo transportados pela agua (sedimento fluvial ou marinho).

Por outro lado, Hickins (1995) adiciona ao conceito de sedimento o material dissolvido que se encontra em solução e faz parte do fluido que se move através do canal, ainda que não dependa das forças do fluxo para manter-se na coluna d'água.

Uma classificação abrangente para os sedimentos naturais proposta por Merten et al. (2014) é baseada tanto na sua origem quanto na natureza do sedimento, é expressa no seguinte apartado:

> ...são classificados como detrítico (ou alogênicos), autígeno (formado no próprio lugar) ou biogênico. Sedimentos detríticos são derivados do processo físico de intemperismo (erosão) da superfície da rocha e do solo que, eventualmente, alcançam os sistemas aquáticos através do escoamento superficial ou da deposição atmosférica (eólico). Sedimentos autígenos ocorrem através da precipitação in situ de vários constituintes químicos, entre os quais são incluídos os compostos de óxidos e hidróxidos de ferro e manganês e hidróxidos de alumínio. Os sedimentos orgânicos, ou biogênicos, por sua vez, podem ser classificados como detrítico (ou alogênicos) e alcançam os sistemas aquáticos da mesma maneira que as partículas de rocha e solo, ou seja, são resultantes dos processos de precipitação/escoamento e deposição atmosférica. Sedimentos orgânicos também podem ser formados a partir dos resíduos das atividades biológicas formados por materiais compostos por sílica (radiolários, diatomáceas), aragonita (moluscos e bivalve), carbono (algas, macrófitas) ou fósforo (peixes).

O conceito de cargas de flocos cobra relevância no momento de se referir ao transporte natural de sedimentos em suspensão em sistemas fluviais e estuarinos onde os sedimentos coesivos de granulometrias finas (inorgânicos ou orgânicos) principalmente argilas, possuem distribuição de cargas eletrostáticas que favorecem a formação de aglomerações de particulados (DROPPO, 2003). A colisão de partículas é promovida pelos movimentos brownianos, das tensões de cisalhamento da corrente e da sedimentação diferencial (TRENTO, 2005). Assim, a floculação muda amplamente as propriedades dos sedimentos, quando a granulometria, a porosidade e a forma efetiva aumentam, as densidades tornam-se inferiores comparadas com as partículas individuais (DROPPO, 2003; MHASHHASH, BOCKELMANN-EVANS E PAN, 2017).

2.1.1. Transporte fluvial de sedimentos

A carga sedimentar fluvial referida por Hudson-Edwards (2007) ao sedimento que está em movimento dentro da calha do rio pode ser classificada de várias formas, de acordo a sua origem, mecanismo de transporte e o método de amostragem (MAZA ALVAREZ AND GARCÍA FLORES, 1996; MORRIS E FAN, 1998; LEO C. VAN RIJN, 2007; CARVALHO, 2008; GARCÍA, 2008; WILCOCK, PITLICK E CUI, 2009; ASTM

INTERNATIONAL, 2016). A Figura 3, apresenta um resumo da terminologia usada mundialmente e adotada neste estudo.

Para o entendimento das diversas classificações em relação ao transporte de sedimentos fluviais é necessário citar primeiramente os três controles fundamentais do transporte, que segundo Hickins (1995) são: competência, capacidade e fornecimento de sedimentos.

A competência é definida em função do maior diâmetro de partícula que o escoamento é capaz de transportar, embora sedimentos de maior diâmetro estejam disponível para transporte, ou seja, um rio pode ser competente ou não em relação a determinado tamanho de partícula que pode carrear. Já a capacidade está relacionada com a quantidade máxima de sedimento de um determinado diâmetro de partícula que o escoamento é capaz de transportar no arrasto do leito, também definida por Wilcock, Pitlick e Cui (2009) como a taxa na qual a corrente move sedimentos em um determinado fluxo. E por fim, o fornecimento de sedimentos refere-se à quantidade e à granulometria de sedimento disponível para ser transportado.

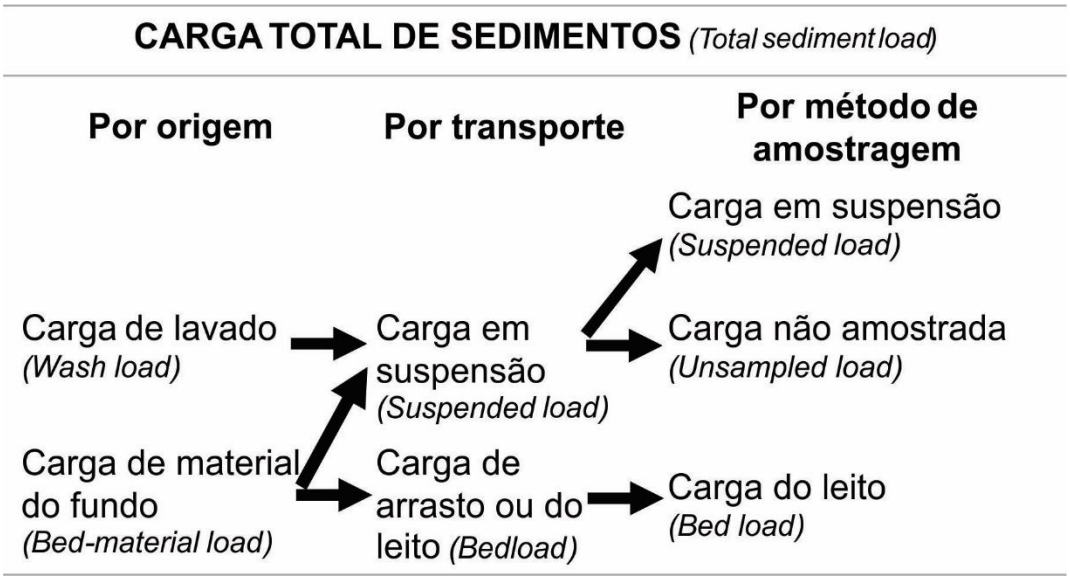
Por sua origem pode ser definida a carga de lavagem e a carga do material do fundo. A primeira é a parte da carga total composta por partículas usualmente mais finas que 0,062 mm de diâmetro (fracção argila e silte), é movimentada por suspensão, e se presente na camada de fundo, só em porcentagens relativamente pequenas, menores que 1-2% (DIPLAS et al., 2008; WILCOCK, PITLICK E CUI, 2009). Já a carga do material do fundo consiste em partículas maiores que a carga de lavagem, representativos da parte móvel do leito. A carga de material do fundo constitui uma pequena fração (menos de 15%) da carga total (MORRIS E FAN, 1998; GARCÍA, 2008).

É importante salientar que o aumento de carga de lavagem não causa deposição na camada do fundo nem diminuição da carga de lavagem causa erosão, pois é transportada bem abaixo da sua capacidade, sendo controlada pela erosão da superfície do solo (chuva, vegetação, uso da terra) e não pela erosão do leito do canal. Por tanto, as fontes deste material provem dos bancos de canais e a área de drenagem que contribui para o escoamento. Para o sedimento transportado como carga do material do fundo, o movimento é regido pela capacidade do transporte do canal (VAN RIJN, 2007; GARCÍA, 2008).

Tendo em conta o mecanismo de transporte, a carga em suspensão, como o próprio termo denota, é movimentada em suspensão na coluna de água tanto pela

turbulência quanto pelos movimentos brownianos no fluxo da água sem ter contato com o leito do rio por períodos de tempo consideráveis (ASTM International, 2016). A carga de arraste ou leito é a porção da carga do material do fundo em continuo contato com o próprio leito, podendo ser transportada por saltação, deslizamento ou rolamento (VAN RIJN, 2007).

Figura 3 - Classificação da carga total de sedimentos pela origem, modo de transporte e método de amostragem.



Fonte: Tomado de (DIPLAS et al., 2008; CARVALHO, 2008).

A classificação por modo de transporte depende de dois fatores: do tamanho do grão e da turbulência no fluxo. As argilas e os lodos finos são normalmente transportados em suspensão (carga de lavagem), já a maioria dos cascalho e pedregulhos são mobilizados como carga no leito. No entanto, dependendo da energia turbulenta, a areia pode ser estável no leito, rolar ou saltar ao longo do fundo ou ser transportada em suspensão quando a descarga aumenta (MORRIS E FAN, 1998).

Por outro lado, a definição operacional é derivada em parte a partir do tipo de amostrador usado no momento de fazer a medição. A carga de sedimentos em suspensão e do leito são medidas em quantidades de sedimento por unidades de tempo, mas existe uma parcela não coletada, que segundo o exposto por Diplas et al. (2008), pode ocorrer nos seguintes casos:

1. Sedimentos que passam embaixo do bico do amostrador de sedimentos em suspensão quando está tocando o leito do rio sem o uso de nenhum amostrador de carga de arrasto.

2. Sedimentos com diâmetro suficientemente pequeno para atravessar a malha da bolsa do amostrador de carga de arraste.

3.Sedimentos movimentando-se acima do amostrador de carga do leito que apresentam um diâmetro muito grande para ser coletados de forma confiável pelo amostrador de sedimentos suspensos.

4. Materiais de grandes dimensões que não conseguem entrar no bico do amostrador de carga do leito.

Um desenho esquemático representativo da carga total de sedimentos fluviais e sua classificação é apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Esquema representativo da classificação de carga de sedimentos fluviais.

. Fonte: Modificado de (MORRIS; FAN, 1998).

2.2.2. Transporte de sedimentos em suspensão na escala de bacia hidrográfica

Deste modo, convêm introduzir uma definição do conceito de hidrosedimentologia, Zanandrea, Kobiyama e Michel, 2017 o descrevem como: uma ciência que busca a compreensão da interação entre processos hidrológicos e processos sedimentológicos (desagregação, transporte e deposição de sedimentos) na bacia hidrográfica, em diferentes escalas temporais e espaciais.

García (2008) descreve as dinâmicas do sedimento com a consequente formação de rasgos geomorfológicos mostrados na Figura 5, onde sulcos e ravinas atuam como condutos para o movimento de sedimentos procedente da fase erosiva de encostas, do leito do próprio rio e dos solos pertencentes à área de captação. O

transporte de sedimentos em massa pode também ocorrer por deslizamentos de terra, fluxos de detritos, fluxos de lama e até em fluxos hiperconcentrados. Em áreas planas com gradientes de energia insuficiente para transportar material, os sedimentos poderão ser depositados podendo se formar desde barras e ilhas de canal até leques aluviais.

Figura 5 - Geomorfologia fluvial dentro da bacia hidrográfica.

Fonte: Tomado de (GARCÍA, 2008).

Em um nível básico, o transporte de sedimento através de uma bacia hidrográfica seria considerado de uma forma simples como o material orgânico e inorgânico erodido das superfícies da terra que fluiria ladeira abaixo para um rio e então seria transportado a jusante. No entanto, a presença de componentes estocásticas e a não linearidade dentro do transporte de sedimentos são cada vez mais discutidas e valorizadas nas distintas pesquisas da área (WILCOCK, PITLICK E CUI, 2009; VERCRUYSSE, GRABOWSKI E RICKSON, 2017; STEFFY E SHANK, 2018).

A quantidade de material erodido que consegue completar o recorrido desde sua origem até algum ponto de controle, ou de medição, segundo o exposto por Carvalho (2008) e Zanandrea et al. (2020), é considerado como produção de sedimento ou rendimento sólido, podendo ser medida em unidades de peso ou volume

em relação à área de contribuição da seção de análise durante um período de tempo determinado.

A produção de sedimentos representa só uma parcela do total de sedimentos gerados por processos erosivos dentro da bacia hidrográfica, esta produção está dada pela diferença entre a “erosão bruta” que é a quantidade total de sedimentos mobilizados e a quantidade de sedimentos que permanece na própria bacia (depositados nos sopés das vertentes, retida pela vegetação, em depressões do relevo, planícies de inundação, dentro dos canais de drenagem, entre outras) (MINELLA E MERTEN, 2013; SARI, POLETO E DOS REIS CASTRO, 2013). Existindo então uma relação inversa entre o tamanho da bacia e a produção de sedimentos devido à diminuição de declividades em ladeiras e canais e pelo aumento das condições de deposição e interceptação (WALLING, 1983).

Tal como é discutido por Vercruysse, Grabowski e Rickson (2017), para os sedimentos em suspensão (podendo ser aplicado de igual forma para os sedimentos de arraste do leito) existe o desafio no entendimento dos fatores (“drivers”) atuantes e suas interações dentro dos processos de transporte nas diferentes escalas temporais e espaciais, no intuito de previsões mais precisas e na quantificação de descargas sólidas.

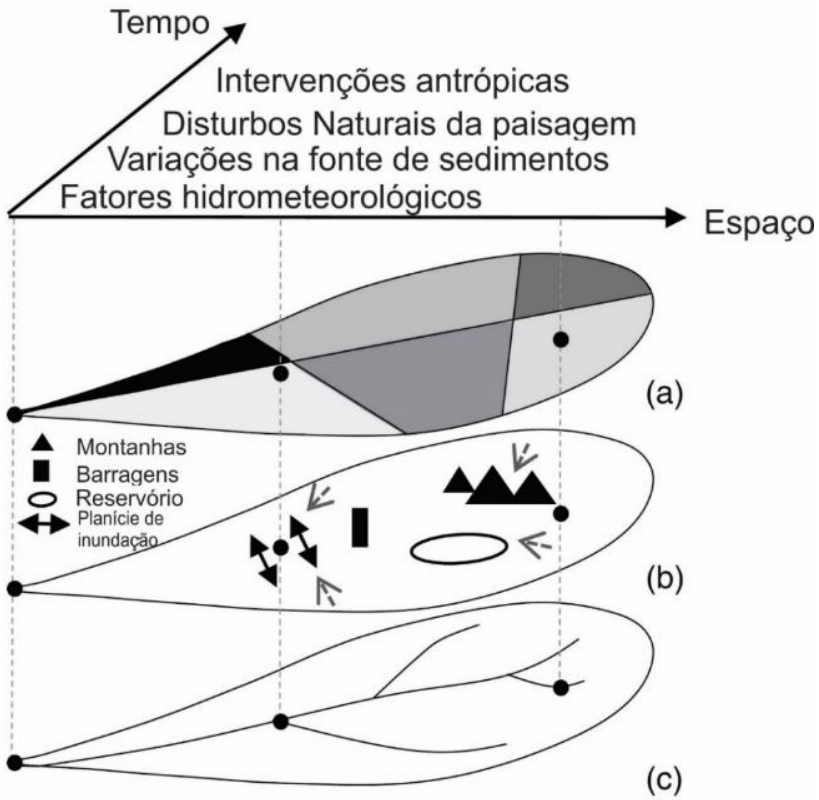
Vercruysse, Grabowski e Rickson (2017) sintetizam os distintos fatores relacionados com a carga em suspensão, esquematizada na Figura 6. Em primeiro lugar, faz-se referência à combinação das características das estruturas/coberturas geológicas, topográficas, climáticas e da cobertura do solo como determinante na distribuição espacial da erosão do solo (geração do sedimento) e da transferência de sedimentos que regulam a concentração de sedimentos em qualquer ponto do rio.

O segundo fator referido, é a conectividade de sedimento (nomeado em outros trabalhos como ‘*sediment cascade*’) dentro da bacia, que apresenta uma influência direta na quantidade de sólidos que chega ao canal fluvial. Vista de outra forma, possíveis bloqueios diminuirão a eficiência na transferência de sedimentos que chegam ao rio (FRYIRS *et al.*, 2007; Fryirs, 2013; ZANANDREA *et al.*, 2020).

Em terceiro lugar, o transporte de sedimentos é dependente da capacidade do rio para transportar certo sedimento com um diâmetro determinado em relação à energia do fluxo. Uma diminuição de velocidade do fluxo ou turbulência implicarão uma tendência de processos de deposição local.

Somada a esta complexidade espacial no transporte de sedimentos em suspensão, os autores delineiam uma variabilidade temporal categorizada em quatro fatores principais: o primeiro deles são as condições hidrometeorológicas imperantes em curtos períodos de tempo como a longo prazo. Parâmetros de precipitação, vazão, pico de vazão, descarga total liquida, tempo de ascensão e recessão do hidrograma, duração total de um evento de precipitação, chuva máxima de curto período, intensidade de chuvas, chuvas antecedentes são ponderados na estimativa de transferência de material ao fluxo.

Figura 6 - Fatores espaciais e temporais envolvidos no transporte de SS na escala de bacia hidrográfica.



Fonte: Tomado de (Vercruysse, Grabowski and Rickson, 2017).

O transporte de SS varia: (i) dependendo espacialmente das interações entre (a) características da bacia hidrográfica (por exemplo, geologia, uso da terra, clima, topografia), (b) conectividade da bacia hidrográfica influenciada por bloqueios e (c) capacidade de transporte fluvial; e (ii) temporalmente, dependendo da interação entre fatores hidrometeorológicos, variações na fonte de sedimentos, distúrbios naturais da paisagem e intervenções humanas.

As mudanças nos pontos de fornecimento inicial de sedimentos são o segundo fator que muda frequentemente como resultado das interações entre as características físicas da bacia hidrográfica e os processos hidrometeorológicos, por

exemplo, durante eventos individuais de precipitação, o suprimento de material pode ficar limitado devido à persistência das descargas liquidas ou caso contrário diversas fonte podem se interconectar ao longo do tempo.

No mesmo sentido, os distúrbios naturais da paisagem em grande escala, como deslizamentos de terra ou incêndios florestais podem provocam aumentos na disponibilidade e transferência de sedimentos. E finalmente, as intervenções de origem antrópica podem causar grandes alterações na dinâmica sedimentar, como redução de entrada de sedimentos, reflexo de represamento de sedimentos por barragens e reservatórios ou praticas conservacionista da água e do solo, em contrapartida, aumento das cargas de sedimentos como resultado da erosão por uso inadequado da terra, atividades de mineração ou obras de construção.

2.3. MONITORAMENTO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO E NOVAS TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO

2.3.1. Métodos e protocolos tradicionais de monitoramento de sedimentos em suspensão

Segundo Carvalho (2008), a parcela da descarga de sedimentos suspensos representam a maior porcentagem de descarga sólida na maioria dos cursos d'agua com cerca de 90%. Sendo que a aplicação de qualquer tipo de monitoramento para material em suspensão será dependente dos tipos de dados necessários que, por sua vez, dependem do objetivo traçado inicialmente (DIPLAS et al. 2008).

Métodos tradicionais para amostragem e quantificação de descarga em suspensão presentam os primeiros registros no início do século XVIII, com investigações em rios na França, Alemanha e Estados Unidos (FISP, 1940). Já para o século XIX, os métodos de integração na vertical e amostradores hidrodinâmicos foram desenvolvidos e estandardizados principalmente com atividades do Serviço Geológico dos Estados Unidos, USGS, e outras agências reunidas pelo "Committee on Sedimentation of the Federal Water Resources Council", (GRAY E LANDERS, 2014).

Diplas et al. (2008) descrevem duas categorias principais para os amostradores tradicionais de sedimentos em suspensão:

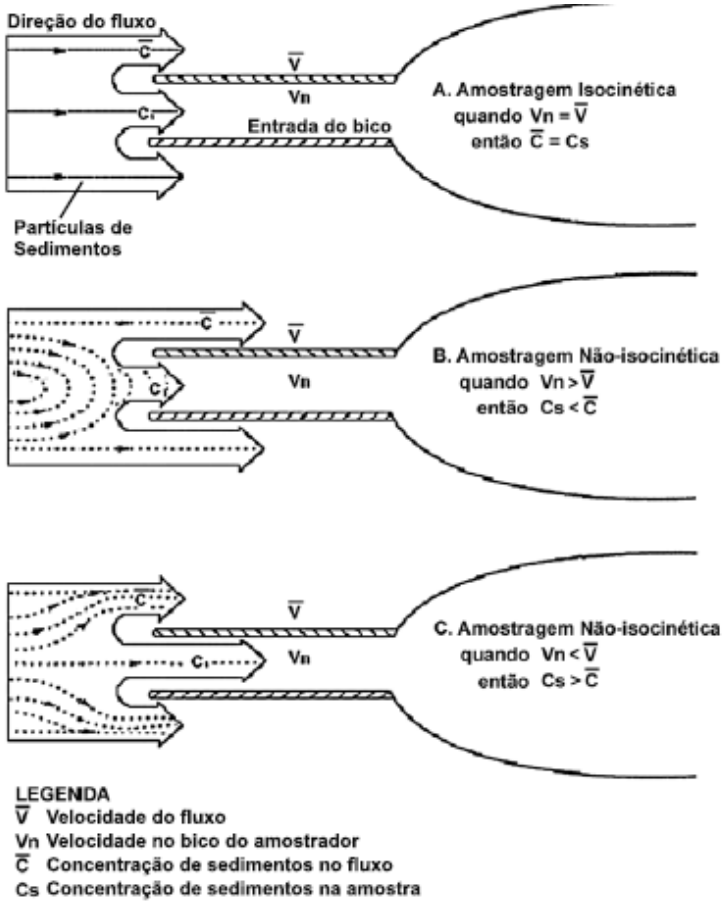
1. Amostradores operados manualmente,
2. Amostradores automáticos.

Em relação às amostragens manuais, existem amostradores instantâneos e amostradores isocinéticos. Os primeiros são usados em fluxos onde não é requerido uma amostragem isocinética, para rios com profundidades menores a 0,3 m ou com velocidades menores de 0,5-0,6 m^3/s que tendem a apresentar uma granulometria fina representativa em toda a profundidade. Já os amostradores isocinéticos, são referidos a aqueles onde é requerida uma coleta que não altere a velocidade nem a direção do escoamento. Nessas condições, o amostrador calibrado coletará uma amostra com concentração e distribuição de tamanho inalterada e representativa do transporte no momento em que foi feita a coleta, tal como é esquematizado na figura 7. A porcentagem de erro em amostragem não isocinéticas tende a crescer com o incremento na quantidade e tamanho da porção de tamanho areia nos sedimentos suspensos (Gray and Landers, 2014).

Para Diplas et al. (2008), em teoria, o melhor método para realização de amostragem em qualquer rio seria a amostragem de todo o fluxo e consequentemente do sedimento suspenso durante um período de tempo determinado, porém, este método é praticamente inviável na maioria dos casos. Neste sentido, são requeridos processos de amostragens integradoras na seção do rio, que definam uma concentração média ponderada em profundidade numa vertical qualquer onde a velocidade de trânsito do amostrador é constante (integração na vertical) e coletas em verticais suficientes que promovam umas concentração média ponderada da descarga ao longo da largura da seção (método de igual incremento de largura, IIL, ou método de igual incremento de descarga, IID) para um posterior cálculo da descarga sólida em suspensão, distribuição granulométrica e outras análises.

Dentro dos amostradores automáticos, encontram-se os de estágio único, que são dependentes das variações do nível d'água coletando passivamente na fase ascendente do hidrograma (DIPLAS *et al.*, 2008) e os amostradores de bombeamento que foram desenvolvidos mais recentemente, na década dos 70´s, como é evidenciado nos trabalhos pioneiros de Walling e Teed (1971) que descrevem o funcionamento básico do equipamento, sua utilização e comparação consistente com amostras tomadas manualmente numa pequena bacia hidrográfica na Inglaterra e de igual forma pelo FISP nos Estados Unidos, relatado no informe de Brakensiek, Osborn e Rawls (1979).

Figura 7 - Amostragem isocinética e não isocinética e sua influência na CSS coletada.



Fonte: Tomado de (EDWARDS; GLYSSON, 1999, citado por MERTEN et al., 2014).

Diversos são os equipamentos desenvolvidos para a consecução de análises quantitativas e qualitativas de sedimentos em suspensão. Nos trabalhos e informes de Edwards e Glysson (1999), International Atomic Energy Agency (IAEA, 2005), Morris e Fan (1998), World Meteorological Organization (WMO, 2003) descrevem-se em detalhe os procedimentos de medição e os amostradores usados com maior frequência. Carvalho (2008), Carvalho e Hora (2014) e Merten et al. (2014) apresentam cada um dos amostradores usualmente empregados em estudos no Brasil, com destaque do DH-48, Dh-59, D-49, de saca compressível, P-46 e D-49 de fabricação nacional.

WMO (2003) assinala que a frequência de amostragem dependerá das características do escoamento superficial da bacia hidrográfica, reconhecendo que 70 a 90% da carga anual de sedimentos é transportada nos períodos de cheias. Nesse

sentido, medições com maior frequência, empregando amostradores automáticos, são bem-sucedidas em eventos de cheias para definir com precisão a concentração de sedimentos (amostragem horária ou com maior frequência). Edwards e Glysson (1999) propõem que, geralmente, o número de amostras deve ser quatro vezes maior durante a onda de cheia em relação a frequência de amostras tomadas na descida do hidrograma para uma adequada cobertura do evento.

Para períodos de baixa vazão pode-se optar por frequências de amostragem distribuídas diariamente, semanalmente ou até mensalmente, segundo o caso. Porém, não se deve observar somente as características de precipitação e descarga individualizadas, pois como já foi referido no item 2.2.2 a disponibilidade das fontes e transferência do material para a calha do rio efetuam também um papel fundamental nas variações das taxas de transporte em suspensão. Merten et al. (2014) propõem a valorização das características físicas da bacia, como o tamanho e as próprias variações no uso do solo (bacias urbanas e rurais) e cobertura vegetal para a definição dos intervalos de coletas.

Gray e Landers (2014) consideram que os dados de CSS e DSS provenientes das análises de amostras físicas, coletadas com ajuda de amostradores apropriados e protocolos estruturados, tendo em consideração a resolução temporal para as diversas condições hidrológicas-sedimentares e a resolução espacial em toda a seção transversal do rio, são considerados os mais confiáveis e precisos.

Contudo, para qualquer tipo de estimação deve ser percebido o efeito plausível de vários tipos de erros provenientes da estimação de descarga liquida (incerteza do próprio equipamento, erros no momento da medição da largura e posição das verticais e profundidades, erros devido às condições do próprio local e até má leitura das anotações de campo), erros dos processos de amostragem, erros analíticos laboratoriais e de cálculo e erros na calibração de amostras de um local fixo em relação das amostras de seção transversal, até valoração da expertise da equipe de campo. Sendo que em condições adequadas de medição e qualidade dos dados, a carga medida pode ter uma precisão esperada de ±15% (CARVALHO, BIANCARDINI E STRASSER, 2014; GRAY E LANDERS, 2014).

Gray (2003) ressalta que embora os dados a partir de amostragem físicas sejam considerados os “melhores” disponíveis (mais precisos, confiáveis e comparáveis). As técnicas, em casos de coletas intensivas de dados, podem resultar em custos elevados e amostragens potencialmente inseguros no local que podem

impossibilitar a própria coleta, em condições de escoamento que os amostradores manuais não conseguem ser implementados e que simultaneamente são os períodos em que os dados de CSS são mais influentes, somado ao gasto operacional na computação de um número elevado de valores unitários para interpolação de concentrações diárias e a necessidade de estimação de valores em períodos amostrados.

2.3.2. Métodos substitutos para o monitoramento de sedimentos em suspensão

Entende-se as limitações concernentes às amostragens referidas como tradicionais, as novas tecnologias substitutas de monitoramento continuo de sedimentos se apresentam como alternativas viáveis de implementação no estado atual de aplicações tecnológicas, em que ferramentas computacionais precisam de dados robustos para modelagens representativos acordes à realidade do fenômeno estudado.

Assim, os métodos substitutos são definidos por Gray et al. (2010) como instrumentos que ao serem acoplados a rotinas operacionais e analíticas fornecem a aquisição de um conjunto de dados de processos hidrossedimentométricos temporal e/ou espacialmente densos, sem a necessidade de coleta e análise de rotina de amostras físicas (métodos convencionais), excetuando os procedimentos para fins de calibração dos equipamentos.

Gray (2003) e Gray et al. (2010) expressa que o uso de tecnologias apropriadas de medições substitutas de sedimentos provavelmente reduziria o custo de produção de dados de sedimentos, reduzindo deste modo o número de análises de amostras de sedimentos e visitas ao local. Outros benefícios seriam a redução do tempo e esforço nas interpolações e estimativas de CSS que são demoradas.

Gray et al. (2010) e IAEA (2005) fazem uma descrição em detalhe dos distintos métodos substitutos para monitoramento de SS, alguns com uma maior difusão no meio cientifico como os métodos que empregam turbidimetria, difração a laser e propriedades acústicas como o retroespalhamento acústico em frequência fixa e métodos nucleares e de traçadores, por outro lado, outros métodos ainda num estado mais embrionário como as imagens digitais óticas, o método de diferença de pressão e os acústicos multifrequências.

Com todas as vantagens e limitações de adaptação e uso dos métodos substitutos de monitoramento, Loureiro, (2008) destaca que não é possível deixar de lado os instrumentos mecânicos simples, devido à sua robustez, facilidade de manuseio e a necessidade de calibração, sendo que a precisão/confiabilidade das curvas de calibração definiram a qualidade dos dados tomados por métodos alternativos.

2.4. MEDIDAS DE TURBIDEZ PARA ESTIMATIVA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO.

Comumente, a turbidez, junto com o disco Secchi e o disco negro são usados na quantificação da claridade da água e como parâmetro em relação à qualidade óptica das águas por agências ambientais e empresas de abastecimento de água no mundo inteiro (WEST E SCOTT, 2016), porém, nos últimos 40 anos vêm desenvolvendo-se estudos relacionando os valores de turbidez com a concentração de sedimentos suspensos nos corpos de água, a continuação faz-se uma compilação da teoria física que sustenta esta ferramenta, suas vantagens e limitações no seu uso, como também uma síntese da evolução histórica e procedimental no emprego de métodos de turbidez para quantificação de descarga solida em suspensão.

2.4.1 Turbidez e suas aplicações

Na sua definição básica, a turbidez é uma expressão das propriedades óticas de uma amostra que causa com que os raios de luz sejam dispersos e absorvidos em vez de ser transmitidos em linhas retas através da amostra (Anderson, 2005; ASTM International, 2017). A turbidez da água é o resultado do material gasoso, líquido ou sólido dissolvido e suspenso de natureza orgânica ou inorgânica, não sendo uma propriedade inerente da água, a diferença da temperatura ou pH (DAVIES-COLLEY E SMITH, 2001; ASTM INTERNATIONAL, 2017).

Uma partícula minúscula qualquer é capaz de interagir com a luz incidente absorvendo parte da energia luminosa e, como se fosse uma fonte de luz pontual, pode re-irradiar outras porções em todas as direções (SADAR, 1998, 1999). Um aspecto interessante segundo este autor é que nenhuma solução terá uma turbidez

igual a zero, pois até as próprias moléculas que compõem a amostra interferem na transmitância da luz, espalhando-a um certo grau.

A turbidez é um indicador de saúde ambiental dos corpos de água, sendo indesejável na água para abastecimento público, nas águas dos efluentes das plantas, na água para processamento de alimentos e bebidas e em um grande número de outros processos de fabricação dependentes da água. A remoção da matéria em suspensão é realizada por coagulação, sedimentação e filtração (ASTM INTERNATIONAL, 2017).

Assim, as medições de turbidez das águas apresentam-se como um meio rápido de controle de processos, seguindo as especificações técnicas particulares. Exemplos de diferentes usos para dados de turbidez, são indicados por Anderson (2005) e Gray e Glysson (2003):

1. Regular e manter a clareza da água potável.
2. Determinação da clareza da água para organismos aquáticos.
3. Indicando deficiência visual na água.
4. Monitoramento em tempo real que indica condições da bacia hidrográfica.
5. Desenvolvimento de medição substituta para a concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e outros constituintes.
6. Monitorar os efeitos do desenvolvimento da terra e atividades humanas relacionadas e o gerenciamento subsequente dos recursos naturais.
7. Determinação do transporte de contaminantes associados a materiais em suspensão.

2.4.2. Teoria da turbidimetria e tipos de turbidímetros

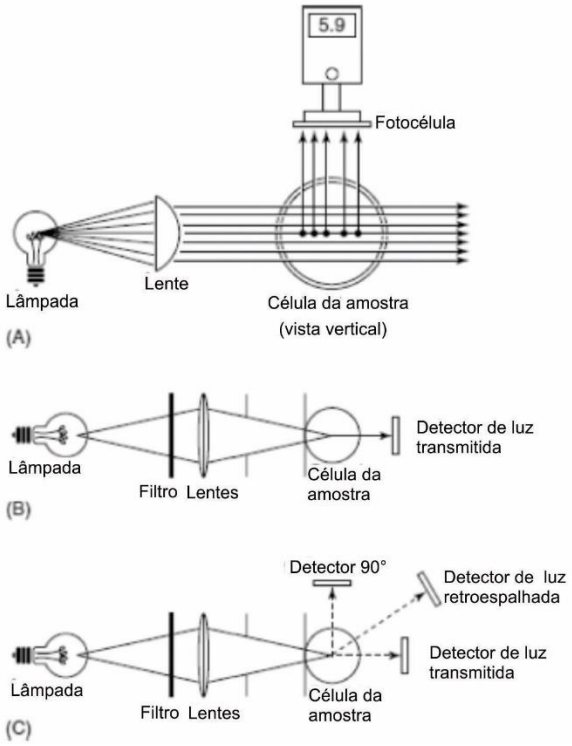
A turbidez, não se encontra diretamente relacionada aos tipos e formas específicas de partículas no fluido, considerando-se uma medida altamente qualitativa, mas, quando são usados padrões e protocolos o método pode se tornar muito mais quantitativo (SADAR, 1999).

Gray e Gartner (2010) e Wren (2003) assinalam que os instrumentos para medição de turbidez são projetados para medir as propriedades ópticas da água de uma das duas formas: turbidímetros ou transmissômetros, ambos quantificando as perdas de intensidade de um feixe de luz numa distância definida usando informações

de calibração empírica especificas de cada equipamento, variando no ângulo de detecção, a Figura 8, detalha a dispersão de luz e o mecanismo básico de funcionamento do turbidímetro.

Os turbidímetros nefelométricos detectam a luz no espetro visível ou infravermelho dispersa em um ângulo de 90º em relação à direção da luz incidente desde a fonte, o valor é expressado em unidades NTU (*Nephelometric turbidity Units*), sendo a configuração mais utilizada mundialmente e tendo como principais benefícios sua consistência e sensibilidade a partículas com uma ampla faixa de tamanhos (SADAR, 1999; GRAY E GARTNER, 2009, 2010; PERKS, 2013).

Figura 8 - Diferentes configurações para medição de turbidez.



Fonte: Tomado de: (Lawler, 2016).
(a) Medição a 90° - nefelométrica; (b) Medição a 180° - Transmisometria, e (C) Turbidimetro composto com detector em ângulo diferente (Turbidimetro de luz retroespalhada).

Transmisometria é realizada quando a detecção pelo sensor é feita na posição a 180º (Frontal-direta) em relação a feixe de luz incidente, tipicamente dentro da faixa visível do espetro eletromagnético próximo a 660 nm (Gray and Gartner, 2010; Perks, 2013). Os turbidimetros OBS por suas siglas em inglês (Optical Backscatterance instrument) são um tipo de nefelómetro configurado para uma medição entre a fonte e o detector com um ângulo inferior a 90° da luz retroespalhada podendo ser no espetro visível ou infravermelho próximo (RASMUSSEN et al., 2009). Para fins de

computação de CSS é de uso comum os sensores nefelométricos e OBS (GRAY E GARTNER, 2006).

Anderson (2005) indica que os valores de turbidez devem ser expressos em uma das 10 unidades diferentes definidas, incluindo as mais comuns como as unidades nefelométricas de turbidez (NTU) e unidades nefelométricas de Formazina (FNU), na Tabela 1 são descritos os diferentes tipos de turbidimetros, suas características e as unidades de medição empregadas.

É importante apontar a não equivalência nas medições de turbidez feitas com instrumentos compostos por diferentes configurações de detectores e fontes de luz, sendo este o fator crítico no desenho da instrumentação (DAVIES-COLLEY E SMITH, 2001). Em relação a este tópico, Lewis, Eads e klein (2007) fizeram um estudo comparativo experimental entre oito diferentes turbidimetros empregando amostras de sedimentos de bacias hidrográficas no litoral norte da Califórnia, EEUU, encontrado diferenças em até um fator de três vezes nos valores medidos entre um turbidímetro em relação aos outros.

Estudos mais recentes como o de Merten, Capel e Minella (2014) e Rymszewicz et al. (2017) também relatam a diferença de sensibilidade nas medições entre diferentes turbidimetros para valores determinados de CSS e proporção de frações granulométricas nas amostras. Também inclusive em sensores idênticos são esperadas respostas diferenciadas por causa das próprias características de estabilidade do instrumento e capacidade de identificação no sinal, tal como foi analisado por Sari, Castro e Kobiyama (2015) usando três sondas turbidimétricas da marca FTS modelo DTS-12.

2.4.3. Fatores que alteram o sensor

São várias os fatores que podem afetar o valor de leitura de turbidez, entre eles, a estrutura interna do equipamento que foi discutida na seção anterior, outrossim, as características da mistura água-sedimento são cruciais no momento de interpretação das medições e valoração das correlações com sedimentos em suspensão.

Tamanho, forma, e cor do particulado em suspensão, entre outras são causadores de viés positivos e negativos nas medições, na Tabela 2 são sintetizados cada um destes fatores de acordo com diversos estudos que enfatizam estas alterações, entre eles: (BAKER E LAVELLE, 1984; CAMPBELL E SPINRAD, 1987;

LUDWIG E HANES, 1990; CONNER E DE VISSER, 1992; FOSTER, MILLINGTON E GREW, 1992; GIPPEL, 1995; SADAR, 1998, 1999, 2004; SUTHERLAND et al., 2000; DAVIES-COLLEY E SMITH, 2001; ZIEGLER, 2003A, 2003B; ANDERSON, 2005; DOWNING, 2005; RASMUSSEN *et al.*, 2009; PERKS, 2013; SARI, CASTRO E KOBIYAMA, 2015; SARI *et al.*, 2017; VOICHICK, TOPPING E GRIFFITHS, 2018; BRIGHT, MAGER E HORTON, 2018)

Tabela 1 -Especificações técnicas para instrumentos de medição de turbidez.

Fonte de Luz (Pico de emissão)	**Fonte de luz**	**Ângulo de detecção**	**Detector simples o múltipla**	**Unidade designada**
Luz Branca (400-680 nm)	Simples	90°	Simples	NTU (unidade turbidimétrica nefelométrica)
Luz Branca (400-680 nm)	Simples	90°	Múltiplos detectores, radio compensação	NTRU (unidades de taxa de turbidez nefelométrica)
Luz Branca (400-680 nm)	Simples	30 (+-15º)	Simples	BU (unidade de retroespalhamento)
Luz Branca (400-680 nm)	Simples	180º	Simples	AU (unidade de atenuação)
Luz Branca (400-680 nm)	Múltipla	90°(outros ângulos para cada feixe de luz)	Múltipla	NTMU (Unidade de múltiplos feixes de turbidez nefelométrica)
Infravermelho próximo (780-900 nm)	Simples	90º	Simples	FNU (unidades nefelométricas de formazina)
Infravermelho próximo (780-900 nm)	Simples	90°	Múltiplos detectores, radio compensação	FNRU (unidades de taxa nefelométrica de formazina
Infravermelho próximo (780-900 nm) ou monocromática	Simples	30 (+-15º)	Simples	FBU (unidades de retroespalhamento de formazina)
Infravermelho próximo (780-900 nm) ou monocromática	Simples	180°	Simples	FAU (unidades de atenuação de formazinha)
Infravermelho próximo (780-900 nm) ou monocromática	Múltipla	90°(outros ângulos para cada feixe de luz)	Múltipla	FNMU (Unidades de múltiplos feixes nefelométrica de formazinha.

Fonte: Modificado de: (Anderson, 2005; Rasmussen *et al.*, 2009).

Tabela 2 - Fatores de influência e seu efeito na medição de turbidez.

Fator de influência	Detalhes	Efeito
Absorção de luz	A matriz de partículas que absorvem a luz impede que a luz chegue ao sistema de detecção	Negativo
Tamanho das partículas	Partículas maiores espalham comprimentos de onda mais longos da luz com mais eficiência; Partículas menores espalham comprimentos de onda curtos da luz com mais eficiência	Positivo ou negativo
Bolhas	Afetam a precisão da medição.	Positivo
Variação na cubeta da amostra	Arranhões, ranhuras, gorduras podem fazer com que a radiação sofra refração ou reflexão	Positivo ou negativo
Dispersão de luz	Luz medida pela detecção devido a imperfeições, reflexão interna e contaminação ou ruído eletrônico	Positivo
Sedimentação de partículas	Resultado da rápida sedimentação e depende do tempo para realizar a medição	Positivo ou negativo
Instrumento	Deterioração do desempenho ótico do instrumento.	Positivo ou negativo
Contaminação	Introdução de material externo de diversas fontes.	Positivo

Fonte: Tomado de: (Sadar, 1998, 2004; Bright, Mager and Horton, 2018).

2.4.4. Estudos de transporte de sedimentos aplicando métodos substitutos de turbidez

O aumento na utilização de métodos alternativos de monitoramento de SS em procura de uma maior resolução espaço-temporal dos dados com um custo admissível, tem levado ao aperfeiçoamento na aplicação de técnicas turbidimétricas em bacias hidrográficas e em ambientes costeiros. Uma linha de tempo elucidando o desenvolvimento desta técnica desde sua invenção até as investigações mais atuais é apresentada na Figura 9.

O primeiro trabalho do qual tem-se referência foi relatado no informe do FISP (1940) desenvolvido por Jakuschoff (1932) projetada como uma célula fotoelétrica conectada a um galvanômetro que registrava a diferencia de intensidade da corrente elétrica conforme a intensidade do feixe de luz dentro da célula, concluindo prematuramente que o método não era suficientemente prático pela falta de confiabilidade das correlações e a necessidade de frequentes calibrações.

Já na investigação de Grassy (1943) no rio Enoree, nos Estados Unidos, foram encontrados padrões que relacionavam as medições de turbidez com o material em

suspensão do rio, relatando as precauções no momento do calcular a DSS com series históricas de turbidez, começando assim, um campo de investigação e desenvolvimento tecnológico, que são expostos em diversos trabalhos a partir da década dos 60 em ambientes continentais (FLEMING, 1967; Walling, 1977; TRUHLAR, 1978; GROBLER e WEAVER, 1981) como litorâneos (HARLETT E KULM, 1973; DOWNING, STERNBERG E LISTER, 1981).

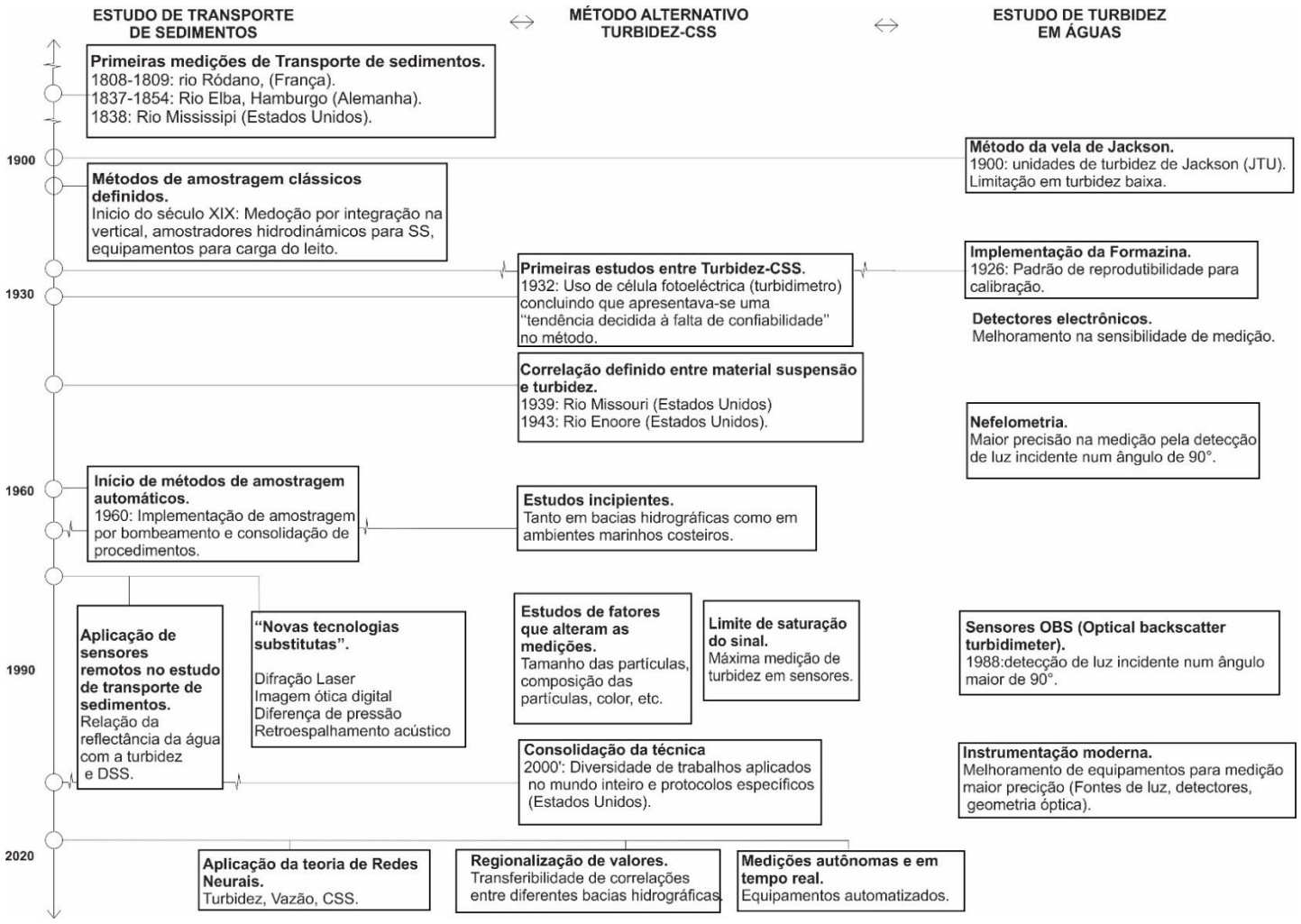
A investigação doutoral de Gippel (1988), além de apresentar uma revisão dos trabalhos realizados até aquele momento que envolviam propriedades óticas com medições de transporte de SS, desenvolve tópicos teóricos dos fatores que influenciam as medições de turbidez e faz uma análise completa dos custos, erros, dificuldades e vantagens de implementação numa bacia hidrográfica no sudeste de Nova Gales do Sul, Austrália.

Novos equipamentos foram desenvolvidos para ser adaptados em campo em medições *in situ* como os medidores OBS (DOWNING, 1989), com maior precisão e resolvendo algumas das influências externas e internas nas medições, além de visar um menor custo de fabricação que até o momento segue sendo foco de investigação (KIRKEY, BONNER E FULLER, 2018; DIAS et al., 2019; MATOS et al., 2019) .

No ano de 2009, O USGS incorporou as medições de turbidez para uso em programas operacionais de monitoramento de SS nos Estados Unidos, sendo a primeira tecnologia substituta em receber este aval (GRAY AND GARTNER, 2010). Os manuais procedimentais de Lewis e Eads (2009) e Rasmussen et al (2009) apresentam os protocolos técnicos visando uma boa consecução do método.

Outra das aplicações da turbidez nos estudos de transporte de sedimentos é sua relação com a propriedade de refletância espectral em monitoramentos com sensores remotos. Munday; Afoldi; Amos (1981) já comentavam a possível correlação das medições de turbidez e claridade da água com o disco Secchi com valores de cromaticidade de imagens do satélite Landsat. Trabalhos mais recentes demostram bons resultados desta técnica durante analises multitemporais em corpos de água (ALCANTARA et al 2010; KABA, PHILPOT E STEENHUIS, 2014; YEO, LANG E VERMOTE, 2014) e em calibrações de modelagens de sedimentos em bacias hidrográficas de grande escala (FAGUNDES et al., 2020).

Figura 9 - Desenvolvimento histórico das medições de turbidez, transporte de sedimentos e aplicação da turbidez como medida auxiliar de CSS.



Fonte: Autoria própria.

Da mesma forma, trabalhos desenvolvidos nos últimos anos usando monitoramentos contínuos de turbidez para analisar o transporte de sedimentos em suspensão em bacias hidrográficas no intuito de compreender as dinâmicas de fluxo em eventos de chuva. García e Harrington (2019) dispuseram deste método na comparação de três modelos de avaliação da CSS em picos de cheia na bacia do rio Bando, Irlanda reconhecendo a influência do armazenamento de material fino na camada do leito e dos períodos secos que precedem os eventos monitorados.

River e Richardson (2019) combinaram o monitoramento com sensores óticos e técnicas laboratoriais (Difração a laser e Microscopia eletrônica de varredura) para determinar as variações granulométricas, mineralógicas e químicas ao longo do hidrograma de cheia em quatro córregos em Carolina do Norte, concluindo que a própria relação de sólidos suspensos totais e turbidez pode ser indicativa de câmbios na natureza mineralógica das partículas transportadas.

Paralelamente, as correlações de CSS com medições de turbidez podem propiciar um aumento na discretização das medições ao momento de avaliar os efeitos das alterações do clima e do uso do solo como práticas conservacionistas. Os trabalhos de Minella et al. (2018) e Davies-Colley e Hughes (2020) são exemplo desta aplicação, nos quais foi possível interpretar as interações entre as distintas variáveis na produção de sedimentos ao longo de 14 anos numa bacia experimental ao sul do Brasil e numa bacia localizada na ilha norte da Nova Zelândia por cerca de 24 anos de monitoramento, respetivamente.

Novas tendências de investigação e aplicações começam a ser desenvolvidas, uma destas, é a possível transferibilidade de correlações turbidez/CSS entre bacias hidrográficas próximas com características físicas similares (STEFFY E SHANK, 2018); desenvolvimento de monitoramentos autônomos em tempo real (HACHE et al., 2019) e utilização de métodos de aprendizado automático no intuito de conceber correlações mais precisas entre turbidez/CSS (WANG, KERH E TRAORE, 2009; BAYRAM et al., 2014; SARI, CASTRO E PEDROLLO, 2017; COELHO et al., 2020).

2.4.5. Estudos de transporte de sedimentos em suspensão usando métodos alternativos de Turbidez-CSS no Brasil

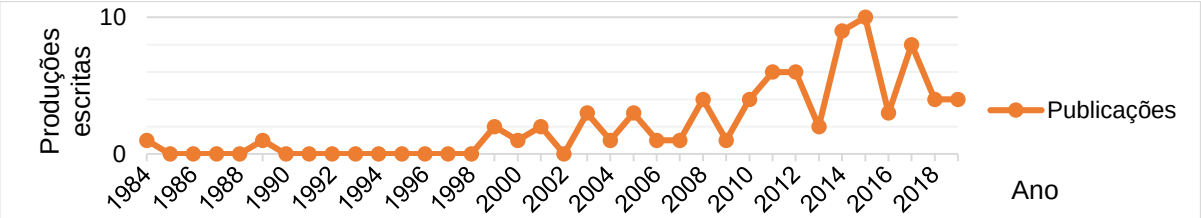
2.4.5.1. Estado atual de pesquisa e distribuição dos estudos que relacionam medições óticas e CSS

Para a obtenção dos trabalhos relacionados foi aplicado dois *Strings* de busca (*Brazil+turbidity+suspended sediment; Brazil+turbidity+monitoring+ transport sediment*) nas bases de dados Scopus®, ScienceDirect® e Compendex®, com a inserção de trabalhos não indexados referidos como literatura cinzenta, sem restrição de idioma, além da exclusão pela não obtenção do trabalho original e da repetitividade de estudos (teses e dissertações) convertidas posteriormente em artigos científicos.

No Anexo 1 são detalhadas as principais características de cada um dos 61 materiais bibliográficos selecionados, como o local de realização do estudo, tipo de medidor empregado, número de pares de dados usados na etapa de calibração, equações encontradas e parâmetros de avaliação.

O primeiro trabalho citado no Brasil envolvendo partículas suspensas e absorção de luz foi desenvolvido em 1984 (GERALDES, 1985 citado por MENDOÇA, 2016). E é no início dos anos 2000 que as medições de turbidez passam a ser consideradas como uma técnica de aplicação dentro de bacias hidrográficas brasileiras em estudos de transporte de sedimentos, na Figura 10 são apresentados os estudos de transporte de sedimento com emprego de propriedades ópticas, perceba-se o considerável crescimento nos últimos dez anos, onde encontra-se aproximadamente 90% da produção total.

Figura 10 - Linha de tempo de trabalhos empregando métodos ópticos (77) como medida indireta da concentração de sedimentos em suspensão.



Fonte: Autoria própria.

Percebe-se uma diversificação quanto aos objetivos propostos e sua própria execução procedimental. Na Tabela 3, apresenta-se os estudos distribuídos segundo a linha de aplicação, evidenciando o amplo desenvolvimento em quanto ao monitoramento em bacias hidrográficas, destaque-se também, o trabalho de Merten et al. (2014) como um protocolo dos procedimentos para a adopção da técnica em bacias hidrográficas brasileiras e a revisão realizada por Sari et al. (2015) que

aprofunda nos diversos fatores que influenciam a estimação da CSS empregando sensores óticos.

Uma distribuição espacial nas 12 regiões hidrográficas brasileiras definidas pela Agencia Nacional das Águas e Saneamento Básico é esquematizada na Figura 11 mostrando a concentração dos estudos nas regiões do Paraná e Atlântico sul que somados chegam ao 68% dos estudos realizados.

Ao menos um estudo foi realizando em 9 das regiões hidrográficas. Até o momento nas regiões de Tocantins-Araguaia, Atlântico Nordeste Ocidental e Paranaíba não se executaram nenhum estudo em relação ao monitoramento e estudo de CSS e medidas óticas na água, isto evidencia a aglomeração destes nas regiões demograficamente mais densas e com maior desenvolvimento econômico, compatível com a distribuição da Rede Hidrometeorológica Nacional da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.

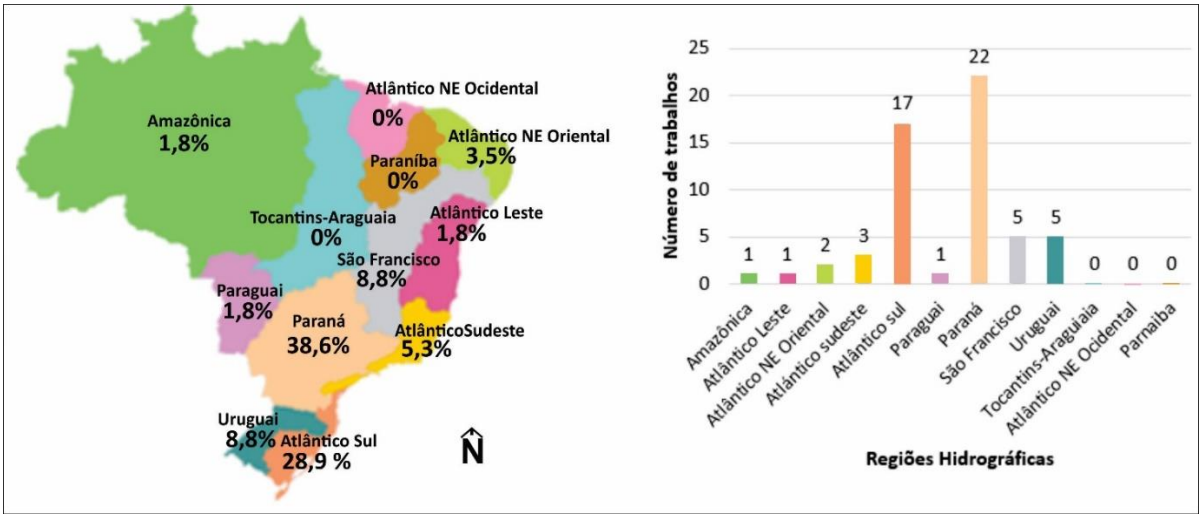
Tabela 3 - Classificação dos estudos em função do tipo de produção científica e sua aplicação.

Tipo	Total	Estudos
Protocolo	1	(Merten *et al.*, 2014)
Revisões	1	(Sari, Castro and Kobiyama, 2015)
Estudos de laboratório	7	(Teixeira and Caliari, 2005; Sari *et al.*, 2012, 2017; Lima *et al.*, 2014; Chagas, 2015; Oliveira *et al.*, 2016; Carvalho, 2017)
Aplicação em bacias hidrográficas brasileiras	52	(Fill and Santos, 2001; Costas, 2003; Carvalho, K.S Paranhos and Paiva, 2004; Cochrane *et al.*, 2004; Tomazoni, Bittencourt and Filho, 2005; Bonumá, 2006; Vestena, Lucini and Kobiyama, 2007; Minella *et al.*, 2008; Vestena, 2008; Bonuma, Gastaldini and Paiva, 2008; Lopes *et al.*, 2009; Guimarães, 2010; Lopes, 2010; Manz, Santos and Paula, 2010; Pereira, 2010; Kobiyama *et al.*, 2011; Lima *et al.*, 2011; Pellegrini *et al.*, 2011; Poletto *et al.*, 2011; Rodrigues, 2011; Silveira, Larissa Silva da Collares *et al.*, 2011; Cardoso, A. T. Kobiyama and Grison, 2012; Barros, 2012; Pereira, Paiva and Dias de Paiva, 2012; Grutka, 2013; Pinheiro *et al.*, 2013; Cardoso, 2014; F. H. de Carvalho, 2014; Santos *et al.*, 2014; Sávio, 2014; Schmidt, 2014; Bartels, Terra and Collares, 2014; Brasil *et al.*, 2014; Aguiar, 2015; Armijos, 2015; Latuf, Cruz and Moura, 2015; Mello, 2015; Petter, Cavalcante and Magalhães, 2015; Bartels, 2015; Teixeira, 2015; Teixeira *et al.*, 2016; Aquino, 2017; Dalbianco *et al.*, 2017; Armijos *et al.*, 2017; Louzada, 2017; Moreira, 2017; Sari, dos Reis Castro and Pedrollo, 2017; Carvalho *et al.*, 2018; De Aquino *et al.*, 2018; Mathi *et al.*, 2018; Oliveira and Queiroz, 2018; CPRM, 2019; Gonçalves, 2019; Latuf *et al.*, 2019; Passos, 2019).

Fonte: Autoria própria.

.

Figura 11 - Distribuição dos estudos nas bacias hidrográfica brasileiras e número de trabalhos publicados.



Fonte: Autoria própria.

2.4.5.2. Dimensão das bacias hidrográficas objeto de estudo

Os sedimentos em grandes canais com inclinações baixas tem menos probabilidade de serem bem misturados em quanto aos seus sedimentos do que canais pequenos com gradientes acentuados, esta distribuição não uniforme na seção transversal, pode dificultar encontrar locais representativos de medição (LEWIS E EADS, 2009).

Um dos trabalhos com maiores desafios identificados em grandes bacias brasileiras com implementação de sensores óticos para monitoramento hidrossedimentométrico foi o desenvolvido no rio Amazonas, a maior bacia hidrográfica do mundo e conhecida por apresentar o fenômeno de não homogeneização das águas, Armijos (2015) considerou uma diferenciação granulométrica entre material fino e areias para a calibração das medidas de turbidez e baseada na teoria do modelo de Rouse definiu perfis de distribuição vertical dos sedimentos ao longo do rio.

Outro estudo em grandes bacias foi realizado por Petter et al. (2015) no rio São Francisco onde encontraram uma correlação satisfatória entre o SS e medidas de turbidez, sendo os valores de vazão fortemente influenciados pelo sistema de reservatórios das usinas hidroelétricas em cascata. Recentemente a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CRPM, 2019) no rio Paraopeba (13.640 km^2)

monitorou a CSS e turbidez em várias seções do rio após o rompimento da barragem de Brumadinho, MG.

Em 47 dos estudos, descrevem-se as características da área das bacias hidrográficas analisadas, chegando num total de 59, já que vários dos estudos fizeram monitoramento em mais de uma bacia hidrográfica. O 75% são em pequenas bacias hidrográficas com área menor a 250 km^2, 22% em bacias de até 250 km^2 e um 5% em grandes bacias de mais de 2500 km^2, a Tabela 4 apresenta a distribuição por área de drenagem.

Destaque-se também o uso de bacias experimentais onde o controle espacial de parâmetros é melhor sucedido, exemplos destes foram efeituados na bacia hidrográfica de Arvorizinha (RS) (MINELLA et al., 2008; PELLEGRINI et al., 2011; BARROS, 2012) e a bacia hidrográfica do Alto Jardim (DF) (LIMA et al., 2011; CARVALHO, 2014).

Tabela 4 - Bacias hidrográficas brasileiras com estudos de transporte de sedimentos em suspensão por métodos ópticos, classificadas por área de drenagem.

Área das bacias hidrográficas (km^2)	**Nº de bacias hidrográficas**
<10	12
10<50	16
50<250	16
250<2500	12
>2500	3
TOTAL	59

Fonte: Autoria própria.

2.4.5.3. Tipos de sensores ópticos empregados em medições de sedimentos em suspensão

A turbidimetria é o parâmetro comumente usados para estimação de CSS. No Brasil, o disco Secchi, um dos instrumentos mais usados para medição de transparência das águas foi usado satisfatoriamente como substituto para estimar a CSS no trabalho de Fill e Santos (2001), estudos internacionais mais recentes, Davies-Colley e Hughes (2020) e West e Scott (2016) empregam o disco preto com

resultados proeminentes de aplicação devido a suas facilidades de manuseio em rios de pequeno porte e em corpos hídricos lênticos.

Dos trabalhos recopilados, 20% dos estudos não especificaram o medidor utilizado e em alguns outros foi usado mais de um equipamento (TONETTO, 2003; TOMAZONI, et al, 2005; PEREIRA, 2010; BARROS, 2012; OLIVEIRA, et al. 2016; CPRM, 2019), sendo que cabe denotar que as medições com diferentes sensores ópticos não são facilmente comparáveis (Lewis, Eads and Klein, 2007; Rymszewicz *et al.*, 2017)). Destaque-se, também, o uso da sonda turbidimétrica de fabricação nacional (Solar SL2000TS) em vários dos trabalhos e o próprio desenvolvimento de um equipamento turbidimétrico para monitoramento de reservatórios em Cochrane et al., (2004). Na Tabela 5 apresenta-se uma classificação dos equipamentos usados em trabalhos no Brasil, sendo as sondas turbidimétricas as mais usadas.

Tabela 5 - Tipos de turbidímetros usados no Brasil.

Tipo de medidor óptico	**Total**	**Porcentagem**
Sonda turbidimétrica	30	56 %
Sonda multiparâmetro	8	15 %
Turbidímetro de bancada	14	26 %
Sonda de elaboração própria	1	2 %
Disco Secchi	1	2 %
TOTAL	54	100 %

Fonte: Autoria própria.

2.4.5.4. Quantidade de dados usados na correlação e período de calibração

A robustez de um modelo de CSS a partir de parâmetros óticos, especificamente no caso da associação com turbidez, a técnica com maior documentação e amadurecimento cientifico, é bastante subjetiva e ainda mais reconhecendo a diversidade de objetivos propostos em cada um dos estudos.

Além, do conhecimento dos fatores de influência na medição de turbidez, das características dos equipamentos empregados (itens 2.4.2 e 2.4.3), e os fatores físico-hidrológicos de influência dentro das bacias hidrográficas (Item 2.2.2), boas práticas na medição e tratamento estatístico dos dados (turbidez-CSS-vazão) para o caso de aplicação em bacias hidrográficas aportarão medidas de maior qualidade ao momento da realização de calibrações (LEWIS E EADS, 2009; MERTEN et al., 2014).

Em vários dos trabalhos apresentam-se mais de uma correlação nos casos em que se faz uma divisão por eventos de chuva, divisão por faixa de medição turbidez-CSS, divisão por faixas granulométricas, divisão por tipo de amostrador empregado de SS como de turbidez, divisão por métodos de calibração ou por estudos que abrangem mais de uma bacia hidrográfica ou sublocais dentro da mesma, totalizando correlações para estimação de CSS.

Em relação à quantidade de amostras usadas no processo de calibração para cada uma das correlações, apresentada na Tabela 6, 36% não levou em consideração a especificação do total de pares de dados utilizados neste processo e um 32% foi realizada com menos de 15 dados de CSS, valores baixos considerando o afirmado por Rasmussem et al. (2011) e Lewis e Eads (2009) onde relatam que um conjunto de dados adequados para um modelo turbidez-CSS consiste em um número apropriado de amostras manuais e instantâneas de CSS com medições simultâneas de turbidez e vazão coletadas em toda a faixa observada de condições hidrológicas durante o período do registro.

Tabela 6 - Distribuição do total de equações de correlação de turbidez-CSS considerando o número de pares de dados para a calibração.

Número de pontos de calibração	**Eq. de correlação**	**porcentagem**
Sem especificar	51	36,4%
>15	44	31,4%
15-25	18	12,9%
25-50	9	6,4%
50-100	12	8,6%
100-500	6	4,3%
TOTAL	140	100%

Fonte: Autoria própria.

Paralelamente, destaque-se a importância de amostragem nos eventos de chuva, Bent e Freeman (2002) afirmam que em muitos córregos e rios, aproximadamente 90% do transporte de sedimentos ocorre em 10% do tempo ainda mais em pequenas bacias hidrográficas que usualmente apresentam uma variabilidade muito mais marcada na CSS; ressalta-se o baixo número de trabalhos que conseguiram definir pontos de amostragem em eventos de chuvas, 18 trabalhos dos 52 realizados em bacias hidrográficas.

Poucos valores temporalmente distribuídos ao longo de período amplo de amostragem podem cobrir melhor o espectro de valores, que no caso contrário, onde existe um maior número de dados em um tempo mais curto de amostragem que não

definiria bem a DSS total. No entanto, nos trabalhos revisados no Brasil em torno do 46% foram realizados com calibrações pontuais sem levar em consideração se o período de amostragem abrangeu o total de valores de CSS-turbidez-vazão, observado na Tabela 7.

Tabela 7 - Estudos selecionados no Brasil com período de calibração definido.

Período de calibração	**Número de estudo**	**Porcentagem**
Não é requerido (laboratório)	7	12%
sem especificar	28	46%
com período de calibração	25	42%
TOTAL	60	100%

Fonte: Autoria própria.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item descreve-se os métodos utilizados para o monitoramento e análise do transporte de sedimentos em suspensão na parte alta do rio Jundiaí. Wilcock, Pitlick e Cui (2009) frisam que estimativas mais precisas de transporte de sedimentos requerem uma compreensão básicas da história e dinâmica das bacias hidrográficas, seguindo esta premissa foram considerados e adaptados os procedimentos propostos no trabalho de Wilson-Jr (2009), onde podem ser subdividos em três etapas importantes:

1) Conhecimento físico da bacia hidrográfica, envolvendo características geográficas, geológicas, hidrometeorológicas, sedimentológicas, socioeconômicas e históricas, entre outras.

(2) Medições da natureza do movimento sólido, num trecho representativo do escoamento, com campanhas simultâneas de medição de campo: diárias, periódicas e intensivas.

(3) Determinação das propriedades hidrossedimentológicas e correlação com dados de turbidez na parte alta bacia hidrográfica do rio Jundiaí.

A Figura 12 apresenta os métodos de medição de turbidez e das coletas de amostras água-sedimento nas estações de monitoramento, como também a instrumentação e materiais usados em cada uma das etapas. Além, é descrito as técnicas de análise em laboratório de sedimentos em suspensão e os procedimentos estatísticos para a geração da correlação de CSS-turbidez.

3.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E CARACTERÍSTICAS GERAIS

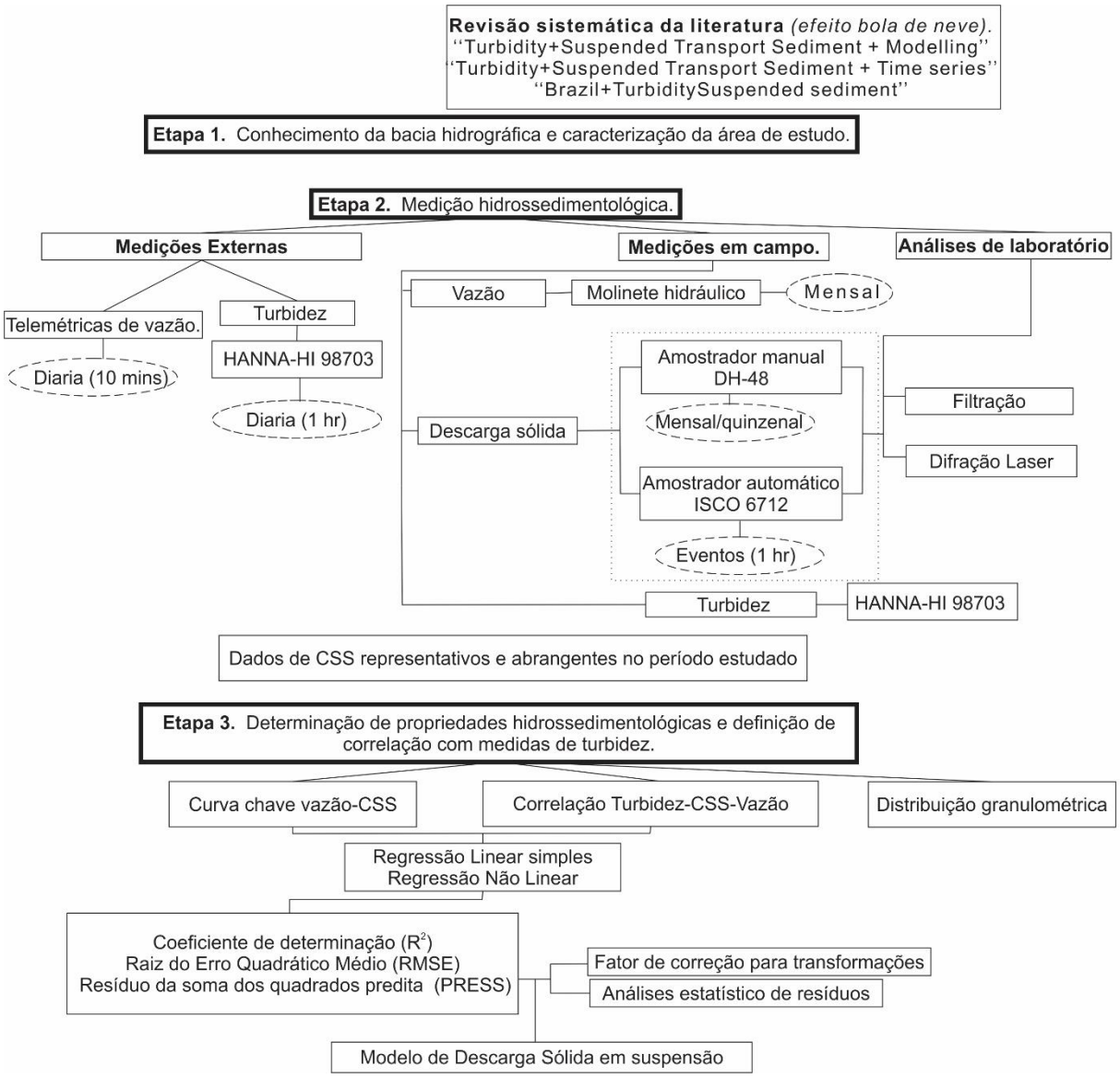
3.1.1. Localização da bacia hidrográfica

A bacia hidrográfica do rio Jundiaí, encontra-se localizada no estado de São Paulo, região sudeste do Brasil. Junto com as bacias adjacentes dos rios Piracicaba e Capivari conformam a unidade número 5 de gerenciamento de recurso hídrico do estado de São Paulo (UGRHI Nº5).

A nascente do rio Jundiaí, encontra-se na Serra da Pedra Vermelha (ribeirão Jundiaizinho), na cidade de Mairiporã, com altitude aproximada de 1.300 metros, fluindo em direção leste 110 km até sua confluência com o rio Tietê na cidade de Salto,

a área total aproximada é 1.154,46 km^2 (CONSORCIO PROFILL-RHAMA, 2020). Já a parte alta da bacia hidrográfica do rio Jundiaí, foco específico do presente estudo, apresenta uma área aproximada de 139,3 m^2. Os municípios de Mairiporã, Atibaia, Jarinu e Campo Limpo Paulista estão inseridos dentro da área de captação.

Figura 12 - Desenho conceptual dos métodos e materiais aplicados ao estudo de TSS na parte alta bacia hidrográfica o rio Jundiaí.



Fonte: Autoria própria.

3.1.2. Características da bacia hidrográfica de estudo

Uma síntese das características físicas e socioeconômicas da parte alta da bacia do rio Jundiaí é apresentada na Tabela 8 e são explicadas nos próximos apartados.

Tabela 8 - Características físicas e socioeconômicas da parte alta da bacia hidrográfica do rio Jundiaí.

Características físicas	
Área	139,3 Km^2
Diferença de altura	1200-745 m.s.n.m
Padrão de drenagem	Dendrítico, assimétrico, triangular.
Solos	Argissolos Vermelhos-Amarelos
Uso do solo	Pastagem e campos, Floresta, Área urbana, Culturas, Reflorestamento, solo exposto, corpos de água.
Características socioeconômicas	
UGRHI	N° 5 (Bacia PCJ)
Municipalidades	Mairiporã, Atibaia, Campo Limpo Paulista, Jarinu.
Aporte económico	23% do PIB desta UGRHI (bacias hidrográficas do rio Jundiaí)
População	75.000 (Total nos municípios inseridos na bacia hidrográfica)

Fonte: Autoria própria.

3.2.1.1. Características físicas

Em relação à geologia da área de estudo, em estudos realizados por Neves (2005) descreve um predomínio amplo de rochas cristalinas pré-cambrianas, descritas em três grupos com rochas granito-gnáissicas do Complexo Amparo, outro com metassedimentos e metavulcânicas do Domínio São Roque e um outro relacionado com rochas ígneas intrusivas com composição granítica a granodiorítica. E em menor proporção encontram-se os depósitos sedimentares quaternários inconsolidados de origem coluvial-eluvial compostos por material argilo-arenoso e grânulos de quartzo de diversos tamanhos se encontram em zonas de releve suave. E os depósitos aluviais compostos pelos próprios sedimentos fluviais depositados ao longo do canal nas planícies aluviais, com granulometrias que vão desde argilosas, passando por areias até cascalho.

Esta zona superior da bacia do rio Jundiaí está inserida dentro da Província Geomorfológica do Planalto Atlântico, considerada assim por Almeida (1964) e Pires

Neto (1996) caracterizado pela presença de morros e morrotes predominando os relevos de tipo denudacional. As características geomorfológicas também são dominadas por estruturas geológicas antigas com reativação tectônica recente relacionado a traçados de zonas de cisalhamento e de falhas regionais (NEVES, et al, 2003; NEVES, 2005).

Na Tabela 9, apresentam-se um compêndio das características morfométricas da bacia, considerando os parâmetros descritos em Back (2014), Das (2021) e Sadhasivam et al. (2020) e usando como modelo digital de elevação imagens do satélite ALOS com uma resolução espacial de 12,5 m, processadas no software ArcGis® e Hidrobacias.

Tabela 9 - Características morfométricas da bacia hidrográfica da parte alta do rio Jundiaí.

Parâmetro	**Abreviatura /Fórmula**	**valor**
Área de drenagem (km^2)	*A*	139,3
Perímetro (km)	*P*	79,1
Comprimento do rio principal (km)	*L*	32,0
Ordem	*O*	4
Coeficiente de compacidade	$K_c = 0{,}282\frac{P}{\sqrt{A}}$	1,890
Fator de forma	$K_f = \frac{A}{{L_x}^2}$	0,198
Índice de circularidade	$D_r = \frac{N}{A}$	0,280
Relevo (m)	$E_{ms} = \frac{1}{4D_b}$	580
Razão de elongação	$I_s = \frac{100(L - E_v)}{L}$	0,503
Perímetro relativo (km)	$S1 = \frac{Hmax - Hmin}{L}$	0,568
Densidade de drenagem (km/km^2)	$I_C = \frac{4\pi A}{P^2}$	1,733
Índice de extensão média do escoamento superficial (km)	$R = Hmax - Hmin$	0,144
Índice de sinuosidade (%)	$R_e = 1{,}1284\frac{\sqrt{A}}{L}$	19,063
Declividade S1 (m/m)	$P_f = \frac{A}{P}$	0,0161

Fonte: Autoria própria.

Os Argissolos Vermelhos-Amerelos estão presentes em quase a totalidade da bacia, segundo a EMBRAPA, 2017 estes são caracterizados por apresentar um alto teor de argila no horizonte B, devido à mobilização desde a parte mais superficial. Baixa fertilidade, acidez, teores elevados de alumínio e suscetibilidade aos processos erosivos estão relacionados a este tipo do solo, está última característica relacionada com sua gradação textural, que implica diferenças de infiltração entre horizontes. No caso do Argissolo Vermelho Amarelo, encontrado na bacia do Jundiaí, os aspectos gerais são a profundidade relativas maiores que 3 metros e boa drenagem (SHINZATO et al, 2008).

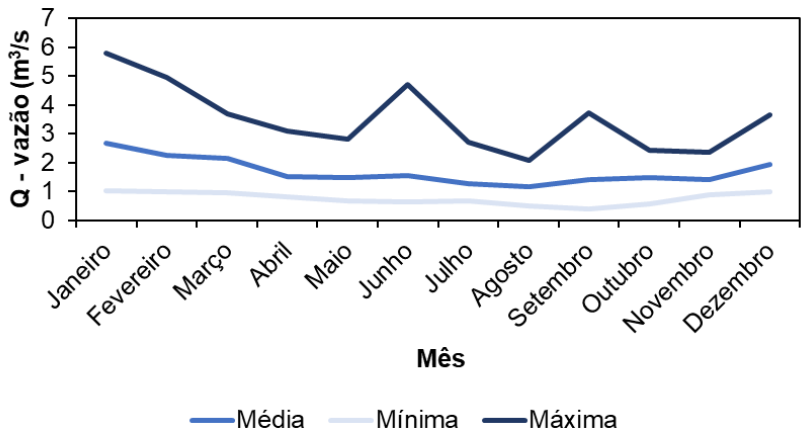
3.2.1.2. Características hidroclimatológicas

O clima segundo Alvares et al (2013) é do tipo *Cfb* húmido subtropical, com influência oceânica, sim uma estação seca e com um verão temperado onde a temperatura média é menor que 22ºC no mês mais quente. A temperatura média anual encontra-se entre os 18 e 22 ºC (Neves, 2005).

Neves (2005); Neves e Cardozo (2006); Neves, Morales e Yoshinagua (2006) descrevem a pluviosidade da bacia do rio Jundiaí com uma média anual entre os 1.200 e 1.800. Os meses mais secos são julho e agosto, com chuvas entre os 25 e 40 mm, em oposição aos meses de dezembro e janeiro, com médias entre 190 a 215 mm.

Com base nos dados da estação da SABESP 3E-108, próxima dos locais de amostragens foi extraído a vazão média mensal, mínima mensal e máxima mensal para os anos compreendidos entre 1980 até o 2002, apresentada na Figura 13.

Figura 13 - Vazões medias históricas da parte alta do rio Jundiaí.



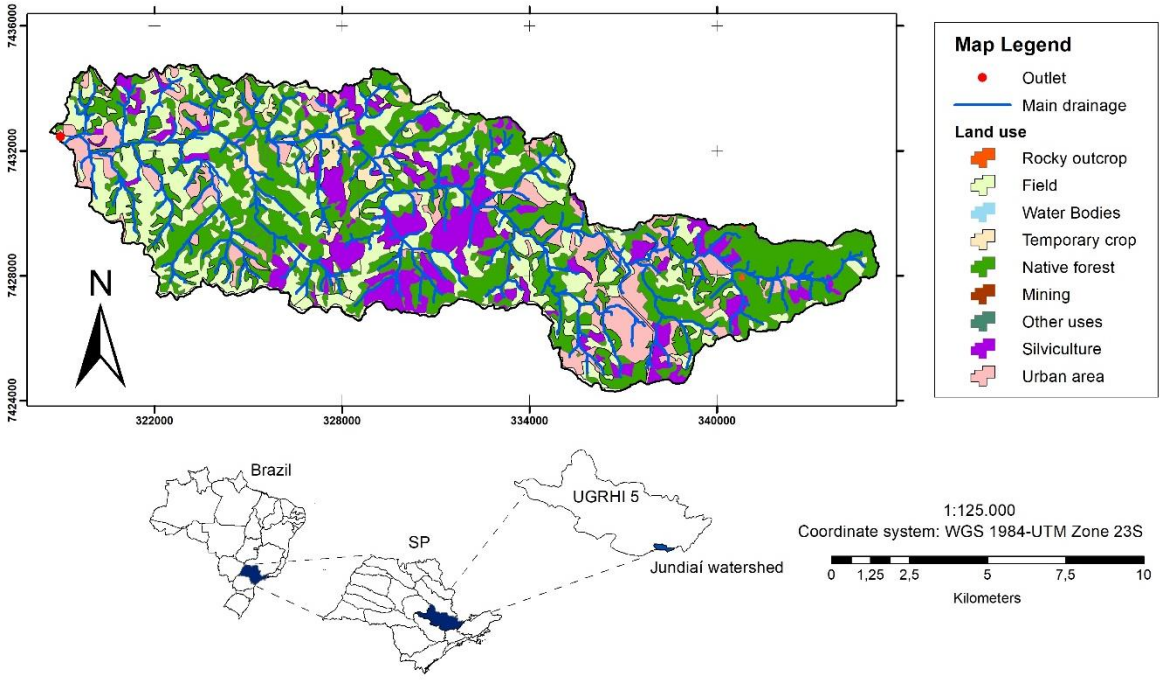
Fonte: Autoria própria baseado em dados do DAEE.

3.2.1.3 Características socioeconômicas e de uso e cobertura do solo.

A bacia do rio Jundiaí, na parte superior é cortada pela rodovia Fernão Dias (Br-381) que cruza em direção sul-norte próxima da nascente no município de Mairiporã, nesta área encontram-se uma área industrial no Distrito de terra preta, (ARGOLLO FERRÃO et al. 2021), os mesmos autores destacam a predominância de áreas rurais ainda que nos últimos anos exista um forte avanço da urbanização e residências de lazer nesta região.

Em quanto aos uso e cobertura do solo (Figura 14), o relatório do plano das bacias PCJ 2020-2035 (CONSORCIO PROHILL-RHAMA, 2020) realizou um mapeamento tendo como base ortofotos dos anos 2010/2011, onde a bacia hidrográfica analisada apresenta uma maior porcentagem de vegetação de mata nativa (42 %) e campos (35,5 %), esta última classe caracterizada pela predominância de gramíneas tanto naturais quanto submetidas ao manejo. Por outro lado, a área urbanizada é aproximadamente de 12,3 % e as áreas florestadas para a indústria madeireira é de 14,9 % e uma pequena parte é dedicada a lavouras temporárias (4,83 %).

Figura 14 - Mapa de usos e cobertura do solo da bacia hidrográfica do rio Jundiaí.

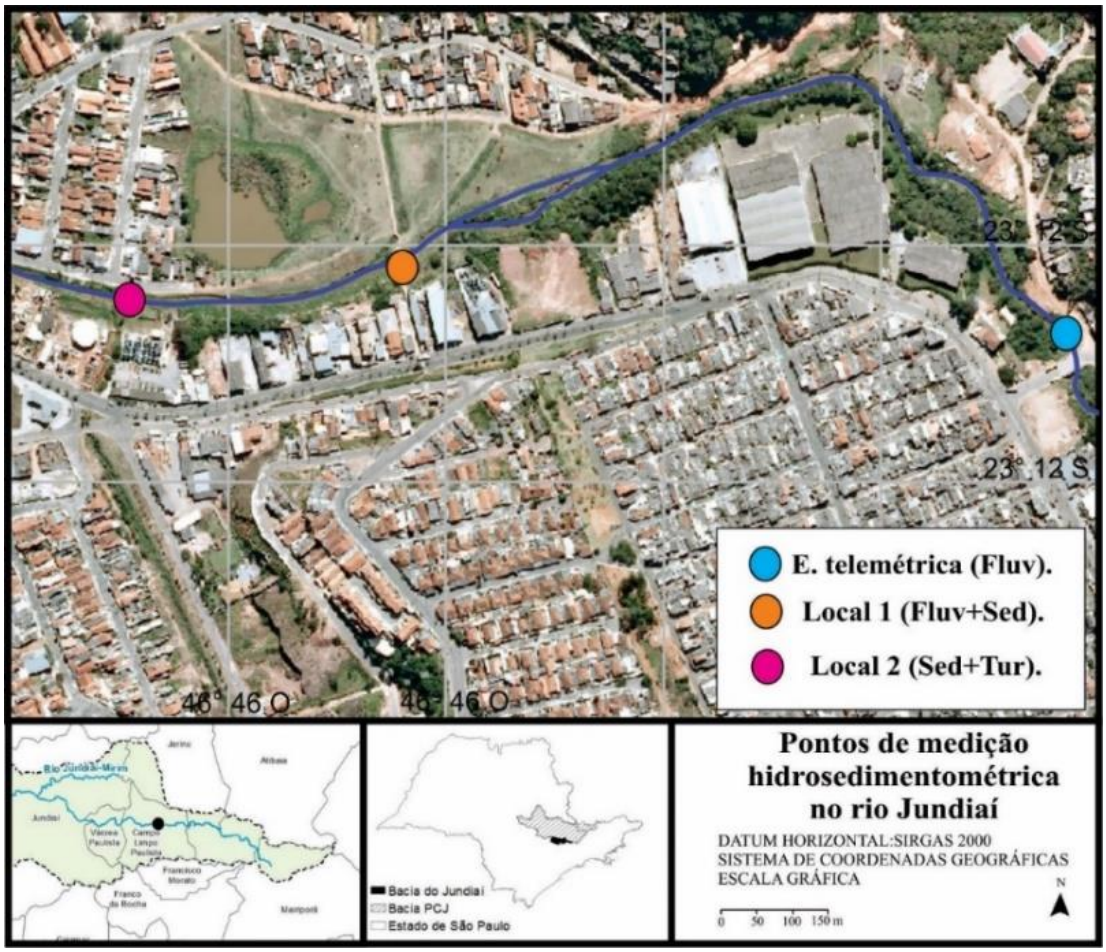


Fonte: Tomado de: Consorcio Profill-Rhama, 2020

3.2. MONITORAMENTO HIDROSSEDIMENTOLÓGICO

Propôs-se a seleção de dois pontos de amostragem de água-sedimento no respectivo rio, como primeiro ponto escolheu-se por sua facilidade de acesso e viabilidade operacional nas atividade de amostragem a passarela no próprio rio Jundiaí contígua à praça SABESP no bairro “Villa Marchetti”, designado como Local 1 com coordenadas: -23.20808374, -46.76642221 e a segunda seção de amostragem, aproximadamente 260 m à jusante do Local 1, localizado imediatamente à montante da estrutura regularizadora de vazão (Coordenadas: -23.20845689, -46.76892928) usada pela SABESP para o funcionamento da Estação de Tratamento de Agua (ETA), descrita como Local 2 na Figura 15.

Figura 15 - Localização das duas seções de amostragem no rio Jundiaí.



Fonte: Autoria própria.

Realizou-se um protocolo de amostragem vinculando as medições de vazão e as amostragens de misturas água-sedimento instantâneas-pontuais e manuais-integradas para o estabelecimento das calibrações com as medidas de turbidez

recebidas de parte da SABESP. Os locais de amostragem são ilustrados detalhadamente na Figura 16, destacando o ponto da captação de água (medição de turbidez) e os dois locais para a medição de sedimentos.

A frequência das visitas de campo traçou-se inicialmente em intervalos mínimos de um mês entre cada uma das medições, ainda que nos períodos de chuvas aumentou-se a regularidade para visitas quinzenais. No intervalo dos meses de março a novembro de 2020 não foi possível a realização das atividades de campo propostas.

É importante salientar que a montante dos pontos de amostragem não existe controles hidráulicos importantes que alterem as condições naturais do fluxo do rio.

3.2.1. Monitoramento fluviométrico

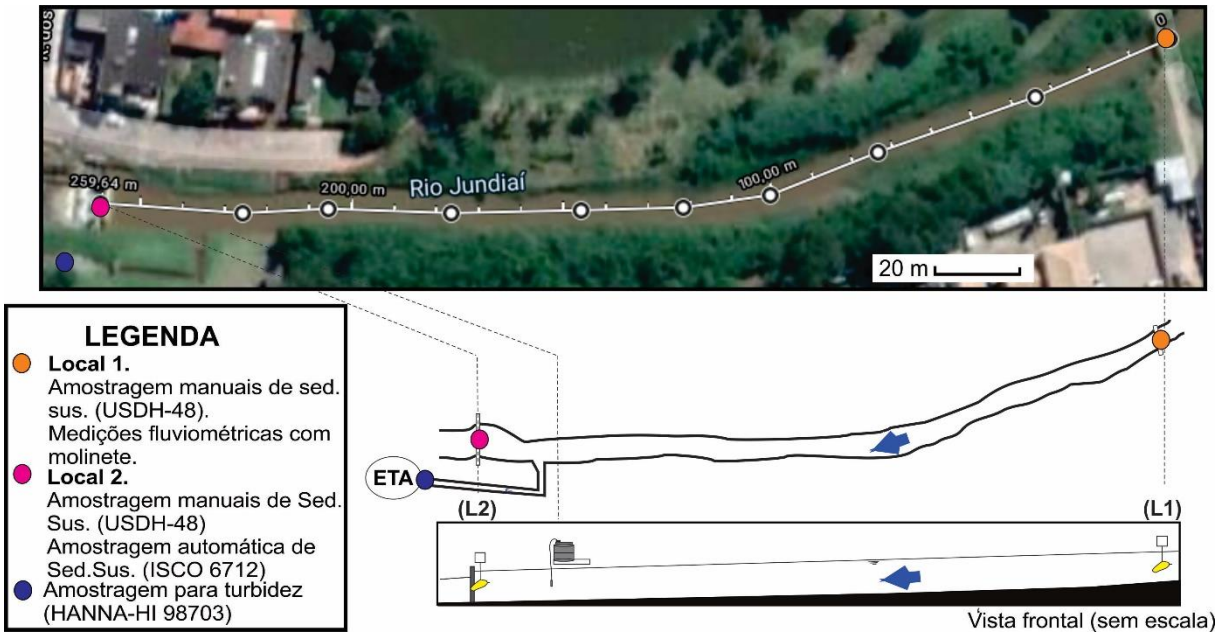
3.2.1.1. Medição de vazão

A descarga líquida é a determinação do volume de água que passa pelo rio em função do tempo. Na parte alta da bacia hidrográfica do rio Jundiaí o monitoramento hidrológico do Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo (SAISP) é feito pela Rede Telemétrica de Hidrologia do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE) nas (Coordenadas: -23.20883315, -46.76016730) (Ponto celeste-Figura 16), que fornece a cada 10 minutos dados pluviométricos, fluviométricos, estes dados foram solicitados e organizados para gerar uma série histórica comparável com os dados de controle de vazão feitos pelo método do molinete, do Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos da FEC/Unicamp com ajuda do lastro na passarela do Local 1.

A medição por molinete fluviométrico e controle de áreas, baseia-se na medição de velocidades do fluxo da água. O método é de uso comum e com as regras de operação bem definidas na literatura (TUCCI, 2004; AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA-ANA, 2012). O molinete utilizado da marca Hidrologia S.A. foi empregado, as voltas contabilizadas em um intervalo de um minuto por meio de um contador eletrônico de pulsos da marca Hidromet, a partir da equação 1 disponibilizada pelo fabricante obtém-se os valores de velocidade do fluxo em razão ao número (*n)* de rotações.

$$V = (0{,}02278 + 0{,}2638 \cdot \frac{1}{n}) \quad (1)$$

Figura 16 - Esquema ilustrativo dos pontos de amostragem no rio Jundiaí.



Fonte: Autoria própria.

As medições de campo para a estimação de vazão foram feitas na seção do rio do Local 1, pressupondo inicialmente as hipóteses de fluxo retilíneo e uniforme. Na passarela foram graduadas cada uma das verticais com um espaçamento de 0,5 m e efeituando-se as medições aos 20%, 60% e 80% da profundidade total, seguindo as recomendações de Santos et al. (2001).

Cada uma das subáreas da seção transversal foram estimadas por retangulos seguindo a equação 2 e a velocidade média do fluxo de acordo à equação 3, o cálculo final da vazão total, é realizada por meio da equação 4, que representa a somatoria do produto destas duas variaveis, um esquema é apresentado a Figura 17.

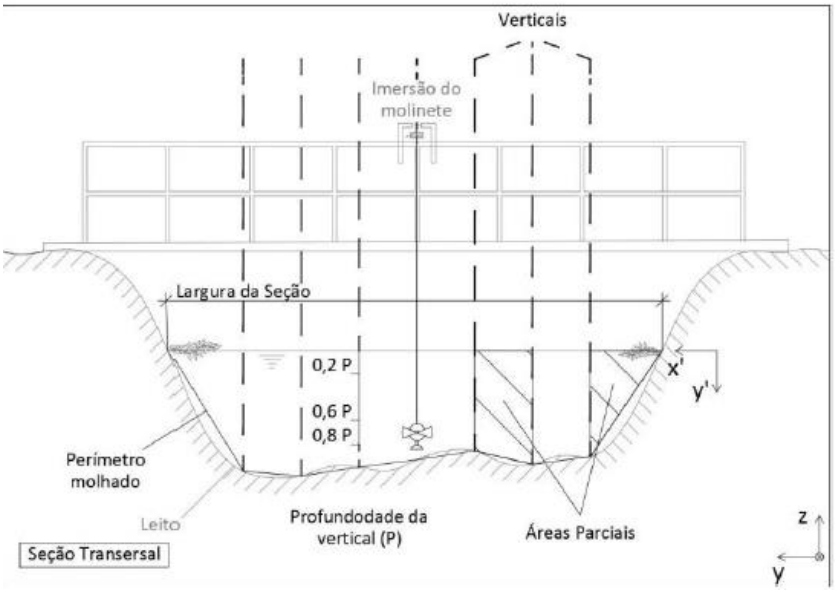
$$A_{i=}p_i \cdot \left(\frac{(d_i - d_{i+1})}{2} - \frac{(d_{i-1} - d_i)}{2}\right) = p_i \cdot \left(\frac{(d_{i+1} - d_{i-1})}{2}\right) \quad (2)$$

$$V = \frac{V_1 + 2V_{2+} + 2V_3 + \cdots + 2V_{n-1} + V_n}{2(n-1)} \quad (3)$$

$$Q = \sum q_i = \sum V_i \cdot A_i \quad (4)$$

Onde d é a distancia entre cada uma das verticais, A é a área da seção transversal, V a velocidade e Q a vazão.

Figura 17– Desenho conceitual da seção transversal do rio Jundiaí para medição de vazão.



Fonte: Tomado de: Diniz, et al. 2020.

3.2.2. Monitoramento da turbidez

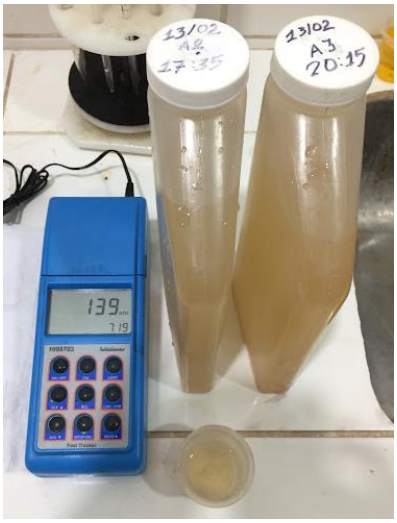
As medições de turbidez são executadas pelo pessoal da ETA da SABESP regularmente, tomando amostras de água bruta do rio Jundiaí a cada hora seguindo os padrões de medição da Portaria GM/MS Nº 888, do Ministério de Saúde (2021).

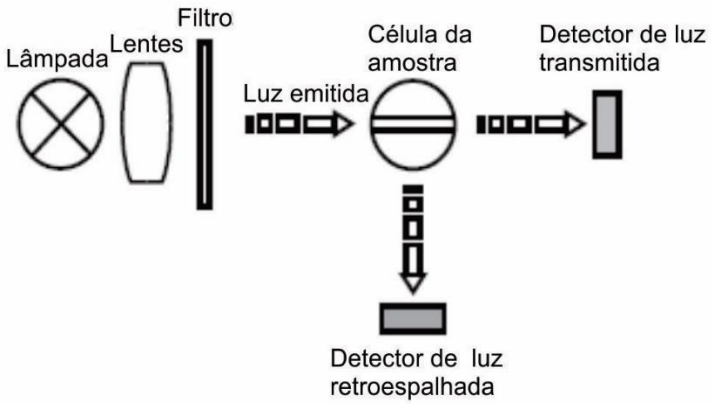
O equipamento utilizado é um turbidímetro portátil HANNA-HI 98703 (Figura 18), da empresa HANNA instruments INC®. Tal instrumento baseia-se nas propriedades óticas especificadas no capítulo anterior, o sistema ótico inclui uma lâmpada de filamento de tungstênio, um detector de luz dispersa (90°) e um outro detector de luz transmitida (180°), sendo classificado como um sensor nefelométrico, onde os valores de turbidez em NTU são calculados por meio de um algoritmo pelo microprocessador do instrumento a partir dos sinais que atingem os dois detectores, melhorando a compensação das flutuações da intensidade da lâmpada.

O manual do instrumento (HANNA INSTRUMENTS INC, 2014), destaca que o limite inferior de medição, é determinado pelo fluxo de luz, que é considerada como a luz detectada pelos sensores, que não é gerada pela dispersão da luz das partículas em suspensão. No HANNA-HI 98703 é de aproximadamente < 0.02 NTU, o que teria

uma relação com a precisão do próprio instrumento. A faixa de medição do sensor encontra-se entre 0-1000 NTU sendo a resolução dependente da faixa de medição.

Figura 18 - Equipamento e configuração interna do turbidímetro HANNA-HI 98703.





Fonte: (a) Autoria própria, tomado de: Hanna Instruments Inc, (2014).

Nas situações onde o valor de turbidez ultrapassa o limite superior de medição é realizado um processo de diluição volumétrica (SADAR, 1998; ANDERSON, 2005), seguindo a equação (5).

$$T_s = T_d \times \frac{(V_o + V_s)}{V_s} \quad (5)$$

Onde T_s é a turbidez da amostra, T_d é a turbidez da amostra dissolvida, V_o é o volume de agua destilada usada na diluição e V_s é o volume da amostra inicial.

Com o intuito de estabelecer uma relação direta de cada uma das medições de CSS com as medidas de turbidez fornecidas externamente pela equipe da SABESP, realizou-se a medição de turbidez imediatamente após de cada uma das coletas de amostras instantâneas e manuais de mistura agua-sedimento com o mesmo equipamento usado na ETA da SABESP.

3.2.3. Monitoramento de concentração de sedimentos suspensos

Concomitantemente com as medições fluviométricas foram realizadas 35 visitas para coletas de água-sedimento, no mínimo uma vez por mês, durante o período de março de 2019 a março de 2021. Além das 87 coletas com amostrador manual, coletou-se 33 amostras instantâneas, totalizando 128 amostras.

Posteriormente, as amostras foram tratadas analiticamente para a quantificação da concentração de material suspenso e análise granulométrica, cada um destes procedimentos são explicitados detalhadamente a continuação, seguindo os padrões definidos na literatura internacional de engenheira de sedimentos (EDWARDS E GLISSON, 1999; WMO, 2003, VANONI, 2006, VAN RIJN, 2006 DIPLAS, 2008, IAEA, 2005, GRAY E LANDER, 2013, PORTERFIELD, 1972) como âmbito nacional (CARVALHO, 2009, ANA, 2012, MERTEN, et al., 2014, CARVALHO E HORA, 2014).

3.2.3.1. Amostragem de sedimentos em suspensão

As coletas manuais para coleta de mistura água-sedimento foram executadas na passarela do Local 1 e desde a estrutura de represamento do Local 2 com ajuda do amostrador da série norte-americana USDH-48 da empresa JCTM-Hidromet conectado a um vão de 4 metros. Utilizando o método de Igual Incremento de largura e integração na vertical. Foram utilizadas as mesmas verticais da medição de vazão, escolhendo sempre três verticais, uma destas com o maior valor de vazão no momento da coleta e as outras duas a cada um dos lados da primeira medição, escolhendo verticais pares ou impares (Figura 19), já no Local 2, foram feitas amostragens em duas verticais qualquer, destaque-se que este ponto é a referência mais próxima ao lugar de medição da turbidez.

É importante frisar que no uso do amostrador existe uma zona de não amostragem por causa da altura do bico em relação à base do instrumento. Em todas as coletas foi utilizado o bico de entrada de 3/16”. Para vazões maiores de 0,5/0,6 m^3/s onde é possível encontrar material em suspensão de tamanho areia (>62 micrometros) tentou-se sempre manter a velocidade de entrada das amostras na garrafa dentro do campo isocinético (CARVALHO, 2009; MERTEN et al., 2014; MERTEN E POLETO, 2014). A partir da equação 6 foi calculada a velocidade do trânsito.

$$R_t = 2\frac{p}{t} \quad (6)$$

Onde R_t é a velocidade de trânsito, p é a profundidade da vertical de amostragem e t é o tempo em segundos para o preenchimento aproximado de um volume de amostra de 395 ml para a velocidade meia do fluxo do rio.

Figura 19 - Amostragem manual de SS com emprego do amostrador USDH 48 no Local 1.

Fonte: Autoria própria.

De outro lado, na estação mais chuvosa do ano hidrológico de 2020, empregou-se o amostrador automático ISCO 6712 da empresa Teledyne Isco®, amostrador portátil programável e automático de coleta pontual com amostragem não isocinética. O amostrador é composto por um corpo principal onde são armazenadas 24 garrafas para amostragem de até um litro, uma bomba peristáltica de sucção, além do painel de controle onde são inseridas as programações para as coletas das amostras (tempo total de amostragem, quantidade e intervalo entre cada amostra, etc.), é requerida uma bateria externa como fonte.

O equipamento foi instalado no Local 2 por questões de segurança, dentro da área da ETA da SABESP, as coletas foram programas para amostragem em intervalos de uma hora, com auxílio de um conduto atingindo a margem esquerda do rio conforme a Figura 20.

Todas as amostras foram devidamente etiquetadas e adicionou-se sulfato de cobre (0,4 % p/v[3]) imediatamente após sua coleta evitando a proliferação e crescimento de algas (PINTO, 2018).

Figura 20 - Instalação e uso do amostrador automático ISCO 6712.

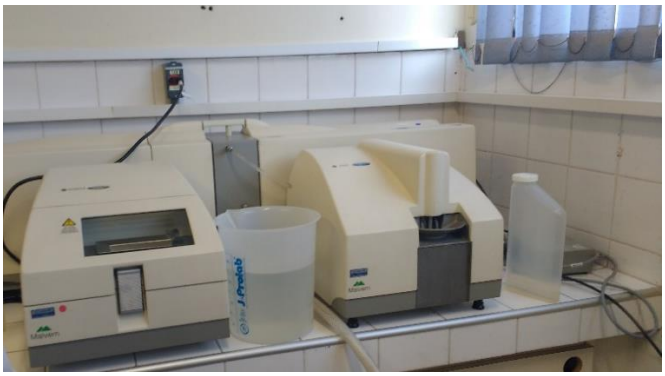
Fonte: Autoria própria.

3.2.3.2. Análise granulométrica de sedimentos em suspensão

Empregou-se o granulômetro automático (Difratômetro) a laser Malvern Mastersizer 2000 da empresa Malvern Instruments Ltd® para a obtenção da distribuição efectiva dos tamanhos das partículas em suspensão para época seca e de chuvas (Figura 21), o equipamento pertence ao laboratório da Faculdade de Engenharia de Alimentos da UNICAMP. O instrumento é baseado na teoria de difração laser (modelo de Mie e lei de Beer-Lambert) com uma faixa de leitura entre 0,02 a 20.000 µm podendo variar dependendo das propriedades do material (Malvern Instruments Ltd, 2007). Uma explicação detalhada do processo físico de medição é encontrada em Bortoluzzi e Poleto (2013).

Um ponto de atenção na aplicação deste método, é o limite máximo de detecção para altas concentrações, Grandgeon et al. (2012) relatam que a amostra não deve exceder a concentração de 1 g/l, e se ultrapassar serão requeridas atividades adicionais de subamostragem, no presente estudo nenhuma das amostras excedeu o limite máximo. As amostras foram analisadas sem procedimentos de secagem prévios e sem o uso de dispersantes químicos e físicos. O procedimento de medição foi realizado em triplicata para diminuição de erros nos resultados e como referência para a definição das faixas granulométricas de classificação foi tomada a norma NBR 6502 da Associação Brasileira de Normas Técnicas -ABNT- (1995).

Figura 21 - Difratômetro a laser Malvern Mastersizer 2000.



Fonte: Autoria própria.

A CSS também pode ser obtida por meio deste dispositivo, sendo expressada em unidades de volume (%V), deste modo, foi requerida a adopção de um valor de peso especifico de acordo ao tamanho médio das partículas (GARDE; RAJU, 1985). Convertendo as unidades em mg/l e assim dispor dos dados em uma mesma unidade de medida que facilitam as comparações e o desenvolvimento das relações com as medições de vazão e turbidez.

3.2.3.3. Análises de concentração de sedimentos em suspensão

As amostras coletas foram analisadas no laboratório de Saneamento (LABSAN) do Departamento de Engenharia Civil da UNICAMP, o método de filtração foi usado para a determinação de concentração de sedimentos em suspensão, seguindo as recomendações técnicas (VAN RIJN, 2006; CARVALHO, 2008), A técnica é esquematizada na Figura 22.

1. Os filtros de fibra de vidro com diâmetro de 47 mm para retenção de partícula maior a 0.5 µm, foram colocados no forno mufla por cerca de 1 hora à 450 °C (processo de calcinação), após o resfriamento até temperatura ambiente foi pesado na balança analítica (precisão de mg) obtendo o peso inicial do filtro em gramas (P1).

2. Cada um dos filtros foi instalado sequencialmente no sistema filtrante, com a posterior passagem de um volume (V) conhecido de amostra previamente homogeneizada manualmente, nos casos necessários agregou-se água destilada para a lavagem total do material que fica nas paredes do recipiente filtrante, além da adaptação da bomba à vácuo para facilitação do processo de filtragem.

3. Cada um dos filtros com o material retido, foram levados para a estufa numa temperatura menor de 105°C para evitar queimar certos minerais (Carvalho, 2008) por

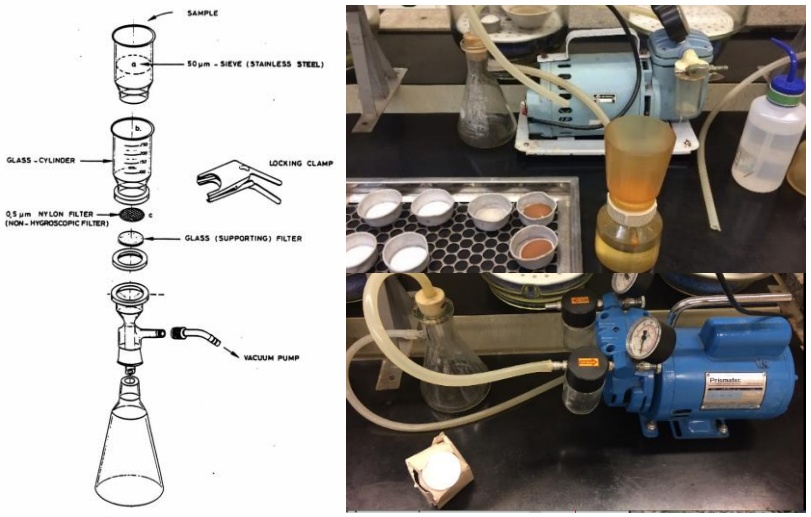
cerca de uma hora, e deixados no dessecador para esfriamento à temperatura ambiente, para posterior pesagem na balança analítica (P2).

4. Calculou-se a concentração de sedimentos em suspensão usando a equação 7.

$$CSS = \frac{(P_2 - P_2)}{v} \quad (7)$$

Na qual: CSS: Concentração de sedimentos suspensos, P1: Massa do filtro (g), P2: Massa do material filtrado mais o filtro (g) e V: Volume da amostra filtrada (L).

Figura 22 - Processo de filtração de amostras.



Fonte: Tomado de: Van Rijn, 2007).e Autoria própria;

3.2.3. Granulometria de sedimentos do fundo

No processo de coleta do material de fundo, utilizou-se o amostrador do tipo Petersen. O amostrador tipo Petersen é utilizado para retirar amostras de material do leito, sendo considerado um amostrador de raspagem e de penetração vertical. O mesmo possui um dispositivo de desarme que consiste em alavanca de braço móvel. A draga desce com as caçambas abertas pela alavanca e, ao tocar o leito do rio, desarma, permitindo a coleta de material. Já para a análise dos sedimentos coletados, foi utilizado um conjunto de peneiras e um agitador, distribuindo as partículas da amostra de acordo com sua granulometria seguindo as recomendações da norma NBR 7181 da ABNT (2016).

3.3. CARACTERIZAÇÃO HIDROSSEDIMENTOLÓGICA

3.3.1. Comparação entre os locais de amostragem.

Com os resultados obtidos de CSS e a distribuição granulométrica de partículas foram comparados ambos locais, pretendendo observar alguma influência da comporta do barramento no Local 2 na dinâmica de transporte de sedimentos e consequentemente na relação com a turbidez.

O estatístico usado foi o coeficiente amostral de correlação, que consegue expressar o grau de associação parcial linear entre as variáveis, expressa na equação (8), descrita em Naguetini e Pinto (2007) da seguinte forma:

$$r = \frac{S_{X,Y}}{S_X S_Y} = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{S_X S_Y} \quad (8)$$

Onde Sx,y é a covariança amostral pelo produto entre os desvios-padrão das variáveis (Sx Sy) e N é o númeto total de amostras.

Também foram usados os diagramas de dispersão e box plots para apresentação visual dos resultados de ambos locais para as CSS e as granulometrias.

3.3.3. Correlação de turbidez e CSS

Ainda que o número de amostras seja relevante e citado como o principal critério para determinar se o conjunto de dados é adequado para a realização das correlações. A distribuição dos dados ao longo da gama de valores esperados de turbidez, CSS e vazão de fluxo no local também são referidas como um elemento de importância (RASMUSSEN et al., 2009). Este critério mencionado de igual forma no manual desenvolvido por Lewis e Eads (2009) como abrangência do intervalo dos dados. Merten et al. (2014) frisam como conselho geral que o conjunto de pares de dados deveriam cobrir pelo menos um 80% da variação das vazões que ocorrem durante um ano na seção estudada.

No intuito de analisar se as medições efetuadas abrangeram a maior porcentagem de valores dentro dos intervalos de dados tanto nos dados de vazão quanto de turbidez, foi realizado o traçado das curvas de permanência de vazão realizada com base na série histórica fornecida pelo SAISP (124.780 dados a cada 10 minutos desde 14/11/2018 até 31/03/2021) e sobrepostos os dados de vazão medidos com o molinete fluviométrico na seção transversal do Local 1 e os dados extraídos da

própria série histórica da SAISP de acordo ao horário de coletas das amostras de água-sedimento.

Da mesma forma, traçou-se a curva de permanência com os dados de turbidez da série histórica da SABESP (19.854 dados com intervalores horários) e conjugados com os dados de turbidez provenientes das amostras físicas.

Em vista da interrupção nas coletas no ano 2020, implementou-se para o ano 2021 a proposta de um novo método para a geração de pares de dados com o reaproveitamento de parte do volume das amostras físicas tomadas em campo visando cobrir uma gama de valores mais ampla e superior aos 1000 NTU. O método é descrito da seguinte forma:

1. As amostras de mistura água e sedimento levadas para o laboratório foram misturadas e homogeneizadas em um recipiente de maior volume.
2. Após parte do material sólido decantar, foram subdividas em 6 amostras com frações do volume líquido e sólido diferentes de forma a obter distintas CSS, em seguida, foi realizado a análise descrito no item 3.2.3.3. para a determinação de CSS.
3. Finalmente, as amostras sintéticas foram levadas para a ETA da SABESP de Campo Limpo Paulista e realizadas as medições de turbidez da mesma forma que a descrita no item 3.2.

Posteriormente, os 134 pares de dados foram organizados e tabelados para a geração da correlação matemática. Frequentemente é usado o método dos mínimos quadrados para a estimação dos parâmetros que definirão algum tipo de função a partir da regressão linear simples (RLS) entre turbidez e CSS, este processo estatístico é explicado detalhadamente em Naguetini e Pinto (2007). A regressão linear múltipla (RLM) entre turbidez, CSS e vazão é uma alternativa quando a RLS não consegui explicar a relação turbidez-CSS com precisão.

Na aplicação deste método muitas vezes é requerida a transformação da escala linear, Hensel et al. (2020) relatam que em hidrologia uma generalização útil na decisão de transformar o conjunto de dados é quando a variável dependente cobre mais de uma ordem de magnitude, além destacam que a escala logarítmica é a mais aplicada. Juntamente, os autores denotam uma série de implicações do uso deste tipo de transformação, como o fato do coeficiente de determinação (R^2) não deve ser empregado no momento de escolher entre correlações transformadas e não transformadas e também a aparição de um viés geralmente negativo na

retransformação para o espaço linear devido a que teoricamente a estimação por regressão prevê a média dos valores de *Y* em função de *X* nas unidades logarítmicas que não será a mesma nas unidades aritméticas.

Deste modo, aplicou-se a correção não paramétrica proposta em Duan (1983) que apresenta robustez independentemente do tipo de distribuição dos resíduos da regressão. Para corrigir o viés da retransformação é introduzido um coeficiente denominado de “smearing” (Helsen and ,2020; Rasmussem et al, 2009) que no caso de uso de escalas logarítmicas é dada pela equação 9.

$$BCF = \frac{\sum_{i=1}^{n} 10^{e_i}}{N} \quad (9)$$

Onde *N* é o número de dados e e_i o resíduo entre cada um dos valores de CSS medidos e estimados nas unidades logarítmicas. Este coeficiente foi aplicado na conversão para unidades lineares obtendo uma relação descrita pela equação 10.

$$CSS = a\, Turb^{b} \times BCF \quad (10)$$

Sendo que CSS a concentração de sedimentos em suspensão, BCF o fator de correção e a e b os parâmetros a ser encontrados.

Finalmente foi aplicado um algoritmo de optimização para redução da soma do erro quadrático e reajustar os parâmetros *a* e *b*, este método já foi aplicado por Asselman (2000) e Menezes e Marcusso (2019) para a elaboração de curvas chaves, manifestando resultados aceitáveis. O método usado foi o gradiente reduzido generalizado descrito em detalhe em Arora (2004). Desta forma foram avaliadas três correlações (inear, linear com transformação logarítmica, e não linear com minimização do erro quadrático). Os parâmetros estatísticos empregados para determinar a acurácia dos resultados de cada uma das correlações estabelecidas entre turbidez e CSS nas unidades originais foram os coeficientes de determinação (R^2) e a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) descritos na equação 11 e 12, respectivamente.

Ainda que estes valores forneçam informações importantes sobre os resultados estimados, não são suficientes para o reconhecimento da adequação do modelo (HENSEL et al., 2020; RASMUSSEM et al. 2009). Assim, foi utilizado o valor do resíduo da soma dos quadrados predita (PRESS) definido pela equação 13 e uma análise das características dos resíduos do modelo, analisando a homocesdasticiadade da variância dos resíduos como também sua normalidade a

partir da plotagem de gráficos de probabilidade de acordo com o proposto por Costa (2017) e Machihal and Jha (2012).

$$R^2 = \frac{Variância\ explicada}{variância\ total} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\widehat{CSS}_i - \overline{CSS})^2}{\sum_{i=1}^{n}(CSS_i - \overline{CSS})^2} \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\widehat{CSS}_i - CSS_i)^2} \quad (12)$$

$$PRESS = \sum_{i=1}^{n} {e_{(i)}}^2 = \sum_{i=1}^{n}(\widehat{CSS}_i - CSS_i)^2 \quad (13)$$

$\widehat{CSS}_i$ é cada uma das CSS estimadas, CSS_i é o valor de CSS medido, $\overline{CSS}$ é a média das CSS medidas no monitoramento e N é o número de dados utilizados.

Como o valor de R^2 só é significativo para ajustes por optimização de mínimos quadrados ordinários (BOOKS E YOUNG, 2006; CAMERON E WINDMEIJER, 1996), foi usada proposta de Schabenberger e Pierce (2002) onde introduzem o estatístico pseudo-R^2 para realizar a comparação com ajustes lineares, descrito na seguinte equação:

$$PseudoR^2 = 1 - \frac{Variância\ resíduos}{variância\ total} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(CSS_i - \widehat{CSS}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(CSS_i - \overline{CSS})^2} \quad (14)$$

A escolha da equação com melhor ajuste é determinada quando o R^2 está mais próximo de 1 e os valores de RMSE e PRESS são os menores (RASMUSSEN et al., 2009).

3.3.4. Curva chave de sedimentos

Para Asselman (2000) a curva chave de sedimentos é concebida como um método empírico que descreve a relação de CSS e vazão para um determinado local. Ainda que Carvalho (2008) descreve a possibilidade de correlações com descarga sólida, a presença da componente da vazão como variável dependente e independente produziria um viés na relação com o aumento do coeficiente de correlação, tornando a correlação espúria (MCBEAN E AL-NASSRI, 1988). Perks (2013) indica que o método CSS-vazão é mais robusto porque não introduz erros adicionais quando a vazão é multiplicada pela CSS para produzir a DSS. Consequentemente foram realizadas e comparadas duas curvas chaves a partir de:

-Dados de vazão medidos em campo pelo método de área vazão empregando o molinete fluviométrico e CSS medidas (N=16)
-Dados de vazão da SAISP e CSS medidas (N=96)

A função de regressão descreve a relação média entre ambas variáveis, empregando-se a função potência na maioria dos casos (ASSELMAN, 2000) ainda que funções de outros tipos também possam ser usadas (HOROWITZ, 2003). Na aplicação do método também foi requerida a transformação da escala linear para a escala logarítmica, expressando a relação linear entre CSS e Q pela equação 15 onde foram definidos os valores de a e b.

$$Log\ DSS = \log a = b\ \log Q \quad (15)$$

Como o viés por uso de transformações logarítmicas, pode causar a subestimação no cálculo de CSS, chegando em erros de até 50% (Ferguson, 1986), foi aplicada a correção não paramétricas com a introdução do coeficiente de "smearing" do mesmo modo que na relação turbidez-CSS. Com o uso deste coeficiente a equação 16 é reescrita da seguinte forma:

$$CSS = aQ^b \times BCF \quad (16)$$

Foram aplicados os mesmos estatísticos para avaliação das correlações turbidez-CSS (R^2, RMSE, PRESS).

3.3.5. Calculo de descarga sólida em suspensão

Com a escolha da melhor correlação matemática entre turbidez e CSS, gerou-se a série histórica do rio Jundiaí de descarga de sedimentos suspensos desde o 14/11/2018 até 31/03/2021 com um intervalo de tempo horário, usando as series históricas de vazão e turbidez previamente organizadas.

Calculou-se a descarga sólida em suspensão (massa por unidade de tempo – DSS–), a partir da fórmula definida pela equação 17, relacionando a CSS e o vazão (Q), e empregando um fator de conversão (K), que para o caso de unidades métricas é de 0,0864 expressando o DSS em toneladas por dia (CARVALHO, 2008; KANTROWITZ E WOODHAM, 1994).

$$DSS = K \times CSS \times Q \quad (17)$$

Do mesmo modo, foi gerada a série histórica de DSS a partir da curva chave de CSS-vazão e comparadas a partir da diferença total das descargas solidas mensais e anuis, além do cálculo da produção específica expressa em $t/km^2 \cdot ano$.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. COMPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA E DE CSS ENTRE LOCAIS DE AMOSTRAGEM.

A granulometria, é o segundo fator com maior relevância nas respostas turbidimétricas após a influência produzida pelas variações na CSS (SARI et al. 2015). No total foram coletadas 9 amostras no Local 1 e 7 amostras para o Local 2. Para avaliar as interferências entre ambos locais foram analisadas 7 amostras no primeiro ano de monitoramento (3/08/2017 até 18/07/2018). A Tabela 10 apresenta as porcentagens de cada uma das frações granulométricas médias das medições em triplicada realizadas no difratômetro a laser. Constatou-se que em todas as amostras a fração predominante foi o silte, seguida da fração de areia fina, em quanto as demais frações granulométricas variaram em pequena porcentagem por abaixo de 5%.

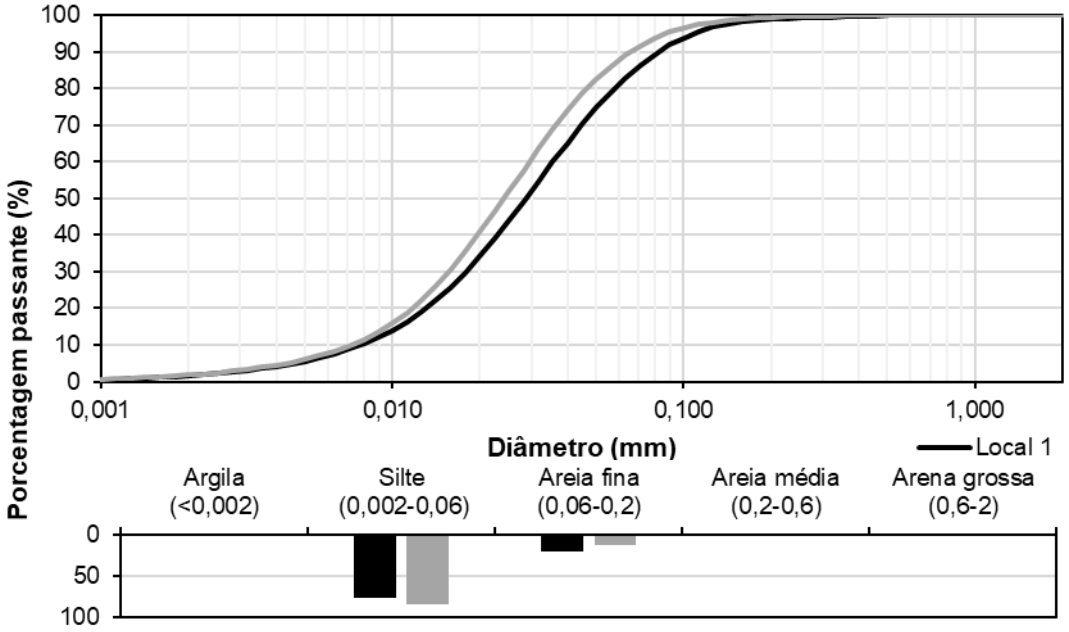
Tabela 10 - Distribuição percentual por faixas granulométricas para o Local 1 e Local 2 de medições no rio Jundiaí.

Data	Local	Argila (<0,002)	Silte (0,002-0,06)	Areia fina (0,06-0,2)	Areia média (0,2-0,6)	Arena grossa (0,6-2)
03/08/2017	L1	0,02	63,67	35,18	1,09	0,05
03/08/2017	L2	0,65	82,20	17,15	0,00	0,00
30/11/2017	L1	2,60	77,40	17,24	2,72	0,03
30/11/2017	L2	2,42	81,01	15,34	1,23	0,00
18/01/2018	L1	4,31	89,38	6,31	0,00	0,00
18/01/2018	L2	3,94	90,07	5,99	0,00	0,00
27/03/2018	L1	1,25	73,02	23,72	1,99	0,02
27/03/2018	L2	1,83	83,35	13,17	1,64	0,01
26/04/2018	L1	0,85	77,12	20,74	1,13	0,17
26/04/2018	L2	1,08	81,56	16,29	1,07	0,00
20/06/2018	L1	0,99	79,41	18,62	0,92	0,06
20/06/2018	L2	1,18	83,50	14,86	0,43	0,04
18/07/2018	L1	1,14	82,05	16,82	0,00	0,00
18/07/2018	L2	1,28	89,03	9,69	0,00	0,00

Fonte: Autoria própria.

Pelo observado na totalidade das medições, existem algumas tendências especificas, no Local 1 sempre foi menor a parcela de sedimentos de tamanho silte e a fração de areias finas foi maior em relação aos valores encontrados para o Local 2. No entanto, esta diferença nunca ultrapassou 20% em ambos os casos. Um gráfico a partir da distribuição granulométrica média para os dois locais é mostrado na Figura 23, observe-se que o rio Jundiaí nas condições de escoamento sem represamento logra transportar uma maior fração de sedimentos de maior tamanho quando comparado com as condições impostas pela comporta regularizadora da ETA, este fato é concordante com o exposto por Morris e Fan (1998) que descrevem como areias podem ser encontradas na carga suspensa relacionada com aumento da energia turbulenta decorrente de uma maior velocidade.

Figura 23 - Distribuição granulométrica média para o Local 1 e Local 2 de medição no rio Jundiaí.



Fonte: Autoria própria.

A estimativa média do D_{10} D_{50} e D_{90} de cada uma das amostras do Local 1 e 2 nas diferentes datas de coletas é mostrada na Tabela 11 e representada graficamente na Figura 24, podendo ser constatado que para os três diâmetros representativos a dispersão nunca excedeu o 33%.

O D_{50} médio para o Local 1 foi de 0,030 mm e do Local 2 de 0,024 mm. As medições na passarela do Local 1 sempre descreveram uma dispersão superior do que os diâmetros caraterísticos no Local 2, comprovando uma vez mais a hipótese

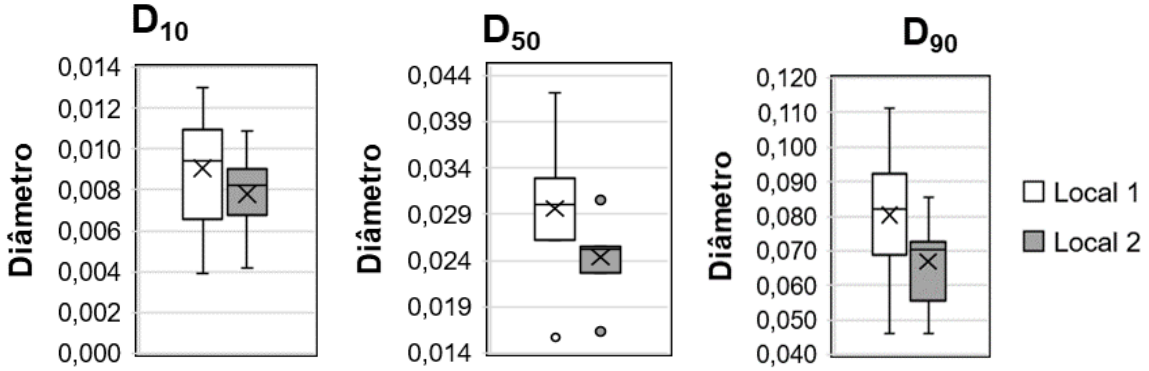
que o represamento do fluxo natural provoca uma deposição de partículas de maior tamanho, o que torna a distribuição granulométrica no Local 2 mais uniforme para as diferentes condições de fluxo.

Tabela 11 - Diâmetros representativos para o Local 1 e Local 2 de medições no rio Jundiaí.

	D_{10}		D_{50}		D_{90}	
Data	**L1**	**L2**	**L1**	**L2**	**L1**	**L2**
03/08/2017	0,013	0,011	0,042	0,031	0,111	0,068
30/11/2017	0,007	0,007	0,026	0,025	0,086	0,073
18/01/2018	0,004	0,004	0,016	0,016	0,046	0,046
27/03/2018	0,009	0,007	0,033	0,023	0,092	0,071
26/04/2018	0,011	0,009	0,031	0,025	0,082	0,086
20/06/2018	0,010	0,008	0,030	0,025	0,077	0,070
18/07/2018	0,009	0,009	0,029	0,025	0,069	0,056
Média	0,009	0,008	0,030	0,024	0,080	0,067
Desvio padrão	0,003	0,002	0,008	0,004	0,020	0,013
Coeficiente de variação	32,97%	27,49%	26,75%	17,45%	25,16%	19,02%

Fonte: Autoria própria.

Figura 24 - Box plot para as distribuições dos D_{10}, D_{50} e D_{90} para os dois locais de amostragem no rio Jundiaí.



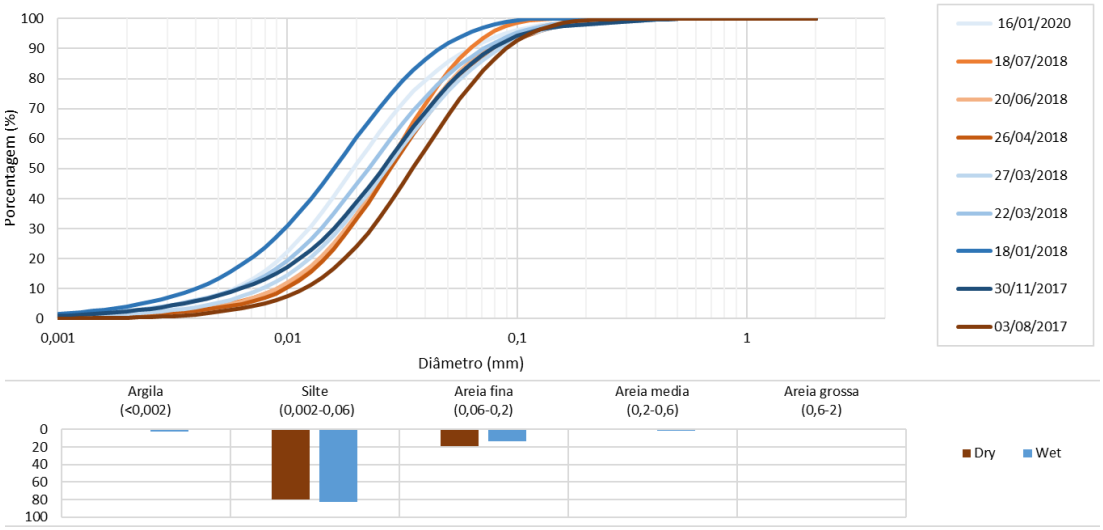
Fonte: Autoria própria.

Merten, Capel e Minella (2014) documentam uma relação linear negativa com o aumento das frações de areias na resposta do sensor de turbidez No presente estudo, ainda que se percebe a existência de uma variação das características

granulométricas entre ambos locais, este aspecto não deve exercer uma significativa influência no momento da aplicação do método baseado em medições de turbidez, devido a que em ambos locais as frações granulométricas descrevem sempre um mesmo padrão, sem a presença de extremos granulométricos, onde a diferença máxima na fração de areias foi de 20% no dia 03/08/2017.

Para estabelecer a variação temporal das características granulométricas, foram subdivididos os valores médios das 9 medições em dois grupos, o primeiro abrangendo as medições realizadas no período de chuvas o segundo no período seco (Figura 25). A fração de silte é predominante nas 9 amostragens (72,9%-89,7%), as fracções de areia média e grossa são mínimas nunca excedendo 2% do total. A ausência parcial de materiais argilosos dentro da coluna de água tem sido relatada amplamente por Droppo (2003), Droppo (2005) e mais recentemente por Lučić et al. (2018) e Lamb et al. (2020), esta característica estaria relacionada aos processos de floculação que promovem a agregação de partículas menores, conduzindo ao aumento dos tamanhos efetivos e mudanças importantes em outras características físicas, químicas e biológicas dos sedimentos suspensos. A fração de areias finas é a que apresenta uma maior variação percentual, oscilando entre 6,1 % em 18/01/2018 a valores de 26,1 % em 03/08/2017.

Figura 25 - Variação temporal da distribuição granulométrica média para o rio Jundiaí.

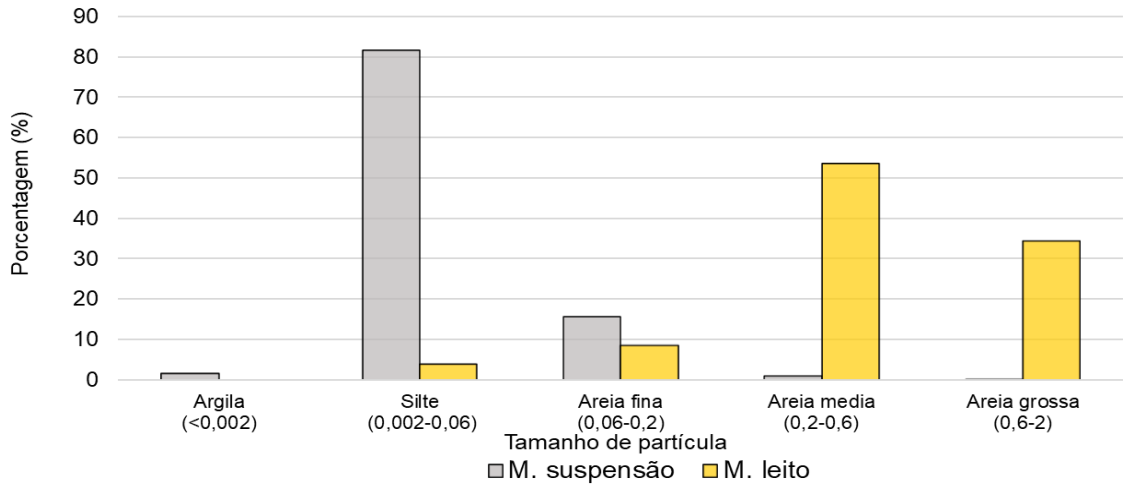


Fonte: Autoria própria

Na Figura 26 são apresentadas as percentagens granulométricas comparadas entre o material suspenso e o material do leito, a fração de areias médias é dominante

para o material do leito com 53,2%, seguida das areias grossas com 34,3%, contendo uma reduzida quantidade de materiais argilosos e siltes em comparação com o material representativo de carga em suspensão onde a fração de silte compreende cerca do 82% do material dentro da coluna da água.

Figura 26 - Distribuição granulométrica média dos sedimentos por modo de transporte (material suspenso e material do leito).



Fonte: Autoria própria.

As características granulométricas com clara predominância de material silte, também viabilizaram o uso do amostrador ISCO. Ainda que requerida uma calibração dos dados pontoais obtidos pelo amostrador automático e os dados por integração nas verticais do rio (GRUTKA, 2013; EDWARDS E GLYSSON, 1999; MERTEN E POLETO, 2013), quando partículas mais finas predominam, a distribuição dentro da coluna de água pode ser considerada homogênea e medições com amostradores não isocinéticos perto da margem do rio ou por bombeamento podem fornecer uma estimativa razoável do valor de CSS real (GRAY E LANDERS, 2014).

Para comparar as CSS para os dois Locais, realizou-se a conversão de unidades de %V para mg/l usando como peso especifico o valor de 1,04 t/m^3, sugerido por Garde e Raju, (1985) para partículas tamanho silte, que é a fração predominante nos sedimentos em suspensão do rio Jundiaí. Na tabela 12 estão sintetizados as CSS para 21 jornadas de coletas.

Os valores de CSS para o Local 1 e Local 2 foram plotados em um gráfico de dispersão mostrado na Figura 27, torna-se evidente há validez de uma relação linear entre as medições de ambos locais. O coeficiente de correlação igual a 0,99, pode estar associado à tendenciosidade gerada pelo ponto isolado na parte superior.

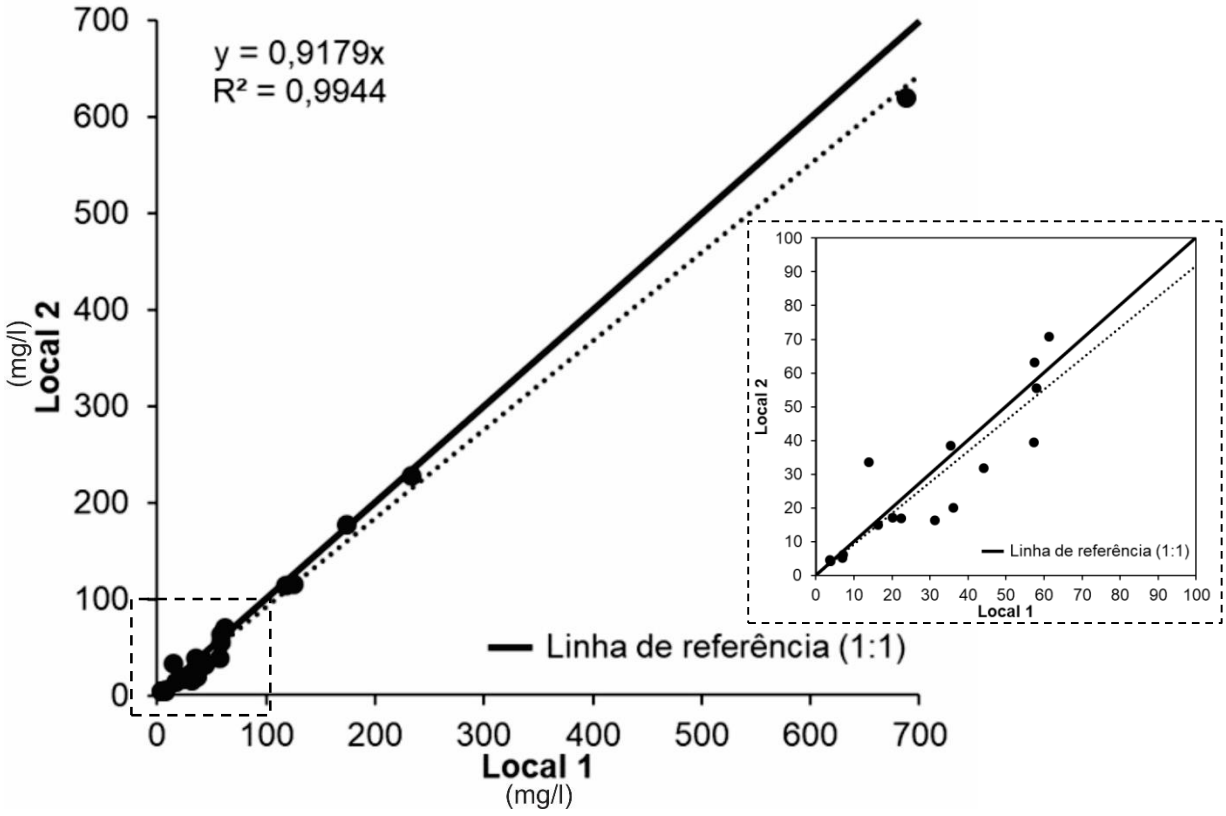
Porém, a característica da linha de tendência descreve que a CSS no Local 2 tende a ser inferior em aproximadamente 10% quando comparados com os valores do Local 1.

Tabela 12 - Concentrações de sedimentos suspensos (mg/l) no Local 1 e Local 2 de medições no rio Jundiaí.

	03/08/2017	30/11/2017	18/01/2018	27/03/2018	26/04/2018	20/06/2018	18/07/2018
L1	36,05	57,46	172,90	124,80	57,20	57,89	35,36
L2	20,11	63,18	177,06	115,27	39,52	55,64	38,65
	20/03/2019	06/05/2019	03/06/2019	12/07/2019	06/08/2019	03/09/2019	01/10/2019
L1	233,33	16,33	687,5	22,36	7,00	31,18	6,82
L2	228,89	15,11	620	17,1	6,33	16,46	5,37
	24/10/2019	12/11/2019	27/11/2019	12/12/2019	05/12/2020	07/12/2020	13/02/2021
L1	3,57	3,72	13,82	61,15	44	20	117,14
L2	4,79	4,29	33,62	70,96	32	17,33	114,29

Fonte: Autoria própria.

Figura 27 - Gráfico de dispersão com os dados de CSS para o Local 1 e Local 2.



Fonte: Autoria própria.

4.2. ANÁLISES DA ABRANGÊNCIA DE DADOS DE VAZÃO E TURBIDEZ A PARTIR DE CURVAS DE PERMANÊNCIA

Um resumo dos mínimos e máximos das series históricas e dos dados usados nas correlações turbidez-CSS e para a construção de curvas chaves é mostrado na Tabela 13.

Tabela 13 - Resumo estatístico dos dados medidos usados nos processos de calibração e das series históricas.

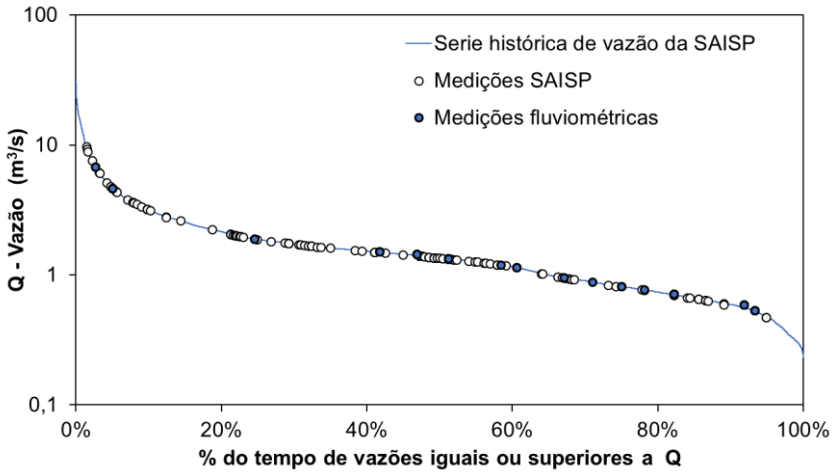
Tipo de dado	Parámetro estadístico	Turbidez (NTU)	CSS (mg/l)	Vazão (m^3/s)	
				Molinete	SAISP
Dados Medidos	Mínimo	7,74	2,17	0,53	0,473
	Máximo	6775	3533,33	6,77	17,73
	Total de dados	134	134	16	96
Série histórica	Mínimo	7,6	/	/	0,24
	Máximo	9490	/	/	30,38
	Total de dados	20799	/	/	20799

Fonte: Autoria própria.

Perceba-se que os valores de vazão relacionados com as medições se encontram nos intervalos de vazões baixas, com um valor mínimo de 0,47 m^3/s, até vazões altas por volta de 3,18 m^3/s que se apresentaram em menos do 10% do período monitorado, a medição de turbidez-CSS em eventos de chuva com vazão relacionável com os dados do sistema da SAISP chegou até o valor de 17,731 m^3/s. As medições realizadas pelo método do molinete foram realizadas em um menor número, apenas 13, mas que conseguiram cobrir um espetro menor de vazões, com amostragens em vazão máxima de 6,77 m^3/s (Figura 28).

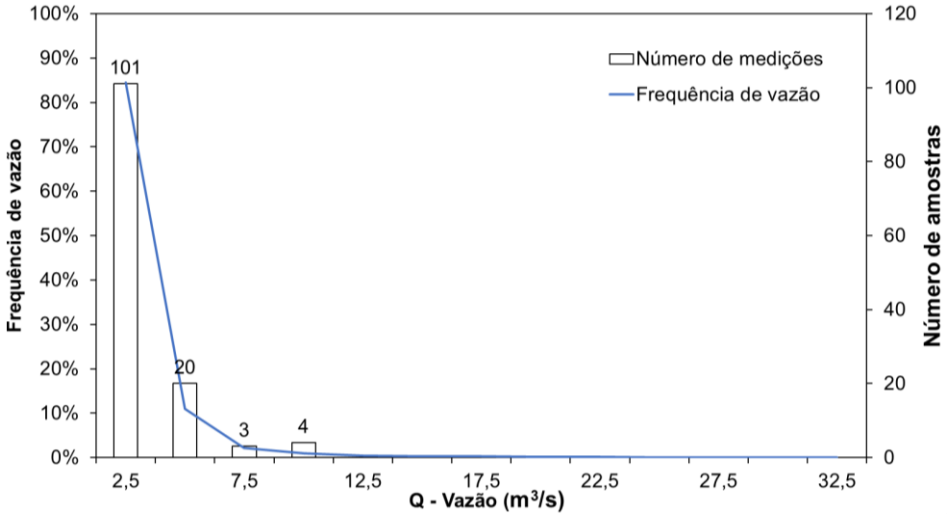
Além, a comparação entre a distribuição de frequências de vazões e o número total de medições por intervalos de vazão (Figura 29) mostra que aproximadamente 80% das medições foi realizada com vazões menores a 2,5 m^3/s que estão presentes em 15,9% do tempo.

Figura 28 - Curva de permanência de vazão para o rio Jundiaí.



Fonte: Autoria própria.

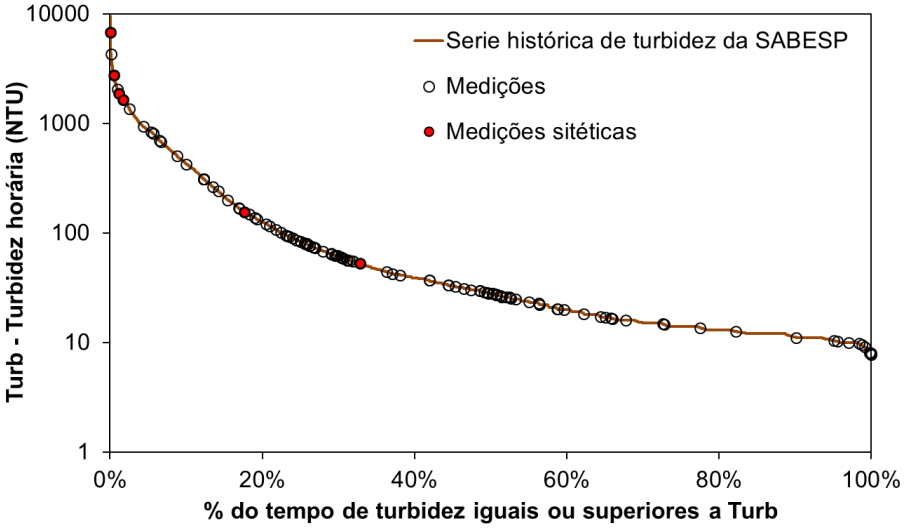
Figura 29 - Gráfico de frequências de vazões e número de dados usados para a calibração da relação turbidez-CSS.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 30 apresenta a curva de permanência com os dados de turbidez providos pela SABESP onde também são plotados os dados de cada uma das medições tomadas em campo e empregadas na construção da correlação. Além de fornecer uma análise da abrangência dos dados, o uso desta técnica permitiu a identificação de possíveis erros de digitação dentro da série histórica, sendo que a ocorrência de valores próximos do 0 NTU são quase improváveis de serem encontrados em amostras de agua bruta do rio Jundiaí, esta afirmação relatada pelos mesmos operários da ETA onde são realizados os referidos análises.

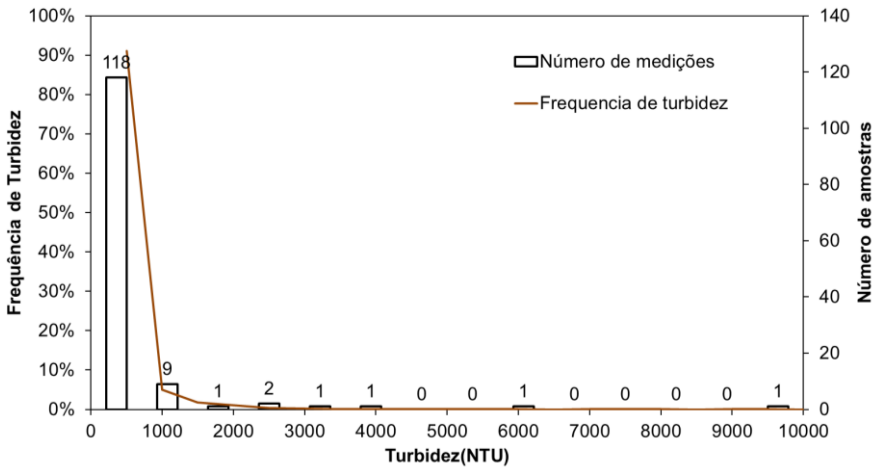
Figura 30 - Curva de permanência de turbidez e valores usados na elaboração da correlação entre turbidez-CSS para o rio Jundiaí.



Fonte: Autoria própria.

A faixa de valores de turbidez oscilou entre 7,74 NTU até 4315 NTU para as amostras coletadas em campo, já as amostras sintéticas proveram valores de 1651, 1880, 2758 e 6775 NTU que ocorrem em menos de 2% do tempo monitorado de acordo com a curva de permanência o que corresponderia a amostras em evento de picos de chuvas. Ainda que o 90% dos pares de dados estiveram por baixo dos 500 NTU, foi possível coletar 7 amostras por cima dos 1000 NTU que implicaram o uso do método de diluição para o cálculo final de turbidez (Figura 31).

Figura 31 - Gráfico de frequências de vazões e número de dados usados para a calibração da relação turbidez-CSS.



Fonte: Autoria própria.

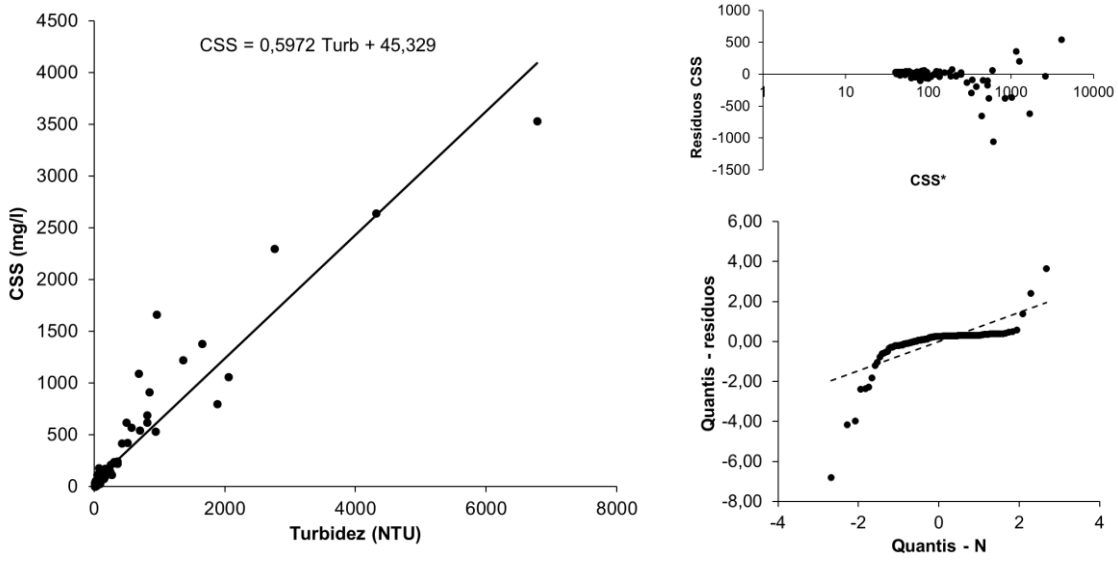
4.3. CORRELAÇÃO DE TURBIDEZ-CSS

Distinto de outros trabalhos que estabeleceram as relações turbidez e CSS a partir de tipos de amostradores ou para intervalos de tempo específicos, a presente avaliação foi focada na determinação da correlação que apresentou a melhor performance estatística com base nos dados medidos de CSS. Desta forma para as três correlações estabelecidas foram usados os 128 pares de dados a partir das misturas água-sedimento tomadas com o amostrador manual e automático, além dos 6 pares de dados das amostras sintéticas.

Em primeiro lugar, com a aplicação da regressão linear simples entre turbidez e CSS, se estabeleceu a primeira correlação (equação 18) mostrada na Figura 32, com R^2 de 0,90, RMSE de 152,85 e PRESS de 3.130.919, porém, ao plotar o gráfico de CSS medidos contra resíduos da regressão, a variância dos resíduos não foi constante (heterocedasticidade) o que indicou a pertinência de conversão das unidades lineares do modelo (HELSEL et al.,2020).

$$CSS = 0{,}5972\ \mathrm{Turb} + 45{,}329 \tag{18}$$

Figura 32 - Regressão linear entre turbidez e CSS para o rio Jundiaí.



Fonte: Autoria própria.

A regressão linear com conversão ao espaço logarítmico foi gerada posteriormente, a equação 19 descreve a correlação CSS-Turbidez que é apresentada na Figura 33 com R^2 de 0,90, RMSE de 205,86 e PRESS igual a 5.678.709. Quando aplicado o fator BCF para correção do viés de retransformação para unidades lineares calculado em 1,15, os estatísticos de avaliação decresceram

(R^2= 0,90, RMSE=279,92 e PRESS=10.500.284), consequentemente a equação 20 foi calculada sem o uso do BCF.

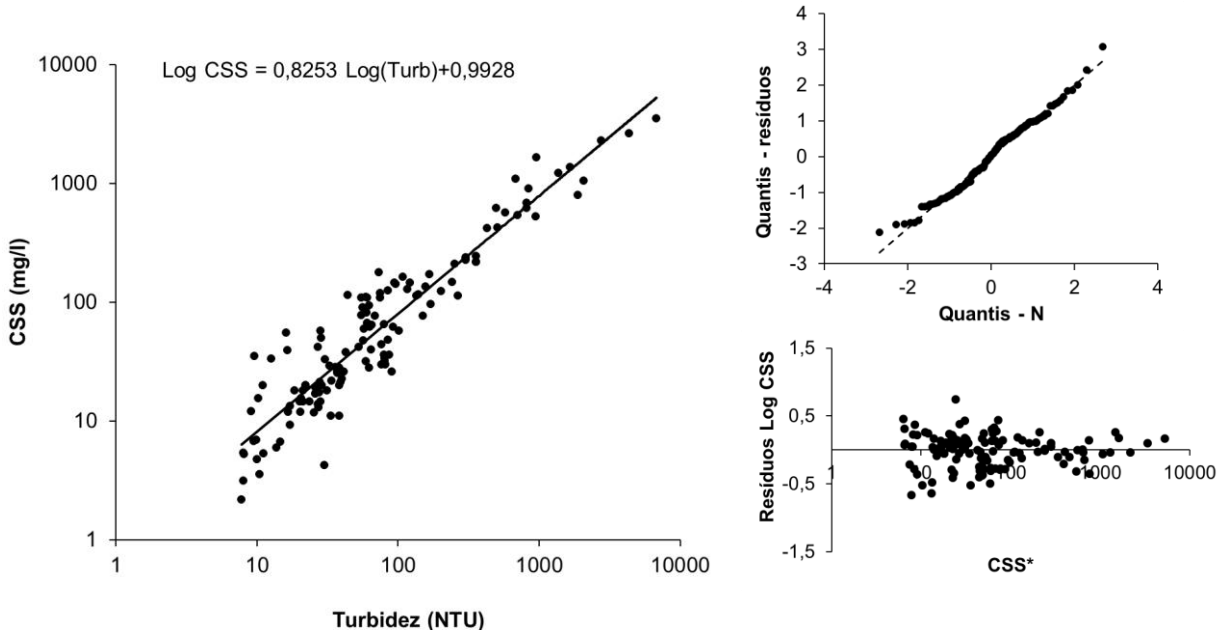
$$\log CSS = 0{,}5972\ \log \mathrm{Turb}\ +\ 45{,}329 \tag{19}$$

$$CSS = 0{,}8253\ \mathrm{Turb}^{0{,}9928} \tag{20}$$

Finalmente, a partir da correlação em escala logarítmica foi testada uma regressão não linear que minimizasse o valor de PRESS (equação 21), representando uma função exponencial mostrada na Figura 34 com um R^2 de 0,93, RMSE de 128,12 e PRESS de 2.199.715, observou-se que a distribuição dos resíduos não apresentou homocedasticidade e a variação média dos resíduos não é igual a 0, o que de fato caracteriza este tipo de regressão, pelo contrário, a variância dos resíduos apresentou uma tendência negativa conforme aumentou a relação de turbidez-CSS, este aspecto foi aproveitado para não gerar uma superestimação das CSS na faixa superior de valores desta relação.

$$CSS = 3{,}264\ \mathrm{Turb}^{0{,}7974} \tag{21}$$

Figura 33 - Regressão linear entre turbidez e CSS em unidades logarítmicas.

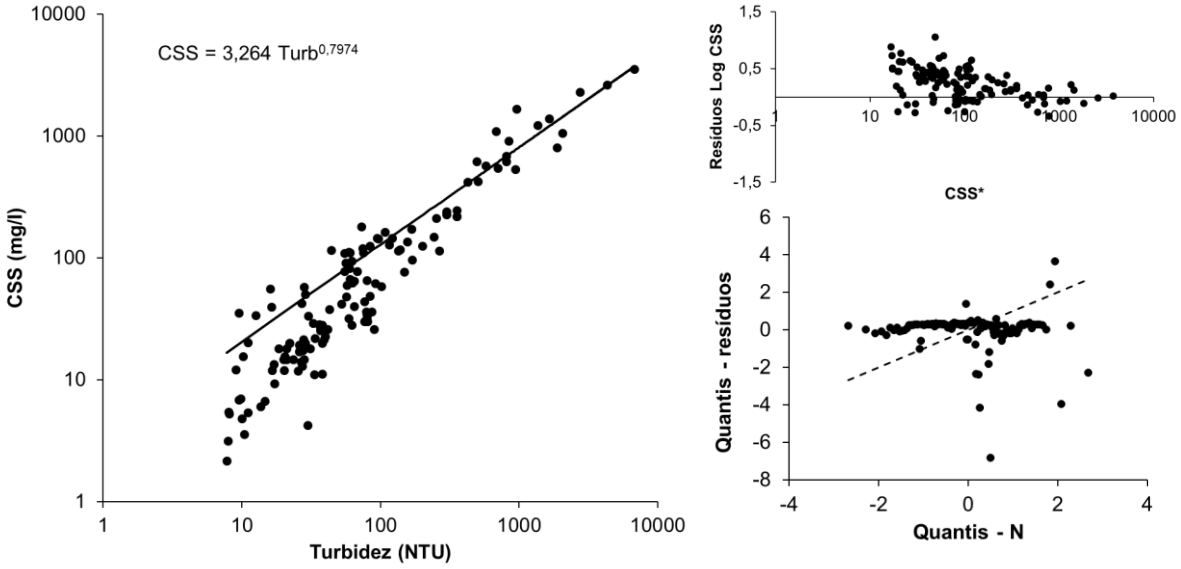


Fonte: Autoria própria.

Uma síntese das correlações turbidez-CSS estabelecidas e seus índices estatísticos é apresentado na Tabela 14. Do mesmo modo na Figura 35 são apresentadas conjuntamente as linhas de tendência no gráfico de dispersão em unidades lineares. Observe-se que os R^2 das três correlações está próxima de 0,90 o que confirma o poder explicativo das relações turbidez-CSS, porém, não suficiente para a determinar

o melhor modelo preditivo (ONYUTHA, 2020), desta forma a partir dos menores índices de RMSE e PRESS, a correlação não linear foi usada para as análises posteriores.

Figura 34 - Regressão não linear entre turbidez e CSS.

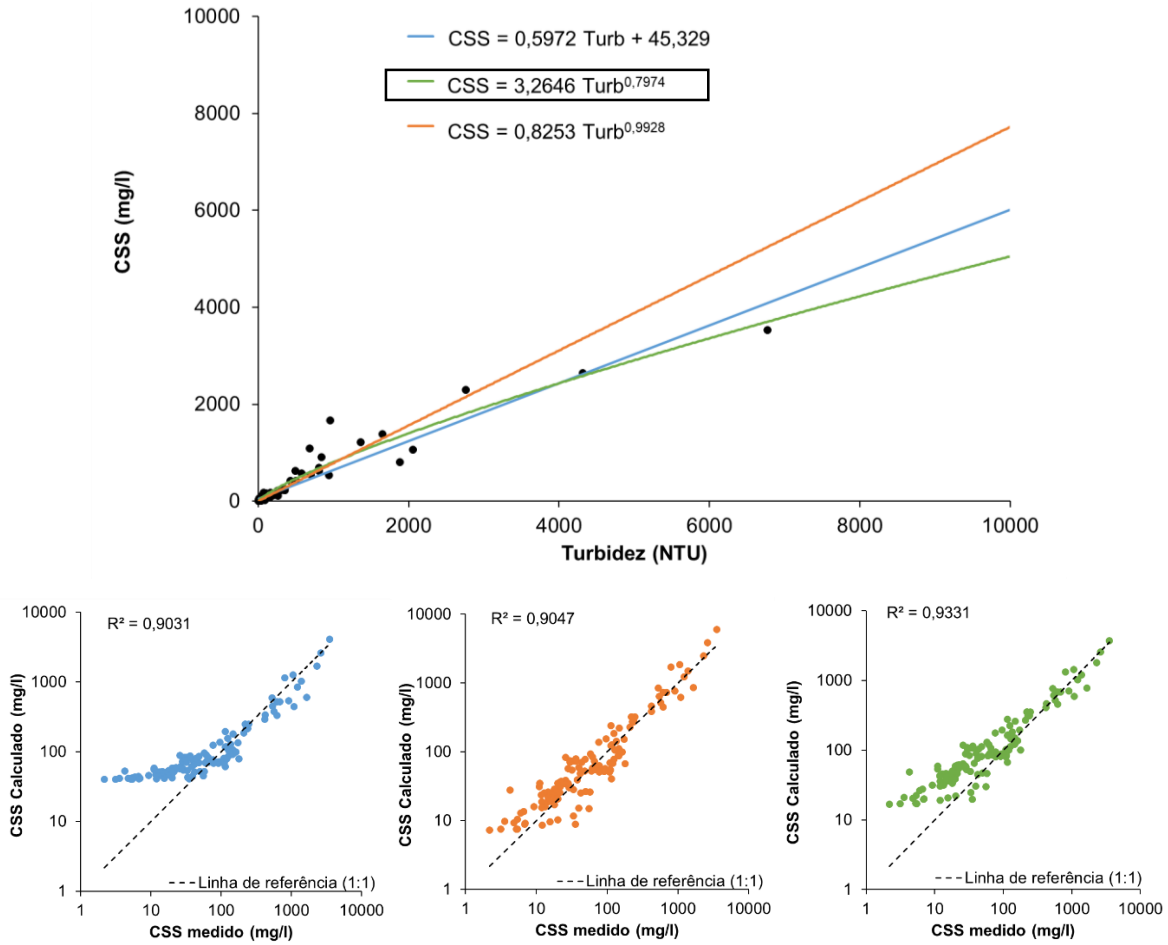


Fonte: Autoria própria.

Tabela 14 - Resumo estatístico do desempenho das correlações de turbidez e CSS para o rio Jundiaí.

Método de correlação	Equação	N	R^2	RMSE	PRESS	BCF
Linear	$CSS = 0{,}5972\,\mathrm{Turb} + 45{,}329$	134	0,90	152,86	3.130.919	/
Linear-Log	$\log CSS = 0{,}5972\,\log \mathrm{Turb} + 45{,}329$	134	0,90	205,86	5.678.710	1,15
Com correção BCF				279,93	10.500.284	/
Não linear	$\boldsymbol{CSS = 3{,}264\,\mathrm{Turb}^{0{,}7974}}$	**134**	**0,93***	**128,12**	**2.199.716**	/

Figura 35 - Linhas de tendência das correlações turbidez e CSS e comparação de CSS medidos e calculados.



Fonte: Autoria própria.

4.3. CURVA CHAVE DE VAZÃO-CSS

4.3.1. Curva chave a partir de dados de vazão medidos com molinete fluviométrico

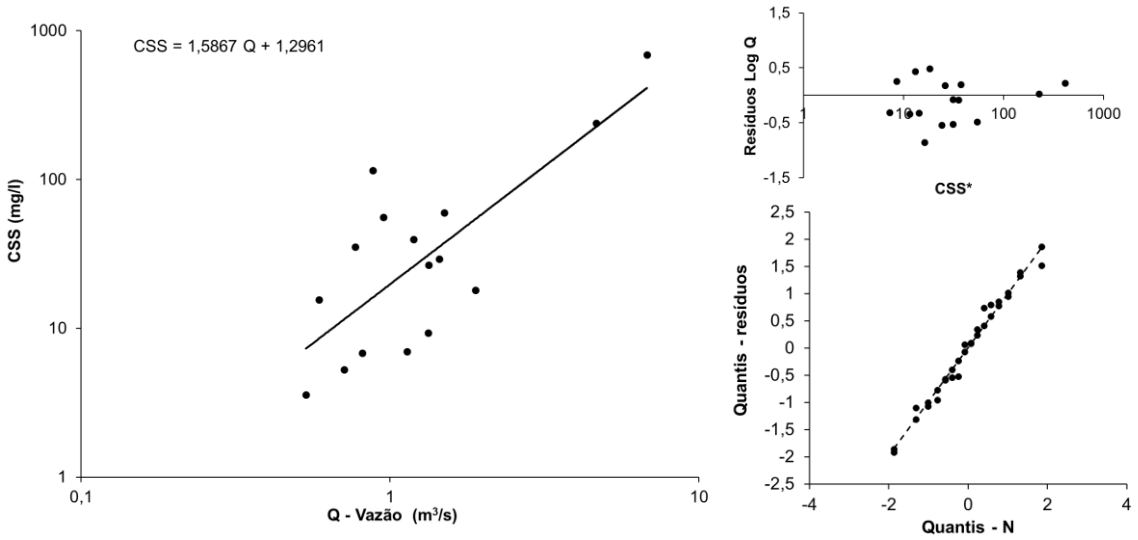
No caso do estabelecimento da curva chave entre a vazão-CSS foi aplicada a transformação logarítmica nos dados diretamente seguindo as recomendações de Hensel et al. (2020). A curva chave pelo método de RLS a partir dos dados medidos na seção transversal do Local 1 usando o molinete fluviométrico é identificada pela linha de tendência na Figura 36, com estatísticos de R^2 de 0,57, RMSE de 75,41 e PRESS de 90.998. Aplicado o fator de correção BCF (1,09), passando para a equação 23 em unidades aritméticas, as estatísticas definidas foram: RMSE =75,41 e PRESS=

90998,02, deste modo, não foi considerado o BCF na retransformação para o espaço linear em ração à diminuição de acurácia da correlação (Tabela 15).

$$\text{Log CSS} = 1{,}5867\ \text{Log Q} + 1{,}2961 \quad (22)$$

$$\text{CSS} = 19{,}7742\text{Q}^{1{,}5867} \quad (23)$$

Figura 36 - Curva chave a partir de regressão linear com transformação logarítmica de vazão medida pelo método do molinete e CSS.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 15 - Resumo estatístico do desempenho para a curva chave de sedimentos para o rio Jundiaí usando dados de vazão medidos com molinete fluviométrico.

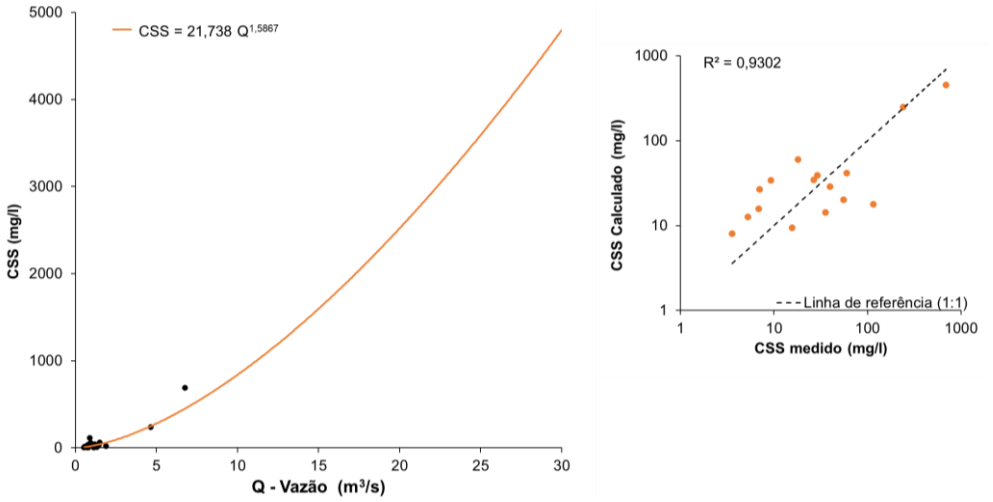
Método de correlação	Equação	N	R^2	RMSE	PRESS	BCF
Linear-Log	$\boldsymbol{Log\ CSS = 1{,}5867\ Log\ Q + 1{,}2961}$	**16**	**0,57**	**75,414**	**90.998,02**	**1,099**
Com correção BCF				127,15	75.9895,23	/

Fonte: Autoria própria.

É importante destacar que a curva gerada com as medições fluviométricas foi construída com um número baixo de pares de dados em altas vazões, o que pode ser uma fonte de erro para a extrapolação dentro das séries históricas, sabendo que a eficiência da extrapolação da curva chave de sedimentos está atada à frequência de amostragem (HOROWITZ, 2003), problemas deste tipo, fazem com que não seja recomendada a extrapolação da equação de regressão além dos limites da amostra usada na correlação (NAGUETINI E PINTO, 2007). Perante esta condição, não foi aplicado o algoritmo de minimização do PRESS, já que poderia ser inserida uma tendenciosidade não representativa das vazões de pico.

Observe-se na Figura 37 a função em unidades aritméticas, a extrapolação ocorre desde a vazão de 6,77 m^3/s até 30,88 m^3/s. A comparação entre os dados medidos e calculado é mostrada no mesmo gráfico.

Figura 37 - Linha de tendência da curva chave e comparação de CSS medidos e calculados.



Fonte: Autoria própria.

4.3.2. Curva chave a partir de dados de vazão fornecidos pela SAISP

A partir dos dados de vazão da série histórica da SAISP no horário especifico das coletas e com o método de RLS em unidades logarítmicas realizou-se a correlação para a definição da curva chave de sedimentos mostrada na Figura 38 e descrita na equação 24. Esta correlação apresentou um coeficiente de determinação R^2 de 0,58, RMSE de 319,37 e PRESS de 9.792.183,06. A variância dos resíduos descreveu características homocedásticas e sua distribuição ficou próxima da reta distinguindo um padrão próximo da normalidade.

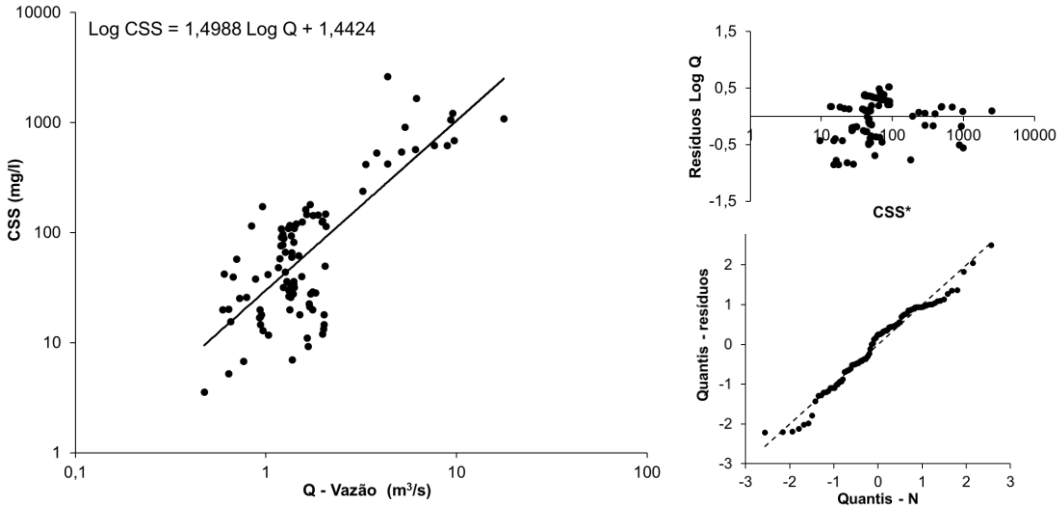
$$\text{Log CSS} = 1{,}4988\ \text{Log Q} + 1{,}4424 \quad (24)$$

O coeficiente de correção BCF calculado em 1,42, aplicado gerou os seguintes resultados estatísticos de avaliação: RMSE: 376,10 e PRESS de 13.579.382. Do mesmo modo que as correlações de turbidez-CSS e a curva chave gerada com dados de vazão a partir do molinete o fator de correção não aportou melhoria nas previsões de CSS, a equação retransformada é definida pela equação 25. Walling e Webb (1988) relatam em relação ao BCF que pode não ser suficiente para explicar as

dinâmicas hidrossedimentológicas, no entanto, deve ser levado sempre em consideração quando são incorporadas transformadas das escalas nas RLS.

$$\mathrm{CSS} = 29{,}927\ \mathrm{Q}^{1{,}5404} \quad (25)$$

Figura 38 - Curva chave de sedimentos usando dados do sistema da SAISP e medições de CSS com uso de RLS.



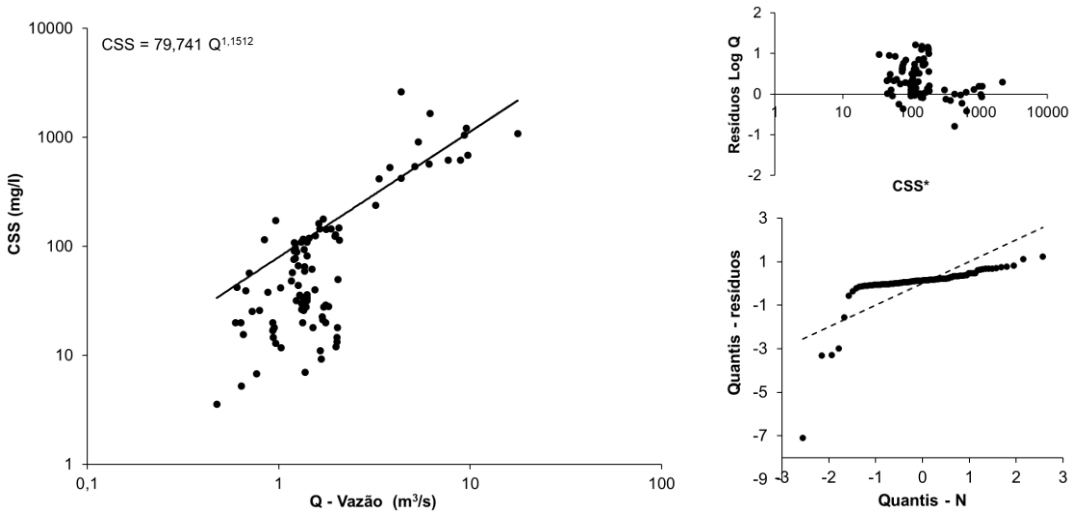
Fonte: Autoria própria.

Quando aplicado o algoritmo de minimização do PRESS, o R^2 foi de 0,75, o valor do RMSE de 1,73 e o estatístico PRESS atingiu o valor de 290,14. A equação 26 descreve a correlação e a Figura 39 exibe o traço da linha de tendencia assim como os graficos dos resíduos contra valores calculados onde é observada uma tendência na variância dos resíduos e a não normalidade de sua distribuição comprovada por meio da visualização no gráfico Q-Q plot dos resíduos.

$$\mathrm{CSS} = 79{,}741\ \mathrm{Q}^{1{,}1512} \quad (26)$$

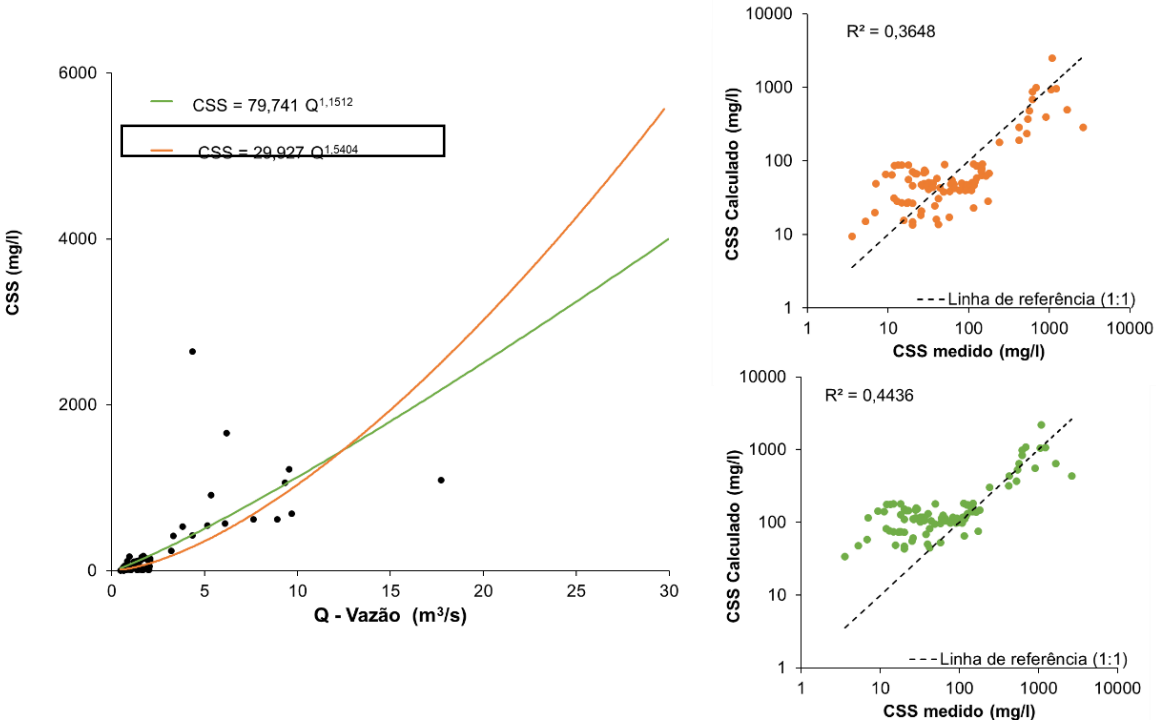
O resumo estatístico de avaliação das correlações da curva chave de sedimentos com dados da SAISP é apresentado na Tabela 16. Ainda que o melhor performance estatístico é dado pela equação não linear, escolheu-se usar para o resto das análises a equação potencial a partir de RLS, uma vez que os dados medidos para vazões altas apresentam uma alta dispersão o que não gera um melhor ajuste neste intervalo quando aplicada a regressão não linear e sim causaria superestimações de CSS de quase um ordem de magnitude para as vazões menores a 2 m^3/s (Figura 40).

Figura 39 - Curva chave de sedimentos usando dados do sistema da SAISP e medições de CSS com uso de regressão não linear.



Fonte: Autoria própria.

Figura 40 - Comparação de linhas de tendência extrapoladas e gráficos comparativos entre dados medidos e calculados.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 16 - Resumos estatístico do desempenho para a curva chave de sedimentos para o rio Jundiaí usando dados de vazão medidos pelo SAISP.

Método de correlação	Equação	N	R^2	RMSE	PRESS	BCF
Linear-Log	$\boldsymbol{Log\ CSS = 1,5867\ Log\ Q + 1,2961}$	**96**	**0,58**	**319,37**	**319,37**	**1,42**
Com correção BCF	$CSS = 21{,}7377Q^{1,5867}$			376,10	13.579.382	/
Não linear	$CSS = 79{,}741\ Q^{1,1512}$	96	0,75	290,14	8.081.546	

Fonte: Autoria própria.

4.4. COMPARAÇÃO DO MÉTODO POR TURBIDEZ E COM EMPREGO DE CURVAS CHAVES

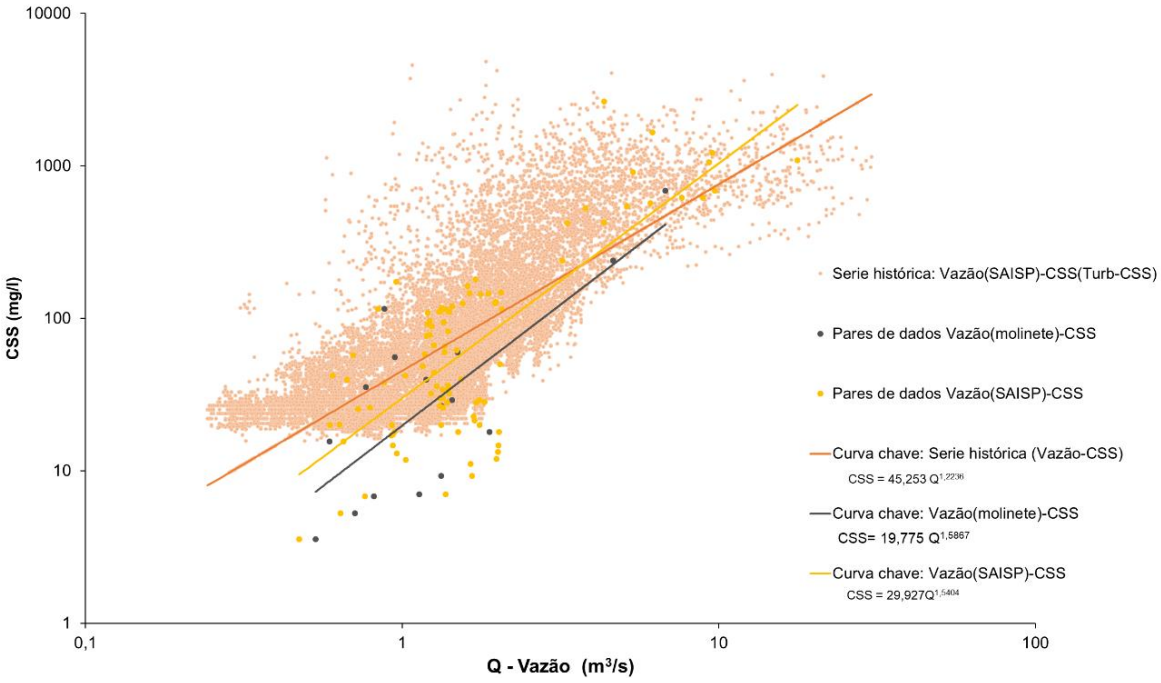
No gráfico da Figura 41 são mostradas as duas curvas chaves a partir dos dados adquiridos pelo método do molinete e com os dados da SAISP, como também a nuvem de pontos gerada a partir dos dados de vazão horários da SAISP e as CSS calculadas pela correlação com os dados de turbidez para o periodo de registro. A equação de correlação estabelecida pelo método da RLS entre os dados das séries históricas de vazão e CSS foi usado para o preenchimento de 944 dados faltantes provenientes de lacunas nas medições de turbidez.

Ainda que as curvas chaves de sedimentos encontram-se no domínio da relação vazão-CSS dentro da nuvem de pontos, é envidente que não logram explicar completamente a variância total, podendo apresentar-se para uma mesma vazão, CSS até em três ordens de magnitude diferente. De fato, um dos principais questionamento para o uso da curva chave é um dos princípios básicos para sua construção, que considera que o pico de vazão é coincidente com o pico de CSS (FINLAYSON, 1985) representando uma relação univariada entre vazão e CSS sem considerar a existência de outras variáveis espaço-temporais que podem estar envolvidas nos processos de erosão e transporte de sedimentos (WALLING AND WEBB, 1988; VERCRUYSSE ET AL. 2017; GAO, 2008; ONDERKA ET AL., 2012; SMITH AND BLAKE, 2014).

A falta de coincidência na resposta da concentração de sedimento para determinada vazão é relacionada com o fenômeno de histereses onde existe uma diferença

temporal entre a curva de vazão e CSS (MALUTTA, 2019). Uma explicação dada por Walling (1977) citada por Gao (2008) para rios naturais é que o material suspenso não é dependente da capacidade do fluxo, desta forma a CSS não depende exclusivamente da vazão, fatores relacionados com o suprimento de sedimentos de caracter geológico, geomorfológico e de tipos e usos e cobertura dos solo na bacia contribuinte são também citados.

Figura 41 - Curvas chaves de sedimentos definidas para o rio Jundiaí e dados vazão-CSS calculados a partir da correlação com as medidas de turbidez.



Fonte: Autoria própria.

Empregando os três métodos para o cálculo de CCS, foi construída a série histórica de valores de CSS horária para o rio Jundiaí no intervalo de tempo monitorado (Figura 42) onde também são mostrados os valores de CSS medidos.

4.4.1 Avaliação para eventos de chuva

No intuito de avaliar os resultados das CSSs em eventos de chuva foi escolhido o periodo com início às 00:00 do 6/01/2021 até as 6:00 do dia 7/01/2021, que contou com três amostras físicas (Figura 43). A vazão de pico para este evento foi de 6,18 m^3/s e ocorreu aproximadamente uma hora antes que o pico da CSS, o valor medido de CSS foi de 2640 mg/l, com o uso da correlação de turbidez o valor máximo de CSS

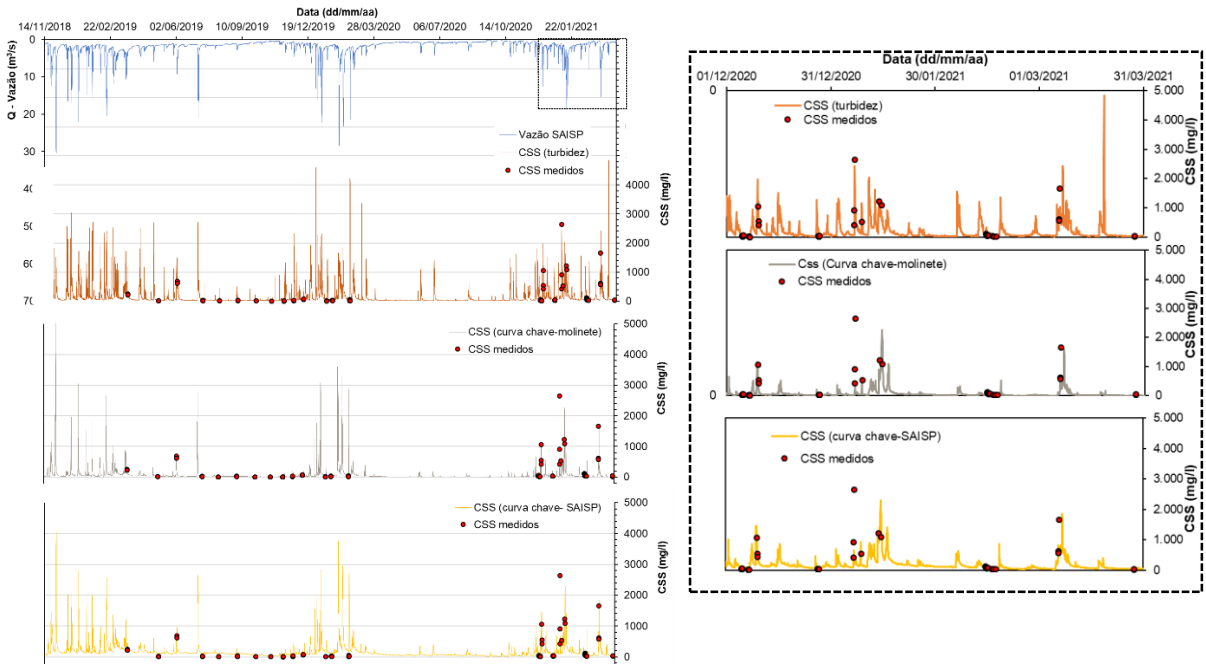
ficou subestimado 9,6 %, quando empregadas as curvas chaves, apresentaram-se erros de subestimação maiores do que 83,6%. A Tabela 18 mostra os diferentes valores de CSS para os métodos propostos e um calculo do erro médio percentual em relação aos valores observados.

Tabela 17 - Resumo estatístico das concentrações de sedimentos suspensos do rio Jundiaí para os métodos de correlação turbidez-CSS e curvas chaves

Método para cálculo de CSS	Turbidez	Molinete	SAISP
Média	148,30	69,16	104,08
Erro padrão	1,99	1,63	1,95
Mediana	46,53	25,37	47,73
Desvio padrão	287,50	234,68	281,22
Variância da amostra	82654,28	55073,74	79082,53
Curtose	32,21	144,24	112,75
Assimetria	4,61	10,47	9,22
Intervalo	4834,46	5271,94	5750,37
Mínimo	9,74	1,33	3,39
Máximo	4844,20	5273,27	5753,76

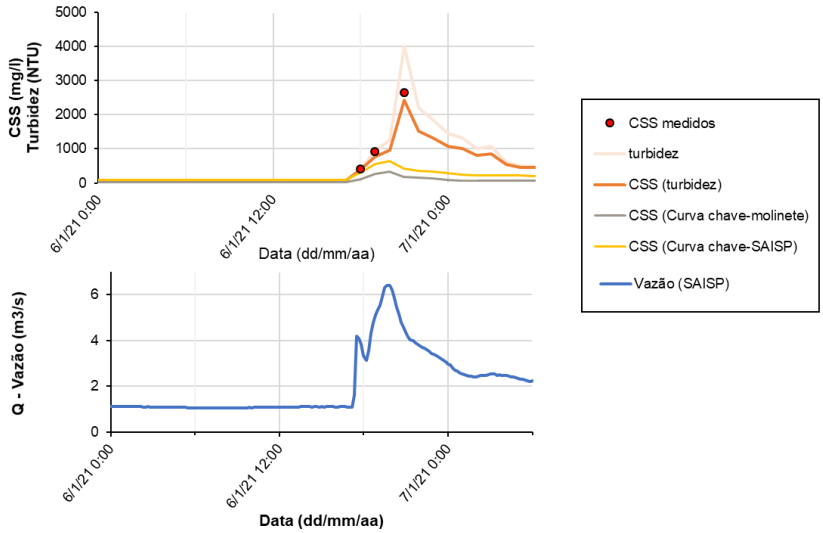
Fonte: Autoria própria.

Figura 42 - Série histórica de CSS para o rio Jundiaí usando a correlação com dados de turbidez, a curva chave de sedimentos com dados de vazão pelo método do molinete e curva chave com dados do SAISP.



Fonte: Autoria própria.

Figura 43 - CSS medidos e calculados para o evento de chuva entre o 6/01/2021 e 7/01/2021.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 18 - Concentração de sedimentos em suspensão medidos e calculados para o evento de chuva entre o 6/01/2021 e 7/01/2021.

Data		CSS(mg/l)			
		Medido	Turbidez	molinete	SAISP
06/01/2021	18:00:00	420,0	379,3	118,6	318,2
06/01/2021	19:00:00	910,0	765,2	268,6	550,7
06/01/2021	21:00:00	2640,0	2432,4	187,3	432,3
Erro percentual (%)			11,16	78,38	49,12

Fonte: Autoria própria.

4.5. DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO PARA O RIO JUNDIAÍ

Para o cálculo da taxa de DSS expressa em t/h usou-se a equação 17 envolvendo os dados de vazão e CSS tratados anteriormente (Figura 44-a) e a partir da somatória dos intervalos (1 hora) calculou-se o valor total de descarga sólida, encontrando que o valor de sedimentos transportados no período monitorado a partir dos dados de turbidez foi de 48.855,84 t, com o uso de dados de vazão medidos com molinete o valor ficou reduzido em aproximadamente 10% com um total de 43773,55 t e no caso do cálculo empregando a curva chave com dados da SAISP o valor teve uma superestimação em torno do 15,5% atingindo um valor de 56449,04 t, o gráfico de descarga sólida total acumulado é apresentado na Figura 44-c.

Asselman (2000) conclui em suas análises no rio Rhine e alguns dos seus tributários que as taxas médias de transporte de sedimentos calculadas a longo prazo diferem em menos de 20% das cargas de sedimentos medidas para a maioria dos locais analisados usando o método de regressão não linear, valores similares aos obtidos no presente estudo, estes resultados podem ser considerados dentro do intervalo de boas estimativas segundo o trabalho de Horowitz (2003).

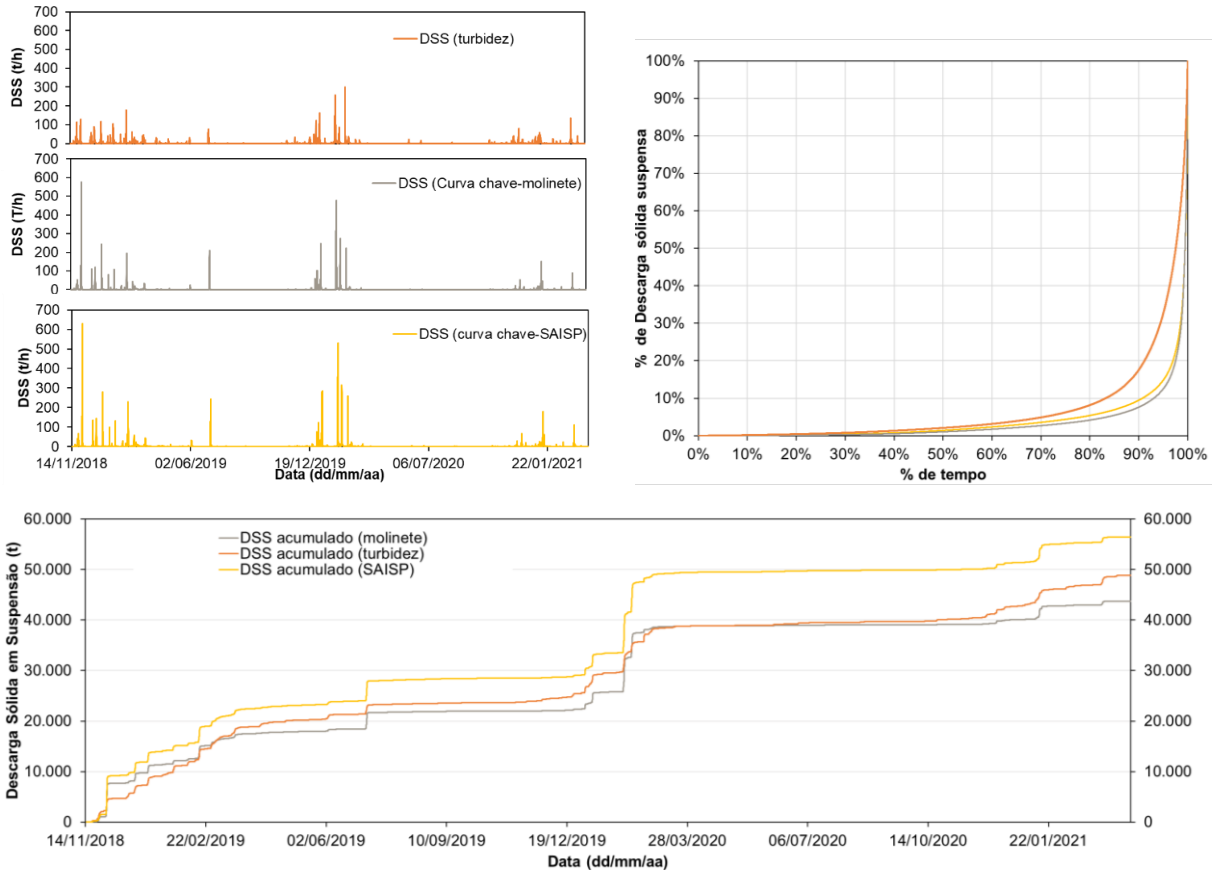
Porém, quando é analisada a contribuição da carga total de sedimentos em função de o tempo são denotadas algumas diferencias entre os métodos, a aplicação das curvas chaves manifestaram uma tendência a subestimar as descargas sólidas para baixas vazões e supestimar as CSS e por tanto as taxas de sedimentos nos eventos de maiores vazões, na Figura 45-b pode ser observado que para o 95% do tempo, o total de sedimentos transportados foi de 12,51% e 14,83% para as DSS calculadas usando as relações de curva chave com o método do molinete e dos dados da SAISP, respectivamente.

No caso, da DSS baseados em dados de monitoramento turbidimétrico, aproximadamente 32,59% do total corresponde ao 95% do tempo. Esta característica pode ser explicada de igual forma, pela diferença nos picos de vazão e CSS que fazem com que os resultados da descarga sólida possam sofrer uma atenuação nos casos de apresentar histereses, consequentemente, este método faz com que se tornem mais realistas as taxas de DSS (GAO, 2008; VERCRUISSE ET AL. 2017). Os resultados são coerentes com o exposto por CARVALHO (2008) que expressa que cerca de 70% a 90% da carga total do rio, é transportada em períodos de chuvas mais intensos e consequentemente de vazões de cheia.

Para as DSS calculadas a partir das concentrações usando as curvas chaves, o ano com maior taxa de transporte de sedimentos não correspondeu ao ano que apresentou o maior volume de deflúvio superficial (2019) e sim para o ano que apresentou as maiores vazões de pico (2020), caso contrário do apresentado pelos resultados gerados com a curva de correlação de turbidez, o resumo estatístico das descargas sólidas em suspensão anuais para o rio Jundiaí na seção de estudo são mostradas na Tabela 19.

Ao analisar a DSS total para cada um dos meses monitorados (Figura 45), nota-se que o mês que apresentou os maiores valores para os três métodos propostos foi o mês de fevereiro de 2020, sendo que para o método de turbidez representou o 50% da carga anual desse ano, e para a DSS baseada na curva chave de sedimentos

Figura 44 - a. Série histórica de DSS baseado na correlação e curvas chaves. b. Gráfico de frequências de DSS em função do tempo. C. DSS acumulado no período analisado para os três métodos propostos.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 19 - Descarga de sedimentos em suspensão para os três métodos empregados no cálculo de CSS.

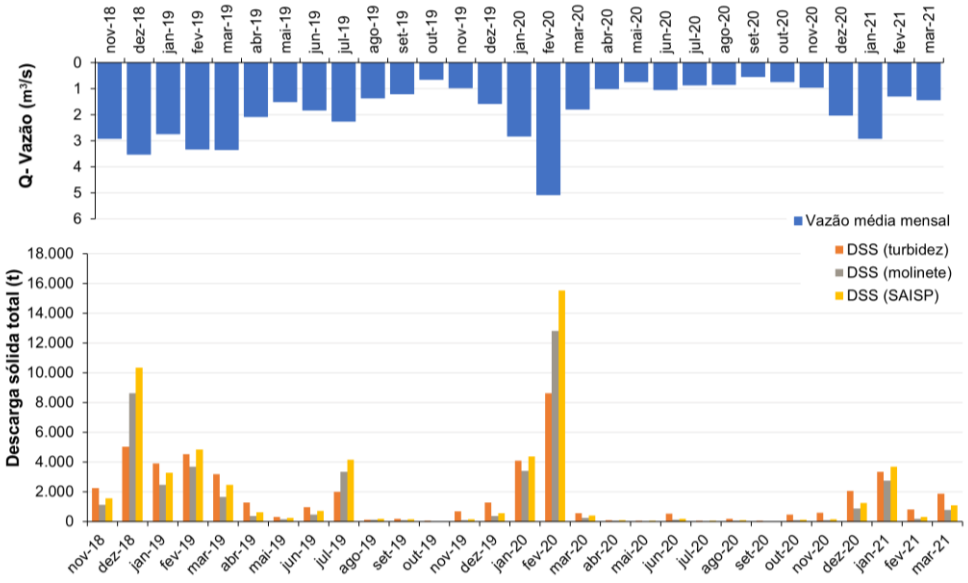
			Molinete		SAISP		Turbidez	
Meses	**ano**	**Volume de agua (m^3)**	**DSS total**	**DSS media (t/dia)**	**DSS total**	**DSS media (t/dia)**	**DSS total**	**DSS media (t/dia)**
2	2018	13.215.438,00	9.720,65		11.882,08		7.268,10	
12	2019	59.488.624,80	12.673,83	34,72	17.279,53	47,34	18.351,16	50,28
12	2020	47.857.568,40	17.689,64	48,46	22.240,36	60,93	17.227,10	47,20
3	2021	14.689.803,60	3.689,43		5.047,08		6.009,49	
Total		135.251.434,80	43.773,55		56.449,04		48.855,84	
Média(2019-2021)		53673096,60	15181,73	41,59	19759,94	54,14	17789,13	48,74

Fonte: Autoria própria.

esteve entre 72,4% para a curva construida a partir de dados do molinete e 69% baseada nos dados de vazão da SAISP. É evidente que as descargas solidas seguem o padrão sazonal de vazões do rio Jundiaí e adverte-se da variabilidade entre meses

de distintos anos, por exemplo o mesmo mês de fevereiro após de apresentar grandes descargas no 2020 passou para valores por baixo das 1.000 t no seguinte ano.

Figura 45 - DSS mensal no período monitorado usando os três métodos propostos.



Fonte: Autoria própria.

Finalmente, são apresentado os valores de produção de sedimentos para cada um dos meses monitorados expressos em unidades de t/km^2·ano (Tabela 20).

Tabela 20 - Produção de sedimentos da parte alta da bacia do rio Jundiaí para cada mês monitorado (todos os dados são expressos em t/km^{2}ano).

											nov-18	**dez-18**
turbidez											193,94	432,17
molinete											94,35	743,04
SAISP											133,89	889,69
	jan-19	**fev-19**	**mar-19**	**abr-19**	**mai-19**	**jun-19**	**jul-19**	**ago-19**	**set-19**	**out-19**	**nov-19**	**dez-19**
turbidez	336,28	388,72	273,23	108,72	26,18	81,44	171,68	9,10	13,70	4,24	57,88	109,68
molinete	212,56	316,19	142,32	30,63	11,06	39,54	286,47	8,26	6,67	1,15	6,59	30,35
SAISP	282,07	415,96	212,48	51,38	20,22	60,79	356,77	15,45	12,38	2,42	11,61	47,03
	jan-20	**fev-20**	**mar-20**	**abr-20**	**mai-20**	**jun-20**	**jul-20**	**ago-20**	**set-20**	**out-20**	**nov-20**	**dez-20**
turbidez	350,37	742,06	46,07	6,55	4,22	43,67	4,96	14,80	3,47	40,40	50,31	177,13
molinete	292,97	1103,31	19,73	3,54	1,59	8,92	2,38	3,72	0,84	6,19	7,06	73,62
SAISP	375,99	1337,60	34,31	6,95	3,30	15,22	4,82	6,94	1,77	10,45	12,18	106,36
	jan-21	**fev-21**	**mar-21**									
turbidez	286,76	69,82	161,11									
molinete	236,04	15,09	66,69									
SAISP	316,77	24,66	93,35									

Fonte: Autoria própria.

O cálculo da média anual estimada para os anos de 2019 e 2020 sem considerar os dados de 2018 e 2021 para não causar sobrestimação por serem dados em época de chuvas, resultou em 127,7 t/km$^{2.}$ano, 108,99 t/km^{2}ano e 141,85 t/km$^{2.}$ano para o método de correlação turbidez-CSS, curva chave com emprego de molinete e curva chave com dados da SAISP, respeitivamente, desta forma, constatou-se que a bacia do rio Jundiaí de acordo ao referido por Carvalho et al. (2000) está em condições moderadas de produção de sedimentos dentro do intervalo de 70 a 175 t/km$^{2.}$ano.

5. **CONCLUÇÕES**

O estudo analisou a viabilidade da reutilização de dados de turbidez de água bruta na ETA do rio Jundiaí na cidade de Campo Limpo Paulista, procurando adaptar e comparar os métodos já propostos para monitoramento hidrossedimentológico em cursos naturais.

Em primeiro lugar, a avaliação das distribuições granulométricas mostrou uma forte predominância da fração silte, ficando entre o 72,9% a 89,7%. A variação temporal foi maior para as areias finas (6,1% a 26,1%) e as fração argila, areia meia e grossa foram mínimas na maior parte das medições. Por outra parte, não se apresenta uma diferença significativa (<18% na fração de areias finas) entre os Locais 1 e 2 de medição, mas existe uma redução dos tamanhos de partículas (D_{50} médio para o Local 1 foi de 0,030 mm e para o Local 2 de 0,025 mm) e CSS devido a alteração das condições de fluxo impostas pela comporta de regularização no Local 2, estas diferenças não são significativas para alterar a medição de turbidez e inviabilizar a utilização deste método.

As curvas de permanência para vazão e turbidez do rio Jundiaí forneceram uma análise da abrangência dos dados usados para a construção das correlações turbidez-CSS e as curvas chave de sedimentos, o emprego de amostras sintéticas mostrou-se adequado como uma forma de complementar os valores máximos de CSS-turbidez por cima dos 1000 NTU.

A correlação entre a turbidez e CSS para o rio Jundiaí expressada numa relação potencial usando regressão não linear apresentou os melhores estatísticos de avaliação (R^2=0,93; RMSE=128,9 e PRESS=2.199.716) quando comparados com a regressão linear simples e transformada a espaço logarítmico, além de minimizar as diferencias com os dados observados no intervalo de altas concentrações o que tornou as estimativas de CSS muito mais acurada nos eventos de chuva.

Na aplicação do método turbidimétrico para medição alternativa de CSS, destaque-se a importância de realizar um protocolo de medição de acordo com às necessidades de calibração, que vise um controle amostral próximo do local de medição de turbidez, procurando representatividade e abrangência dos pares de dados frente as características hidrológicas no intervalo de tempo monitorado, além da avaliação granulométrica que viabilizem o emprego desta técnica, este conjunto de atividades ainda são pouco abordadas nos monitoramentos hidrossedimentológicos

em bacias hidrográficas brasileiras usando métodos alternativos de turbidez, consequentemente deveriam converter-se em boas práticas para futuras medições e analises.

O reuso de dados de turbidez de ETA delineou algumas vantagens e limitações frente ao uso de sondas *in situ* instaladas dentro de corpos hídricos. O processo de diluição realizado nas ETAs quando apresentadas altas concentrações fazem com que se tenha uma medição sem um limite específico, caso contrário, as sondas turbidimétricas apresentam um valor máximo de detecção onde CSS superiores não serão bem definidas podendo até decair o sinal com o aumento das concentrações.

Por outro lado, os equipamentos usados nas ETAs devem ser calibrados e receber manutenções periódicas acordes com as exigências sanitárias, que contrasta com os possíveis problemas advindos por sondas mal calibradas e com deficiências operacionais por manutenções de campo negligentes, ainda fatores de segurança e de custos operacionais para o programa de monitoramento podem ser reduzidos com o reaproveitamento de dados das ETAs considerando que a medição de turbidez de aguas brutas é um processo rotineiro para o funcionamento das mesmas.

Uma das limitações está associada ao erro humano no momento da realização de cada medição de turbidez, ainda que seja a cargo de pessoal técnico qualificado não está isento de erros de difícil detecção e correção, diferente dos dados automatizados de uma sonda que estão mais propensos a apresentar erros sistemáticos. Por outra parte, as medições realizadas pelas ETAs, não sempre são nas condições naturais de fluxo como no caso especifico de estudo, fazendo que seja necessário avaliar detalhadamente a existência de possíveis diferencias. Finalmente, a frequência de medição realizada nas ETAs é menor do que a resolução temporal das sondas de turbidez, que para monitoramentos em pequenas bacias hidrográficas não conseguiriam detalhar a dinâmica de sedimentos em eventos de chuva.

Com relação a construção das curvas chaves, a pouca quantidade de dados a partir de medições com molinete fluviométrico em altas vazões, compromete a validez da relação, sendo a equação de correlação turbidez-CSS mais adequada para quantificar a dinâmica de transporte de sedimentos. No entanto, quando comparadas as DSS totais usando as curvas chaves e os dados de turbidez dentro do período monitorado a diferença não excedeu o 15,5 %.

A DSS total para o rio Jundiaí no período monitorado (Nov-2018/Mar-2021) usando os dados de turbidez foi de 56.449 t, com aproximadamente 67,5% dos

sedimentos transportados em apenas 5% do tempo, que teoricamente corresponderia aos eventos de fortes precipitações. O mês que apresentou a maior taxa de descarga foi fevereiro de 2020 representando o 50% da carga desse ano. Observando o valor médio de produção de sedimentos anual para 2019 e 2020 considera-se uma bacia hidrográfica com condições moderadas de produção, espera-se que estudos posteriores usando as séries históricas de CSS desenvolvidas e modelamento físico apontem um entendimento mais detalhado das relações e fatores espaço-temporais que intervêm nos processos de erosão e transporte de sedimentos.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas; **Rochas e solos**. NBT 6502/95, Rio de Janeiro, 1995.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas; **Solo – Análise granulométrica**. NBT 7181 de 09/2016, Rio de Janeiro, 2016.

AGUIAR, M. R. F. 2015. **Análise da descarga sólida em suspensão na Bacia do Riacho Fundo, Brasília - DF**. 2015. 87 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2015. Disponível em: https://repositorio.unb.br/handle/10482/20693. Acesso em: 21 set. 2021.

AHN, Kuk-Hyun; STEINSCHNEIDER, Scott. Time-varying suspended sediment-discharge rating curves to estimate climate impacts on fluvial sediment transport. **Hydrological Processes**, v. 32, n. 1, pp. 102–117. 2018. DOI: 10.1002/hyp.11402.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

ALMEIDA, F.F.M. de. Fundamentos geológicos do relevo paulista. **Boletim do Instituto de Geologia e Geografia**, São Paulo, v. 41, p. 167-263, 1964.

ANDERSON, C. W. Chapter A6. Section 6.7. Turbidity**: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations**. Reston: U.S. Geological Survey. 2005. version 2, VA. DOI 10.3133/twri09A6.7. Disponivel em: https://pubs.usgs.gov/twri/twri9a6/twri9a67/twri9a_Section6.7_v2.1.pdf. Acesso em: 30 set. 2021.

AQUINO, Igor Guedes de. **Estudo da variação da descarga sólida em suspensão da sub-bacia do Riacho Fundo - Lago Paranoá, Brasília - DF**. 2017. 101 f., il. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas)—Universidade de Brasília,

Brasília, 2017. Disponível em: https://repositorio.unb.br/handle/10482/31081. Acesso em: 4 set. 2021.

AQUINO, I. G. de; ROIG, H. L.; OLIVEIRA, E. S.; GARNIER, J.; GUIMARÃES, E. M.; KOIDE, S. Variação temporal da descarga sólida em suspensão e identificação de minerais a partir de aperfeiçoamento de método de amostragem automática no Córrego Riacho Fundo, Brasília, Distrito Federal. **Geologia USP. Série Científica**, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 171-185, 2018. DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v18-140500. Disponível em: https://www.revistas.usp.br/guspsc/article/view/148413. Acesso em: 9 set. 2021.

ARMIJOS, E. *et al.* Measuring and modeling vertical gradients in suspended sediments in the Solimões/Amazon River. **Hydrological Processes,** [S. l.], v. 31, p. 654–667, 2015. DOI: 10.1002/hyp.11059.

ARMIJOS, E. **Propagação dos Fluxos de Sedimentos em suspensão do Rio Amazonas- Trecho Tamshiyacu (Peru) até Óbidos (Brasil) - Variabilidade Espacial e Temporal.** 2015. 177 f. Tese (Clima e Ambiente (CLIAMB)) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2015. Disponível em: https://bdtd.inpa.gov.br/handle/tede/2161. Acesso em: 23 set. 2021.

ARORA, J. S. More on Numerical Methods for Unconstrained Optimum Design. *In*: Arora, J. S. **Introduction to Optimum Design**. 2 ed. San Diego: Academic Press. 2004. p 305-337. DOI: 10.1016/B978-0-12-064155-0.X5000-9.

ASSELMAN, N. E. M. Fitting and interpretation of sediment rating curves. **Journal of Hydrology,** [S. l.], v. 234, p. 228–248. 2000. DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00253-5.

ASTM INTERNATIONAL **Terminology for Fluvial Sediment.** West Conshohocken: ASTM International. 2016. DOI: https://doi.org/10.1520/D4410-16.

ASTM INTERNATIONAL. **Standard Test Method for Determination of Turbidity Above 1 Turbidity Unit (TU) in Static Mode**'. West Conshohocken: ASTM International, 2017. DOI: 10.1520/D7315-17.

BACK, Á. J. **Bacias hidrográficas: Classificação e caracterização física**. Florianópolis: EPAGRI, 2014. 162p.

BAKER, E. T.; LAVELLE, J. W. Effect of particle size on the light attenuation coefficient of natural suspensions. **Journal of Geophysical Research**, [s. l.], v. 89, n. C5, p. 8197–8203. 1984. DOI: 10.1029/JC089iC05p08197.

BARROS, Claudia Alessandra Peixoto de. **Hydrosedimentological behavior of a rural watershed using technical monitoring and modeling**. 2012. 180 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012. Disponível em: http://repositorio.ufsm.br/handle/1/5550. Acesso em: 17 sep. 2021.

BARTELS, Guilherme Kruger. **Monitoramento hidrossedimentológico numa bacia hidrográfica do escudo sul-rio-grandense**. 2015. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015. Disponível em: http://guaiaca.ufpel.edu.br:8080/handle/ri/2800. Acesso em: 17 sep. 2021.

BARTELS, G. K.; TERRA, V. S. S.; COLLARES, G. L. Estimativa da concentração de sedimentos em suspensão com o uso de sensor ótico de turbidez na bacia do Arroio do Ouro no Rio Grande do Sul. *In:* Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 11, 2014, João Pessoa. **Anais.** João Pessoa: ABRH, 2014. Disponivel em: https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/5/e4b33b8839fdf57c6cadeb74441ebe9f_4bc703027252a77417fd778924a17305.pdf. Acesso em: 1 sep. 2021.

BAYRAM, A. *et al*. (2014) Prediction of suspended sediment concentration from water quality variables. **Neural Computing and Applications**, [s. l.], v. 24, p. 1079-1087. 2014. DOI: 10.1007/s00521-012-1333-3. Disponível em: https://gcris.iyte.edu.tr/bitstream/11147/5529/1/5529.pdf. Acesso em: 23 sep. 2021

BONUMÁ, N. B. **Avaliação da qualidade da água sob impacto das atividades de implantação de garimpo no município de São Martinho da Serra**. 2006. 107 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006. Disponível em: http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7768. Acesso em: 10 sep. 2021.

BONUMA, N.; GASTALDINI, M.; PAIVA, J. Análise da Carga Difusa de Poluição Gerada por Atividades de Mineração. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 105–115. 2008. DOI: 10.21168/rbrh. v13n3.p105-115.

BORTOLUZZI E. C.; POLETO C. Metodologia para estudo de sedimentos: ênfase na proporção e na natureza mineralógica das partículas. *In*: POLETO, C. & MERTEN, G. H. **Qualidade de sedimentos**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2013. p.79- 120.

BRAKENSIEK, D. L. *et al.* **Field Manual for Research in Agricultural Hydrology**. Dept. of Agriculture, Science and Education Administration. 1979. p. 547. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=KtN1vgAACAAJ. Acesso em: 1 sep. 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. **Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021**. Brasília, 2021.

BRASIL, J. B. *et al*. 2014. Calibração de turbidímetro para estimativa da concentração de sedimento em suspenção na bacia experimental de Iguatu-CE. *In:* Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 11, 2014, João Pessoa. **Anais.** João Pessoa: ABRH, 2014. Disponivel em: https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/5/c04733c70a56b8545b21966aad55702f_e99803f09235a1e680a85fa61a6f2389.pdf. Acesso em: 3 sep. 2021.

BRIERLEY, G.; FRYIRS, K.; JAIN, V. Landscape connectivity: The geographic basis of geomorphic applications. **Area**, [s. l.], v. 38, p. 165–174. 2006 DOI: 10.1111/j.1475-4762.2006.00671.x.

BRIGHT, C. E.; MAGER, S. M.; HORTON, S. L. Predicting suspended sediment concentration from nephelometric turbidity in organic-rich waters. **River Research and Applications**, [s. l.], v. 34, p. 640–648. 2018 DOI: 10.1002/rra.3305.

CAMPBELL, D. E.; SPINRAD, R. W. The relationship between light attenuation and particle characteristics in a turbid estuary. Estuarine, **Coastal and Shelf Science**, [s. l.], v. 25, p. 53–65. 1987. DOI: https://doi.org/10.1016/0272-7714(87)90025-4.

CARDOSO, A. T.; KOBIYAMA, M.; GRISON, F. Problemas na estimativa de sólidos em suspensão associados à elaboração da curva-chave para sensor de turbidez. *In:* Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 10, 2012, Foz de Iguaçu. **Anais.** Foz de Iguaçu: ABRH, 2012. Disponivel em: Acesso em: https://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/ENES121.pdf. 1 sep. 2021.

CARDOSO, A. T. **Estudo hidrossedimentológico em três bacias embutidas no município de Rio Negrinho, SC**. 2013. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis,2013. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/107007. Acesso em: 10 sep. 2021.

CARVALHO, K.S.; PARANHOS, R.; PAIVA, J. B. D. Limitações ao uso da relação entre turbidez e concentração de sedimento em suspensão em duas pequenas bacias em Santa Maria *in:* Congresso Latino-americano de Hidráulica, 21, 2004, São Pedro. **Anais**. São Pedro: IARH, 2004. Disponível em: https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/535/2020/10/f410.pdf. Acesso em: 3 sep. 2021.

CARVALHO, Flávio Hermínio de. **Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do Cerrado brasileiro**. 2014. 152 f., il. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014. Disponível em: https://repositorio.unb.br/handle/10482/17371. Acesso em: 21 sep. 2021.

CARVALHO, G. A. *et al*. Calibração de turbidimetro. *In:* Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos,13, 2018, Vitoria. **Anais**. Vitoria: ABRH. 2018. Disponível em: https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=4038. Acesso em: 12 sep. 2021

CARVALHO, N. de O. **Hidrossedimentologia prática**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência LTDA, 2008. 599 p.

CARVALHO, N. de O.; BIANCARDINI, F. M.; STRASSER, M. A. 2014 A realização de medições de vazão e de carga de sedimentos visando a boa consistência de dados *in*: Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 11, 2014, João Pessoa. **Anais.** João Pessoa: ABRH, 2014. Disponivel em: https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=11762. Acesso em: 3 sep. 2021.
.

CARVALHO, N. de O.; HORA, M. de A. G. M. Hidrossedimentologia *in*: Poleto, C. (org.) (ed.) **Sedimentologia fluvial: Estudos e Técnicas**. v. 1. Porto Alegre: ABRH, 2014. p. 9–61.

CASTELLTORT, S.; VAN DEN DRIESSCHE, J. How plausible are high-frequency sediment supply-driven cycles in the stratigraphic record?. **Sedimentary Geology**, [s. l.], v. 157, p. 3-13, 2003. DOI: 10.1016/S0037-0738(03)00066-6.

CHAGAS, D. S. **Relação entre concentração de sólidos suspensos e turbidez da água medida com sensor de retroespalhamento óptico**. 2015. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2015. Disponível em: https://www1.ufrb.edu.br/pgea/images/Teses/DENIZE-SAMPAIO-CHAGAS.pdf. Acesso em: 21 sep. 2021

COCHRANE, T. A. *et al*. Development of a river sediment transport monitoring system for large reservoirs. **Applied Engineering in Agriculture**, [s. l.], v. 20(6), p. 771–781. 2004. DOI: 10.13031/2013.17726.

CONNER, C. S.; DE VISSER, A. M. A laboratory investigation of particle size effects on an optical backscatterance sensor. **Marine Geology**, Amsterdam, v. 108(2), p. 151–159. 1992. DOI:1016/0025-3227(92)90169-I.

CONSÓRCIO PROFILL-RHAMA. **Relatório Final do Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, 2020 a 2035.** Piracicaba, p. 129. 2020. Disponível em: https://plano.agencia.baciaspcj.org.br/o-plano/documentos/relat%C3%B3rio-final. Acesso em: 10 sep. 2021.

COSTA, V. Correlation and Regression. *In*: NAGHETTINI, M. (ed.). **Fundamentals of Statistical Hydrology**. Springer International Publishing, p. 391–440. 2017 DOI: 10.1007/978-3-319-43561-9_9.

COSTAS, M. F. T. **Avaliação hidrossedimentológica de uma pequena bacia em urbanização. Universidade Federal de Santa Maria**. 2003. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003. Disponível em: https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/535/2020/10/marcel_ufsm_pdf.pdf. Acesso em: 21 sep. 2021.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Monitoramento especial da bacia do rio Paraopeba relatório 04: Monitoramento Hidrológico e Sedimentométrico**. Belo Horizonte: CPRM, 2019. 95 p. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/21584. Acesso em: 4 sep. 2021.

DAS, S. Hydro-geomorphic characteristics of the Indian (Peninsular) catchments: Based on morphometric correlation with hydro-sedimentary data. **Advances in Space Research**, [s. l.], v. 67, n. 8, p. 2382-2397, 2021. DOI: 10.1016/j.asr.2021.01.043. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.043. Acesso em: 30 jul. 2021.

DALBIANCO, L. *et al.* Sampling strategies to estimate suspended sediment concentration for turbidimeter calibration. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, n. 12, p. 884–889, 2017. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v21n12p884-889.

DAVIES-COLLEY, R.; HUGHES, A. Sediment-related water quality of small hill-country streams near Whatawhata, New Zealand. Response to integrated catchment management (ICM). **New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research**, [s. l.], v. 54, n. 3, p. 329–353, 2020. DOI: 10.1080/00288330.2020.1761840.

DAVIES-COLLEY, R. J.; SMITH, D. G. Turbidity, suspended sediment, and water clarity: A review. **Journal of the American Water Resources Association**, [s. l.], v. 37, n. 5, p. 1085–1101, 2001. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2001.tb03624.x.

DIAS, C. de B. *et al*. Desenvolvimento e calibração de turbidímetro de baixo custo. *In:* Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos,23, 2019, Foz de Iguaçu. **Anais.** Foz de Iguaçu: ABRH. 2019. Disponível em: http://abrh.s3.amazonaws.com/Eventos/Trabalhos/107/XXIII-SBRH0940-1-20190512-191607.pdf. Acesso em: 12 sep. 2021

DIPLAS, P. *et a*l. Sediment Transport Measurements. *In:* GARCIA, M. (ed.). **Sedimentation Engineering**. Reston: American Society of Civil Engineers, 2008, p. 307–353. DOI: 10.1061/9780784408148.ch05.

DOWNING, J. Turbidity Monitoring. *In*: DOWN, R. D. P. E.; LEHR, J. H. (ed.). **Environmental Instrumentation and Analysis Handbook**. [s. l.]: Wiley Online Books, 2005, p. 511–546. DOI:10.1002/0471473332.ch24.

DOWNING, J. P. **Optical backscatter turbidimeter sensor**. U.S. Patent Number4,841,157. 1989. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US4841157A/en. Acesso em: 4 set. 2021.

DOWNING, J. P.; STERNBERG, R. W.; LISTER, C. R. B. New instrumentation for the investigation of sediment suspension processes in the shallow marine environment. **Marine Geology**, [s. l.], v. 42, n. 1, p. 19–34. 1981. DOI: 10.1016/0025-3227(81)90156-0.

DROPPO, I. A New Definition of Suspended Sediment: Implications for the Measurement and Prediction of Sediment Transport. *In:* BOGEN, J.; FERGUS, T.; WALLING, D. E. (eds.) **Erosion and Sediment Transport Measurement in Rivers: Technological and Methodological Advances**. Oslo: IAHS Publ, 2003, v. 283, p. 3–12. Disponível em: https://iahs.info/uploads/dms/iahs_283_003.pdf. Acesso: 4 set. 2021.

DUAN, N. 1983. Smearing estimate: a nonparametric retransformation method. **Journal of the American Statistical Society**, [s. l.], v. 78, n. 383, p. 605–610. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/2288126?seq=1. Acesso em: 10 set. 2021

EDWARDS, T.K.; GLYSSON, G.D. **Field methods for measurement of fluvial sediment.** Denver, CO: US Geological Survey, 1999. 118 p. DOI: 10.3133/twri03C2. Disponível em: https://pubs.usgs.gov/of/1986/0531/report.pdf. Acesso em: 2 set. 2021.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Árvore do Conhecimento – Solos tropicais**. 2017. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/Abertura.html>. Acesso em: 4 set. 2021.

FAGUNDES, H. O. *et al*. Sediment modeling of a large-scale basin supported by remote sensing and in-situ observations. **CATENA**, v. 190. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104535.

FILL, H. D.; SANTOS, I. Estimativa da concentração de sedimentos em suspensão através da profundidade Sechi *in*: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 14; Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos de Língua Oficial Portuguesa, 5, 2001, Aracaju. **Anais**. Aracaju: ABRH, 2001. p. 1–9. Disponível em: http://www.lhg.ufpr.br/arquivos/artigos_congresso/Fill_(2001)_Estimativa_produ%C3%A7%C3%A3o_sedimentos_suspens%C3%A3o.pdf. Acesso em: 5 set. 2021.

FINLAYSON, B. L. Field calibration of a recording turbidimeter. **CATENA**, Braunschweig, v. 12, n. 1, p. 141-147, 1985. DOI: 10.1016/0341 8162(85)90006 2. DOI: 10.1016/S0341-8162(85)80013-8. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816285800138 Acesso em: 5 set. 2021.

FLEMING, G. The application of a continuous monitoring instrument in sediment transport and water pollution studies. **International Association of Scientific Hydrology**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 34–41, 1967. DOI: 10.1080/02626666709493547.

FOSTER, I. D. L.; MILLINGTON, R.; GREW, R. G. The impact of particle size controls on stream turbidity measurement; some implications for suspended sediment yield estimation. *In:* Bogen, J.; Walling, D. E.; Day, T. J (Eds.). **Erosion and sediment**

monitoring programmes in river basins: Proceedings of the International Symposium Held at Oslo, Norway, 24-28 August 1992. [s. l.]: IAHS, 1992. p. 51–62. Disponível em: https://iahs.info/uploads/dms/9049.51-62-210-Foster-opt.pdf. Acesso em: 20 set. 2021.

FRYIRS, K. A. (Dis)Connectivity in catchment sediment cascades: a fresh look at the sediment delivery problem. **Earth Surface Processes and Landforms**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 30–46, 2013. DOI: 10.1002/esp.3242.

FRYIRS, K. A. *et al*. Buffers, barriers and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades. **CATENA**, [s. l.], v. 70, n. 1, p. 49–67, 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.07.007.

GAO, P. Understanding watershed suspended sediment transport. **Progress in Physical Geography: Earth and environment**, [s. l.], v. 32, n. 2, p 243-263, 2008. DOI: 10.1177/0309133308094849.

GARDE, R. J.; RANGA RAJU, K. G. **Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems**. 2 Ed. New York: Ed. Jolm Wiley & Sons, Inc. 1985, 618 p.

GRANGEON, T. *et al*. Variability of the particle size of suspended sediment during highly concentrated flood events in a small mountainous catchment. **Journal of Soils and Sediments**, [s. l.], v. 12, n. 10, p. 1549–1558, 2012. DOI: 10.1007/s11368-012-0562-5.

GARCÍA, J. T.; HARRINGTON, J. R. Fine sediment modeling during storm-based events in the River Bandon, Ireland. **Water**. Switzerland, v. 11. n. 7, p. 1523, 2019. DOI: 10.3390/w11071523.

GARCÍA, M. H. Sediment Transport and Morphodynamics. *in*: GARCÍA, M. (ed.) **Sedimentation Engineering**. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2008. p. 21–163. DOI: 10.1061/9780784408148.ch02.

GIANNINI, P. C. F.; RICCOMINI, C. Sedimentos e processos sedimentares. *In*: TEIXEIRA, W. et al. (eds). **Decifrando a terra**. São Paulo: Oficina de textos, 2000. p. 167–190.

GIPPEL, C. J. **The use of turbidity instruments to measure stream water suspended sediment concentration.** 1988. 204 f. Teses (Doutorado) – The University of New South Wales, Camberra, 1988. DOI: 10.26190/unsworks/8348. Disponivel em: http://hdl.handle.net/1959.4/62954. Acesso em: 10 set. 2021.

GIPPEL, C. J. Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams. **Hydrological processes**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 83–97, 1995. DOI: 10.1002/hyp.3360090108.

GONÇALVES, Alexandre Ortega. **Caracterização hidrossedimentológica e sua relação com o índice de qualidade participativo do plantio direto, na bacia do Alto Paranapanema-SP**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2019. DOI:10.11606/T.11.2020.tde-22012020-095632.

GRASSY, R. G. Use of Turbidity Determinations in Estimating the Suspended Load of Natural Streams. **Journal American Water Works Association**, v. 35, n 4, p. 439–453, 1943. DOI: 10.1002/j.1551-8833.1943.tb17395.x.

GRAY, J. R. The Need for Surrogate Technologies to Monitor Fluvial-Sediment Transport. *in:* GRAY, J. R.; GLYSSON, G. D. (eds.). **Proceedings of the Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop**. Reno: U.S. Geological Survey, Circ., 2003. v. 1250, p. 4.

GRAY, J. R. *et al*. **U.S. Geological Survey research on surrogate measurements for suspended sediment**. Kansas: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. 2003. Disponível em: http://pubs.er.usgs.gov/publication/70120662.

GRAY, J. R.; GARTNER, J. W. Overview of selected surrogate technologies for continuous suspended-sediment monitoring. *In*: **Proceedings of the 8th Federal Interagency Sedimentation Conference, Reno, NV**, Reston: .S. Geological Survey, 2006, p. 337–344. Disponível em: https://acwi.gov/sos/pubs/8thFISC/Session%204C-1_Gray.pdf. Acesso em: 11 set. 2021.

GRAY, J. R.; GARTNER, J. W. Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 45, n. 4, 2009. DOI: 10.1029/2008WR007063.

GRAY, J. R.; GARTNER, J. W. Surrogate Technologies for Monitoring Suspended-Sediment Transport in Rivers', *in*: POLETO, C.; CHARLESWORTH, S. (eds.). **Sedimentology of Aqueous Systems**. London: Wiley-Blackwell (Wiley Online Books), 2010. p. 3–45. DOI:10.1002/9781444317114.ch1.

GRAY, J. R.; LANDERS, M. N. Measuring suspended sediment: Chapter 10. *In*: AHUJA, S. **Comprehensive Water Quality and Purification**. Waltham, MA: Elsevier, 2014. Cap. 10. P. 157-204. DOI: 10.1016/B978-0-12-382182-9.00012-8.

GROBLER, C.; WEAVER, B. Continuous measurement of suspended sediment in rivers by means of a double beam turbidity meter. *In*: INTERNATIONAL ASSOCIATION OF HYDROLOGICAL SCIENCES. **Erosion and Sediment Transport Measurement Symposium**: Proceedings of the Florence Symposium, 22-26 June 1981. Washington, D.C.: IAHS, 1981. p. 97–104. Disponível em: https://iahs.info/uploads/dms/iahs_133_0097.pdf. Acesso em: 20 set. 2021.

GRUTKA, L. (2013) **Estudo das relações entre descargas sólidas e líquidas obtidas por meio de diferentes métodos de medição**. 2013. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013. Disponível em: http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7566. Acesso em: 24 sept. 2021.

GUIMARÃES, J. C. R. **Medida de concentração de sedimentos e turbidez na Bacia Hidrográfica do Lajeado Grande, São Martinho da Serra (RS)**. 2010. 122 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010. Disponível em: http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7530. Acesso em: 24 sept. 2021.

HACHE, I. *et al*. The development and application of an autonomous working turbidity measurement network: Assessing the spatial and temporal distribution of suspended particulate matter on tidal flats in the North Frisian Wadden Sea. **Continental Shelf Research**, [s. l.], v. 176, n. 15, p. 36–50, 2019. DOI: 10.1016/j.csr.2019.02.010.

HARLETT, J. C.; KULM, L. D. Suspended sediment transport on the northern Oregon continental shelf. **Bulletin of the Geological Society of America**, [s. l.], v. 84, n. 12, p. 3815–3826. 1973. DOI: 10.1130/0016-7606(1973)84<3815:SSTOTN>2.0.CO;2.

HOROWITZ, A. J. An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 17, n. 17, p. 3387-3409, 2003. DOI: 10.1002/hyp.1299.

HUDSON-EDWARDS, K. Fluvial environments, *in*: PERRY, C.; TAYLOR, K. (eds.). **Environmental Sedimentology**. [s. l.]: Blackwell Publishing Ltd, 2007. p. 78–108.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Fluvial Sediment Transport: Analytical Techniques for Measuring Sediment Load.** Vienna: IAEA-TECDOC. 2005. Disponível em: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1461_web.pdf. Acesso em: 13 set. 2021.

JUEZ, C.; HASSAN, M. A.; FRANCA, M. J. The Origin of Fine Sediment Determines the Observations of Suspended Sediment Fluxes Under Unsteady Flow Conditions. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 54, n. 8, p. 5654–5669, 2018. DOI: 10.1029/2018WR022982.

KABA, E., PHILPOT, W.; STEENHUIS, T. Evaluating suitability of MODIS-terra images for reproducing historic sediment concentrations in water bodies: Lake Tana, Ethiopia.

International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 286–297, 2014. DOI: 10.1016/j.jag.2013.08.001.

KANTROWITZ, I.H.; WOODHAM, W.M. **Efficiency of a stormwater retention pond in reducing loads of chemical and physical constituents in urban streamflow**, Pinellis County, Florida: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations, 1994, report 94-4217, 18 p. DOI: 10.3133/wri944217.

KIRKEY, W. D.; BONNER, J. S.; FULLER, C. B. 'Low-Cost Submersible Turbidity Sensors Using Low-Frequency Source Light Modulation. **IEEE Sensors Journal**, [s. l.], v. 18, n. 22, p. 9151–9162, 2018. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2869368.

KOBIYAMA, M. *et al*. Landslide influence on turbidity and total solids in Cubatão do Norte River, Santa Catarina, Brazil. **Natural Hazards**, [s. l.], v. 59, n. 2, p. 1077–1086, 2011. DOI: 10.1007/s11069-011-9818-4.

HELSEL, D.R.; HIRSCH, R.M.; RYBERG, K.R.; ARCHFIELD, S.A.; GILROY, E.J. **Statistical methods in water resources: U.S. Geological Survey Techniques and Methods**. Book 4, chapter A3. Reston: U.S. Geological Survey, 2000. 458 p. DOI:10.3133/tm4a3.

LAMB, M. P. *et al*. Mud in rivers transported as flocculated and suspended bed material. **Nature Geoscience**, [s. l.], v. 13, n. 8, p. 566–570, 2020. DOI: 10.1038/s41561-020-0602-5.

LATUF, M. P. *et al*. Aporte sedimentar em suspensão na bacia do rio Machado, sul de Minas Gerais. **Caderno de Pesquisa**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 16–35, 2019. DOI: 10.5752/p.2318-2962.2019v29nespp16.

LATUF, M.; CRUZ, D.; MOURA, B. Obtenção da CCS por meio de Ajustamento Estatístico. *In*: Congresso Internacional de Hidrossedimentologia, 1, 2015, Porto Alegre, **Anais**. Porto Alegre: ABRH, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/280930284_Obtencao_da_CCS_por_meio_de_Ajustamento_Estatistico. Acesso em: 16 set. 2021.

LAWLER, D. Turbidity, Turbidimetry, and Nephelometry. *In*: REEDIJK, J. (Ed.) **Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering**. Waltham, MA: Elsevier, 2016. p. 1–13. DOI: 10.1016/B978-0-12-409547-2.11006-6.

LEEDER, M. R.; HARRIS, T.; KIRKBY, M. J. Sediment supply and climate change: implications for basin stratigraphy. **Basin Research**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 7–18, 1998. DOI: 10.1046/j.1365-2117.1998.00054.x.

RIJN, L. C. van. **Manual sediment transport measurements in rivers, estuaries and coastal seas**. The Netherlands: Aquapublications, 2007. 500 p.

LEWIS, J.; EADS, R**. Implementation guide for turbidity threshold sampling: Principles, procedures, and analysis**, Gen. Tech. Rep. Vol. PSW-GTR-21. Albany, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, 2009. 86 p. DOI: 10.2737/PSW-GTR-212.

LEWIS, J.; EADS, R.; KLEIN, R. **Comparisons of Turbidity Data Collected with Different Instruments.** Report on a Cooperative Agreement between the California Department of Forestry and Fire Protection and USDA Forest Service - Pacific Southwest Research Station (PSW Agreement #06-CO-11272133-041). Santa Rosa, 2007. 27 p. Disponível em: https://water.usgs.gov/fisp/docs/Tprobe_final_report.pdf. Acesso em: 11 set. 2021.

LIMA, J. E. F. W. *et al***. Relação entre a turbidez e a concentração de sedimentos em suspensão em uma bacia agrícola típica do Cerrado**: o caso da bacia experimental do Alto Rio Jardim, DF. *In:* Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19, 2011, Maceió, **Anais.** Maceió: ABRH, 2011. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/81/4c9fe3a57c4cd552505a858ea6f6cbe1_423f913b5d71a58807f5ab3c39c08603.pdf. Acesso em: 23 sept. 2021.

LIMA, J. E. F. W. *et al*. Avaliação do uso de turbidímetro na estimativa da concentração de sedimentos de amostras coletadas em calhas de monitoramento de enxurrada. *In*: Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 11, 2014, João Pessoa, **Anais**. João Pessoa: ABRH, 2014. Disponível em: https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=11726. Acesso em: 23 sept. 2021.

LOPES, G. R. *et al*. Estudo sobre correlação entre turbidez e sólidos em suspensão para estimativa da vazão sólida em uma pequena bacia. *in*: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 18, 2009, Campo Grande, **Anais**. Campo Grande: ABRH, 2009. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/110/74efedf458f75d0fcf9ab0dde368ab34_362761821baa5637b2ead97874f9d3cd.pdf. Acesso em: 19 set. 2021.

LOPES, G. R. **Estudos hidrológicos e hidrossedimentológicos na bacia do Córrego do Capão Comprido, DF**. 2010., 123 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2010. Disponível em: https://repositorio.unb.br/handle/10482/8960. Acesso em: 12 set. 2021.

LOUREIRO, D. D. T. **Métodos atuais e novas tecnologias para o monitoramento do transporte de sedimentos em rios**: necessidade de dados e incertezas envolvidas. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. DOI:10.11606/D.18.2008.tde-17112008-140830.

LOUZADA, R. S. P. **Análise e monitoramento da carga líquida e carga sólida suspensa durante eventos pluviométricos na bacia do Gama/DF entre 2015-2016.** 53 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017. Disponível em: https://repositorio.unb.br/handle/10482/24828. Acesso em: 12 set. 2021.

LUDWIG, K. A.; HANES, D. M. A laboratory evaluation of optical backscatterance suspended solids sensors exposed to sand-mud mixtures. **Marine Geology**, [s. l.], v. 94. N. 1–2, p. 173–179, 1990. DOI: 10.1016/0025-3227(90)90111-V.

LUČIĆ, M.; JURINA, I; SCANCAR, J; MIKAC, N; VDOVIC, N. Sedimentological and geochemical characterization of river suspended particulate matter (SPM) sampled by time-integrated mass flux sampler (TIMS) in the Sava River (Croatia). **Journal of Soils and Sediments,** [s. l.], v. 19, n. 2, p. 1–16, 2018. DOI: 10.1007/s11368-018-2104-2.

MACARTHUR, R. C. *et al*. Overview of Sedimentation Engineering *in*: GARCIA, M. (ed.). **Sedimentation Engineering**. Reston, VA: American Society of Civil Engineers (Books), 2008. p. 1–20. DOI: 10.1061/9780784408148.ch01.

MACHIWAL, D.; JHA, M. K. Methods for Testing Normality of Hydrologic Time Series. *In*: D. MACHIWAL, D.; JHA, M. K. (Eds.). **Hydrologic Time Series Analysis**: Theory and Practice. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012. p. 32–50. DOI: 10.1007/978-94-007-1861-6_3.

MALUTTA, S. *et al*. Hysteresis analysis to quantify and qualify the sediment dynamics: state of the art. **Water Science and Technology**, [s. l.], v. 81, n. 12, p. 2471-2487, 2020. DOI: 10.2166/wst.2020.279.

MANZ, R. E.; SANTOS, I.; PAULA, E. V. de. Monitoramento automático do transporte de sedimento em suspensão por meio de turbidímetro de alta performance *in*: Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 9, 2010, Brasília, **Anais**. Brasília: ABRH, 2010.

MATHI, L. K. *et al*. Rio Jundiaí - Bacia do PCJ: Determinação da correlação entre sedimentos em suspensão e turbidez NTU. *In*: Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 13; Partículas nas Américas, 1, 2018, Vitoria, **Anais**. Vitoria: ABRHidro, 2018. Disponível em: https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=4048. Acesso em: 12 jan. 2021.

MATOS, T. *et al*. Development of a Cost-Effective Optical Sensor for Continuous Monitoring of Turbidity and Suspended Particulate Matter in Marine Environment. **Sensors**, v. 19, n. 20, p. 4439, 2019. DOI: 10.3390/s19204439.

MAZA ALVAREZ, J. A.; GARCÍA FLORES, M. Transporte de Sedimentos. *In*: **Manual de Ingeniería de Ríos**. México: Instituto de Ingeniería de UNAM, 1997. 584 p.

MCBEAN, E. A.; AL-NASSRI, S. Uncertainty in suspended sediment transport curves. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 114, n. 1, p. 63-74, 1988. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:1(63).

MELLO, R. C. A. de. **Análise do aporte de sedimentos na bacia hidrográfica do córrego Assistência, SP: caso do Polo Cerâmico de Santa Gertrudes**. 2015. 102 f. (Dissertação de mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2015. Disponível em: http://hdl.handle.net/11449/131870. Acesso em: 15 jun. 2021.

MERTEN, G. *et al*. **Determinação da concentração de sedimentos em suspensão em rios com o uso de turbidímetro**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2014. 97 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/280599654_Determinacao_da_concentracao_de_sedimentos_em_suspensao_em_rios_com_o_uso_de_turbidimetro. Acesso em: 23 mai. 2021.

MERTEN, G. H.; CAPEL, P. D.; MINELLA, J. P. G. Effects of suspended sediment concentration and grain size on three optical turbidity sensors. **Journal of Soils and Sediments**, [s. l.], v. 14, n. 7, p. 1235–1241, 2014. DOI: 10.1007/s11368-013-0813-0.

MERTEN, G.H.; POLETO, C. Rede de Monitoramento e coleta de Amostras. *In*: POLETO, C. e MERTEN, G.H (org.). **Qualidade dos sedimentos**. 2 edição. Porto Alegre: ABRH, 2013. p. 17-46.

MHASHHASH, A.; BOCKELMANN-EVANS, B.; PAN, S. Effect of hydrodynamics factors on sediment flocculation processes in estuaries. **Journal of Soils and Sediments**, [s. l.], v. 18, p. 3094-3103. DOI: 10.1007/s11368-017-1837-7.

MINELLA, J. P. G. *et al*. Estimating suspended sediment concentrations from turbidity measurements and the calibration problem. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 22, n. 12, p. 1819–1830, 2008. DOI: 10.1002/hyp.6763.

MINELLA, J. P. G. *et al*. Long-term sediment yield from a small catchment in southern Brazil affected by land use and soil management changes. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 32, n. 2, p. 200–211, 2018. DOI: 10.1002/hyp.11404.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. Aplicação das características químicas e físicas dos sedimentos na modelagem dos processos de emissão de sedimentos em bacias hidrográficas. *In*: POLETO, C.; MERTEN, G. (org.). **Qualidade dos sedimentos**. 2 edição. Porto Alegre: ABRH, 2013. p. 259–285.

MOREIRA, F. H. de S. **Interações entre escoamento superficial, hidrossedimentos e radionuclídeos (210Pb, 226Ra, 228Ra, Th e U) no Alto Ribeirão das Antas, Poços de Caldas-MG**. 2017. 136 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2017. Disponível em: https://bdtd.unifal-mg.edu.br:8443/handle/tede/1084. Acesso em: 30 set. 2021.

MORGAN, R. P. C. **Soil Erosion and Conservation**. 3rd edition. Oxford: Blackwell Publishing, 2005. 320 p. DOI: 10.2307/3059905.

MORRIS, G. L.; FAN, J. **Reservoir sedimentation handbook**: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use. New York: McGraw-Hill Book Co, 1998.

MUNDAY, J.; AFOLDI, T.; AMOS, C. Bay of Fundy verification of a system for multidate Landsat measurement of suspended sediment *in*: DEUTSCH, M., WIESNET, D. R., and RANGO, A. (eds.). **Satellite Hydrology.** [s. l.]: American Water Resources Association, 1979 p. 620–640.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E.J.A. **Hidrologia Estatística**. CPRM, 2007. 552p. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/454. Acesso em: 25 jul. 2021.

NEVES, M.A.; CARDOSO, M.D. Qualidade das águas do rio Jundiaí (SP): a necessidade de uma gestão integrada. **Holos Environment**, v. 6, n. 2, p. 91-105, 2007. DOI: 10.14295/holos.v6i2.556.

NEVES, M. A.; MORALES, N.; PEREIRA, S. Y. Caracterização hidrogeológica dos sistemas aqüíferos Cristalino e Tubarão na bacia do rio Jundiaí (SP). **Águas Subterrâneas**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 47-66. DOI: 10.14295/ras.v20i1.9712

NEVES, M.A.; MORALES, N; BORGES, M.S.; EBERT, H.D. Compartimentação morfotectônica da região de Jundiaí (SP). **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 33, n. 2, p. 167-176, 2003. DOI: 10.25249/0375-7536.2003332167176.

NEVES, M.A. **Análise Integrada Aplicada à Exploração de Água Subterrânea na Bacia do Rio Jundiaí (SP)**. 2005. 200 f. Tese (Doutorado em Geologia Regional) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005. Disponível em: http://hdl.handle.net/11449/103008. Acesso em: 30 set. 2021.

OLIVEIRA, Fabiana Gonçalves Carvalho. **Influência da concentração e da granulometria de sedimentos na medida da turbidez com uso de sensor óptico**. 2017. 70 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2017. Disponível em: https://bdtd.unifal-mg.edu.br:8443/handle/tede/1039. Acesso em: 5 sep. 2021.

OLIVEIRA, F. G. C. *et al*. Estimativa da medida da concentração de sedimento em suspensão com o uso de sensor de turbidez. *In*: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 13, 2016, Aracaju. **Anais**. Aracaju: ABRH, 2001.

OLIVEIRA, J. R. de; QUEIROZ, T. M. de. Relação sólidos/turbidez no rio Grande Vermelho - MT: afluente do rio Paraguai na cabeceira do Pantanal. *In*: Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 7 2018. Jardim, MS. **Anais**. Jardim: Embrapa Informática Agropecuária/INPE, 2018. p. 200–209. Disponível em: https://www.geopantanal.cnptia.embrapa.br/Anais-Geopantanal/pdfs/p32.pdf. Acesso em: 14 set. 2021.

ONYUTHA, C. From R-squared to coefficient of model accuracy for assessing "goodness-of-fits". **Geoscientific Model Development Discussions**, 2020. p. 1-25.

PASSOS, Cláudio André dos. **Interação entre os regimes pluvial, hidrológico e hidrossedimentológico na Bacia do Córrego do Gigante – Poços de Caldas – MG**. 2019. 144 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2019. Disponível em: https://bdtd.unifal-mg.edu.br:8443/handle/tede/1515. Acesso em: 21 abril. 2021.

PELLEGRINI, A. *et al*. Calibração de turbidímetro para estimativa da concentração de sedimento em suspenção em uma pequena bacia hidrográfica. *In*: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 33, 2011, Uberlândia, **Anais**. Uberlândia: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. Disponível em: http://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.quoos.com.br/downloads/Producao_Resumos/XXXIII_17.pdf. Acesso em: 14 set. 2021.

PINTO, M. C. F. Análises sedimentométricas. *In*: POLETO, C. (Org.). **Sedimentologia fluvial: estudos e técnicas**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2 edição, v. 1, p. 11-2018.

PEREIRA, M. A. F. **Processo hidrossedimentológicos em diferentes escalas espaço temporais no bioma Mata Atlântica**. 2010. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010. Disponível em: http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7752. Acesso em: 2 set. 2021.

PEREIRA, M. A.; PAIVA, E. M. C. D. de; PAIVA, J. B. Produção de Sedimentos em Diferentes Escalas Espaço-Temporais de Duas Pequenas Bacias e um Lisímetro no Bioma Mata Atlântica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 49–64, 2012. DOI: 10.21168/rbrh.v17n4.p49-64.

PERKS, M. **Spatial and temporal dynamics of fine fluvial sediment transfer: implications for monitoring and management of upland river systems**. 2013. 329 f. Teses (Doutorado em Geografia) – University of Durham, Durham, 2013. Disponível em: http://etheses.dur.ac.uk/7307/. Acesso em: 17 set. 2021.

PERKS, M. T. *et al*. Use of spatially distributed time-integrated sediment sampling networks and distributed fine sediment modelling to inform catchment management. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 202, p. 469–478, 2017. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.01.045.

PETTER, P.; CAVALCANTE, G.; MAGALHÃES, E. Comportamento da turbidez e material em suspensão, em um rio com vazão regularizada por sistema de barragens em cascata: Rio São Francisco (NE, Brasil). **Geochimica Brasiliensis**, [s. l.], v. 29, p. 35–44, 2015. DOI: 10.5327/Z0102-9800201500010004.

PHILLIPS, J. M.; RUSSELL, M. A.; WALLING, D. E. Time-integrated sampling of fluvial suspended sediment: a simple methodology for small catchments. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 14, n. 14, p. 2589–2602, 2000. DOI: 10.1002/1099-1085(20001015)14:14<2589::AID-HYP94>3.0.CO;2-D.

PINHEIRO, E. A. R. *et al*. Calibração de turbidímetro e análise de confiabilidade das estimativas de sedimento suspenso em bacia semiárida. **Water Resources and Irrigation Management**, Campina Grande. v. 2, n. 2, p. 103–110, 2013. Disponível em: https://www3.ufrb.edu.br/seer/index.php/wrim/article/view/1614. Acesso em: 12 set. 2021.

PIRES NETO, A.G. **Estudo Morfotectônico das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí e Áreas Adjacentes no Planalto Atlântico e Depressão Periférica**. 1996. 70 p. Relatório de Pós-Doutoramento, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1996.

POLETTO, K. *et al*. Turbidimetry as an alternative method to determine the rating curve of suspended sediments. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 3, p. 598–606, 2011. DOI: 10.1590/S0100-69162011000300019.

RASMUSSEN, P. P. *et al*. Continuous in-situ measurement of turbidity in Kansas streams. *In*: Gray, J. R. and Glysson, G. D. (eds.). **Proceedings of the Federal**

Interagency Workshop on Turbidity and Other Sediment Surrogates. Reno, Nevada: U.S. Geological Survey, Circ., 2003, v. 1250.

RASMUSSEN, P. P. *et al*. **Guidelines and procedures for computing time-series suspended-sediment concentrations and loads from in-stream turbidity-sensor and streamflow data**: Techniques and Methods 3–C4, Book 3, Applications of Hydraulics Section C, Sediment and Erosion Techniques, Reston: U.S. Geological Survey, 2009. 52 p. DOI: 10.3133/tm3C4.

RIVER, M.; RICHARDSON, C. J. Suspended Sediment Mineralogy and the Nature of Suspended Sediment Particles in Stormflow of the Southern Piedmont of the USA. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 55, n. 7, p. 5665–5678, 2019. DOI: 10.1029/2018WR024613.

RODRIGUES, M. F. **Monitoramento e modelagem dos processos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas florestais no sul do Brasil**. 2011. 208 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais e Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011. Disponível em: http://repositorio.ufsm.br/handle/1/8690. Acesso em: 12 Jan. 2022.

ROMANS, B. W. *et al*. Environmental signal propagation in sedimentary systems across timescales. **Earth-Science Reviews**, [s. l.], v. 153, p. 7-29, 2016. DOI: 10.1016/j.earscirev.2015.07.012.

RYMSZEWICZ, A. *et al*. Measurement differences between turbidity instruments, and their implications for suspended sediment concentration and load calculations: A sensor inter-comparison study. **Journal of Environmental Management**, v. 199, p. 99-108, 2017. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.05.017.

SADAR, M. J. **Turbidity Science**. Technical Information Series—Booklet No. 11. Loveland, CO: Hach Company, 1998. 26 p.

SADAR, M. J. **Turbidimeter Instrument Comparison**: Low-level Sample Measurements. [s. l.]: Hach Company, 1999. 56 p.

SADAR, M. J. **Making sense of turbidity measurements – Advantages in establishing traceability between measurements and technology**. Loveland, CO: Hach Company, 2004. 10 p.

.

SADHASIVAM, N., BHARDWAJ, A., POURGHASEMI, H.R, KAMARAJ, N. P. Morphometric attributes-based soil erosion susceptibility mapping in Dnyanganga watershed of India using individual and ensemble models. **Environ Earth Sci**, [s. l.], v. 79, p. 360, 2020. DOI: 10.1007/s12665-020-09102-3. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12665-020-09102-3. Acesso em: 31 jul. 2021.

SANTOS, B. B. Dos *et al*. Estudo da relação entre a concentração de sedimentos em suspensão e a turbidez no reservatório de Mogi-Guaçu (SP). *In:* Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 11, 2014, João Pessoa, **Anais**. João Pessoa: ABRH. Disponível em: https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/5/f17cd7dd3176db4719453a8cea0b958d_15dd8b2fc5e7d2ac1713d07d6533472a.pdf. Acesso em: 5 Mai. 2021.

SARI, V. *et al*. Calibração de sondas de turbidez em laboratório. *In*: Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 10, 2012, Foz do Iguaçu, Anais. Foz do Iguaçu: ABRH. Disponível em: https://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/ENES200.pdf. Acesso em: 14 Jun. 2021.

SARI, V. *et al*. Efeitos do tamanho da partícula e da concentração de sedimentos suspensos sobre a turbidez', **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 213–219, 2017. DOI: 10.1590/S1413-41522016144228.

SARI, V., CASTRO, N. M.; KOBIYAMA, M. Estimativa da concentração de sedimentos suspensos com sensores ópticos: revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 816–836, 2015. DOI: 10.21168/rbrh.v20n4.p816-836.

SARI, V., POLETO, C.; CASTRO, N. M. Caracterização dos processos hidrossedimentológicos em bacias rurais e urbanas. **Revista Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer**, [s. l.], v. 9, n. 16, p. 596–624, 2013. Disponível em:

http://www.conhecer.org.br/enciclop/2013a/agrarias/caracterizacao%20dos%20processos.pdf. Acesso em: 23 out. 2020.

SARI, V.; CASTRO, N. M.; PEDROLLO, O. C. Estimate of Suspended Sediment Concentration from Monitored Data of Turbidity and Water Level Using Artificial Neural Networks, **Water Resources Management**, [s. l.], v. 31, n.15, p. 4909–4923, 2017. DOI: 10.1007/s11269-017-1785-4.

SÁVIO, B. C. **Uso de turbidímetros eletrônicos no monitoramento do aporte de sedimentos**. 2014. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2014. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/13472. Acesso em: 28 set. 2021.

SCHMIDT, A. O. **Impactos antrópicos na qualidade da água na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco Verdadeiro**. 2014. 73 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2014.

FEDERAL INTERAGENCY SEDIMENTATION. **Field practice and equipment used in sampling suspended sediment**. Interagency Report No. 1. Iowa City, 1940. Disponível em: https://water.usgs.gov/fisp/docs/Report_1.pdf. Acesso em: 12 abri. 2020.

SELLEY, R. C. Weathering and the Sedimentary Cycle. *In*: SELLEY, R. C. **Applied Sedimentology,** [s. l.]: Elsevier, 2000. p. 21–40. DOI: 10.1016/B978-012636375-3/50003-3.

SILVEIRA, L. S. dá *et al.* Calibração de sensor de sedimento em suspensão para as condições de estação de monitoramento na bacia hidrográfica do Arroio Pelotas. *In:* Congresso de Iniciação Científica, 20; Mostra Científica, 3, 2011 Pelotas, **Anais**. Pelotas: UFPel, 2011. Disponível em: https://www2.ufpel.edu.br/cic/2011/anais/pdf/CE/CE_01516.pdf. Acesso em: 12 Mai. 2021.

STEFFY, L. Y. and SHANK, M. K. Considerations for using turbidity as a surrogate for suspended sediment in small, ungaged streams: Time-series selection, streamflow estimation, and regional transferability. **River Research and Applications**, [s. l.], v. 34, n. 10, p. 1304–1314, 2018. DOI: 10.1002/rra.3373.

SUTHERLAND, T. F. *et al*. The calibration of optical backscatter sensors for suspended sediment of varying darkness levels. **Marine Geology**, [s. l.], v. 162, n. 2–4, pp. 587–597, 2000. DOI: 10.1016/S0025-3227(99)00080-8.

SYVITSKI, J. P. M. Supply and flux of sediment along hydrological pathways: Research for the 21st century. **Global and Planetary Change**, [s. l.], v. 39, n. (1-2), p. 1-11, 2003. DOI: 10.1016/S0921-8181(03)00008-0.

TEIXEIRA, E. C.; CALIARI, P. C. Estimation of the concentration of suspended solids in rivers from turbidity measurement: Error assessment. *In*: **Sediment Budgets 1** (Proceedings of symposium S1 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil, April 2005). IAHS-AISH Publication, 2005. p. 151–160. Disponível em: https://iahs.info/uploads/dms/13019.23%20151-160%20S11-32%20Texeira%20&%2 0Caliari.pdf. Acesso em: 10 dez. 2020.

TEIXEIRA, L. C. **Caracterização hidrossedimentométrica de uma pequena bacia hidrográfica e balanço sedimentométrico no reservatório do Vacacaí Mirim**. 2015. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015. Disponível em: http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7651. Acesso em: 9 Jan. 2020.

TEIXEIRA, L. C. *et al*. Relationship between turbidity and suspended sediment concentration from a small hydrographic basin in Santa Maria (Rio Grande do Sul, Brazil). *In*: **International Journal of River Basin Management**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 393–399, 2016. DOI: 10.1080/15715124.2016.1198911.

TOMAZONI, J. C., Mantovani, L. E.; BITTENCOURT. A. V. L.; FILHO, E. F. da R. Utilização de medidas de turbidez na quantificação da movimentação de sólidos por veiculação hídrica nas bacias dos rios Anta Gorda, Brinco, Coxilha Rica e Jirau.

Boletim Paranaense de Geociências, [s. l.], Editora UFPR, v. 57, p. 49–56, 2005. DOI: http://dx.doi.org/10.5380/geo.v57i0.6044.

TRENTO, A. E. **Dinâmica da floculação no transporte de sedimentos finos. Universidade Federal do Rio de Janeiro**. 2005. 170 f. Tese (Doutorado em ciências) – COPPE/Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

TRUHLAR, J. F. Determining suspended sediment loads from turbidity records. **Hydrological Sciences Bulletin**, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 409–417, 1978. DOI: 10.1080/02626667809491820.

VANONI, V. A. **Sedimentation Engineering**. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2006. DOI: 10.1061/9780784408230.

VERCRUYSSE, K.; GRABOWSKI, R. C.; RICKSON, R. J. Suspended sediment transport dynamics in rivers: Multi-scale drivers of temporal variation. **Earth-Science Reviews**, [s. l.], v. 166, p. 38–52, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.12.016.

VESTENA, L. R. **Análise da relação entre a dinâmica de áreas saturadas e o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica por meio de monitoramento e modelagem**. 2008. 144 f. Teses (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em: http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/91570. Acesso em: 18 jul. 2021.

VESTENA, L. R., LUCINI, H.; KOBIYAMA, M. Monitoramento automático da concentração de sedimentos em suspensão na bacia hidrográfica do Caeté, Alfredo Wagner/SC. *In*: Workshop Regional de Geografia e Mudanças Ambientais: Desafios da sociedade do presente e do futuro,1, 2007. Guarapuava, **Anais**. Guarapuava: Unicentro (ed.), p. 61–70.

VOICHICK, N.; TOPPING, D.; GRIFFITHS, R. Technical note: False low turbidity readings from optical probes during high suspended-sediment concentrations.

Hydrology and Earth System Sciences, [s. l.], v. 22, p. 1767–1773, 2018. DOI: 10.5194/hess-22-1767-2018.

WALLING, D. E. Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin **Water Resources Research**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 531–538, 1977. DOI: 10.1029/WR013i003p00531.

WALLING, D. E. The sediment delivery problem. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 65, n. 1, p. 209–237, 1983. DOI:10.1016/0022-1694(83)90217-2.

WALLING, D. E. Human impact on land–ocean sediment transfer by the world's rivers. **Geomorphology**, [s. l.], v. 79, n. (3–4), p. 192–216, 2006. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.06.019.

WALLING, D. E.; TEED, A. A simple pumping sampler for research into suspended sediment transport in small catchments. **Journal of Hydrology**, v. 13, p. 325–337, 1971. DOI: https://doi.org/10.1016/0022-1694(71)90251-4.

WALLING, D. E.; WEBB, B. W. The reliability of rating curve estimates of suspended sediment yield: some further comments. *In*: Bordas M. P.; Walling, D. E. **Sediment Budgets**, proc. Porto Alegre Sym, 337-350 IAHS publ. no. 174, 1988. Disponível em: https://iahs.info/uploads/dms/iahs_174_0337.pdf. Acesso em: 3 fev. 2021.

WANG, Y. M.; KERH, T.; TRAORE, S. Neural networks approaches for modelling river suspended sediment concentration due to tropical storms. **Global Nest Journal**, v. 11, n, 4, p. 457–466. DOI: 10.30955/gnj.000628.

WEST, A. O.; SCOTT, J. T. Black disk visibility, turbidity, and total suspended solids in rivers: A comparative evaluation. **Limnology and Oceanography: Methods**, v. 14, n. 10, p. 658–667, 2016. DOI: 10.1002/lom3.10120.

WILCOCK, P.; PITLICK, J.; CUI, Y. **Sediment Transport Primer: Estimating Bed-Material Transport in Gravel-Bed Rivers**, Fort Collins, CO: U.S. Department of

Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2009. 78 p. Disponível em: https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr226.pdf. Acesso em: 14 jun. 2021.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Manual on Sediment Management and Measurement**. Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization, 2003.

WREN, D. G. Surrogate techniques for suspended-sediment measurement. *In*: GRAY, J. R. and GLYSSON, G. D. (eds.). **Proceedings of the Federal Interagency Workshop on Turbidity and Other Sediment Surrogates**. Reno, Nevada: U.S. Geological Survey, Circ., 2003, v. 1250.

YEO, I.-Y.; LANG, M.; VERMOTE, E. Improved Understanding of Suspended Sediment Transport Process Using Multi-Temporal Landsat Data: A Case Study From the Old Woman Creek Estuary (Ohio)', **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 7, n. 2, p. 636–647, 2014. DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2265191.

ZANANDREA, F*. et al*. Conectividade dos sedimentos: conceitos, princípios e aplicações. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, p. 435–459, 2020. DOI: 10.20502/rbg.v21i2.1754.

ZIEGLER, A. C. Breakout session 1—definition of optical methods for turbidity and data reporting. *In*: *In*: GRAY, J. R. and GLYSSON, G. D. (eds.). **Proceedings of the Federal Interagency Workshop on Turbidity and Other Sediment Surrogates**. Reno, Nevada: U.S. Geological Survey, Circ., 2003, v. 1250, p. 9–13.

ZIEGLER, A. C. Issues related to use of turbidity measurements as a surrogate for suspended sediment. *In*: *In*: GRAY, J. R. and GLYSSON, G. D. (eds.). **Proceedings of the Federal Interagency Workshop on Turbidity and Other Sediment Surrogates**. Reno, Nevada: U.S. Geological Survey, Circ., 2003, v. 1250, p. 16–18.

ANEXO 1. Tabela resumo de estudos com emprego de turbidimetria para avaliação de transporte de sedimentos em suspensão no Brasil.

Autor	Sensor (Resolução /λ)	Período de calibração (campanhas-n de dados)	Local (Estado) (área da bacia)	Equações encontradas	Tipo de ajuste	NS/R²/R
Mantovanelli, et al. (1999)	OBS3 (>790 nm)	6 experimentos em laboratório e comparação em campo, sem especificar	Baia de Paranaguá **(PR)**	Turb=6,9073 Mps + 2,68 (E1, material fino)	linear	R2=0,999
				Turb= 4,4826 Mps + 5,1208 (E2, areia muito fina)	linear	R2=0,999
				Turb= 0,5246 Mps + 7,2487 (E3, areia fina)	linear	R2=0,986
				Turb= 5,9248 Mps + 4,5955 (E4, material fino e areia muita fina)	linear	R2=0,999
				Turb= 4,5695 Mps + 69,9029 (E5, material fino inicial e adição de areia muito fina)	linear	R2=0,993
				Turb= 6,9073 Mps -53,7208 (E6, areia fina inicial e adição de material fino	linear	R2=0,997
Teixeira e Senhorelo(2000)	COLE PARMER, NILES, ILLINOIS – 60714	Sem especificar (oito campanhas de campo/sem especificar)	Bacia do Córrego São Floriano, BoaVista, Nova Almeida, Batatal e Rancho Alegre. Bacia do Rio Jucu Braço Sul **(ES)** (344,38 km2)	SS = 1,0T + 6,3 todos os dados	linear	R2= 0,9821
				SS = 4,8e 0,1T sem chuva	exponencial	R2= 0,9169
				SS = 1,0T+ 8,8com chuva	linear	R2 = 0,9850

Heinz Dieter Fill e Irani dos Santos(2001)	disco de Sechi transparência) de Sechi	40 medições (10 medições em cada posto)junho de 1998 a junho de 1999,	Bacia do rio Barigüi **(PR**) (279 km2) 4 estações	C = 522 d0,236 (C=CSS e d profundidade do disco Sechi) (SS, sólidos totais em mg/L e T, transparência em cm)	Potencial	inferior a 31%
		julho de 1999 nos três (7 dados)	rios Ipiranga (49 km2), São João (151 km2) e Arraial **(PR)**(173 km2)	C=356 d-0,41 (SS, sólidos totais em mg/L e T, transparência em cm)	Potencial	inferior a 14%.
Tonetto (2003)	Mini-sonda Hydrolab 4 A turbidímetro modelo SL2K	setembro de 2000, eventos de chuva (89 valores)	bacia hidrográfica Alto da Colina **(RS)** (1,75 km2)	y = 86,079Ln(x) - 139,42 (y é turbidez (NTU) e x é Sed. Tol (mg/L)	Logarítmica	R2 = 0,6007
		(81 valores)		y = 109,01Ln(x) - 307,64 (y é turbidez (NTU) e x é Sed. Tol (mg/L)	Logarítmica	R2 = 0,926
		(15 valores)		y = 1,6587x - 137,99 (y é turbidez (NTU) e x é Sed. Tol (mg/L)	Linear	R 2 = 0,8749
Carvalho,Paranhos e Paiva (2004)	sonda de turbidez (sem especificar)	agosto de 2001 a junho de 2002 (78 valores)	bacia hidrográfica Menino Deus II **(RS)** (5,03 km2)	CS = 0,046 T1.53 (T<527 NTU) (cs em mg/L e T em NTU)	Potencial	R 2 = 0,765
		junho de 2001 a maio de 2002 (92 valores)	bacia hidrográfica Alto da Colina II **(RS)** (1,36 km2)	CS = 0,0624 T 1,5295 (T<505 NTU) (cs em mg/L e T em NTU)	Potencial	R 2 = 0,73
Cochrane, et al (2004)	Sonda de turbidez desenvolvida no projeto (660−nm light wavelength), optical sensor (OPT101).	(9 amostras)	Río Parana **(PR)**	y = 2.1458e^(−0.0174x) (Y é turbidez em mVe x é CSS)	Exponencial	R2=0,9927

Tomazoni, et al. (2005)	Turbidímetro Micronal, modelo B250 turbidímetro marca Desel	2001, sem especificar	bacias dos rios Anta Gorda, Brinco, Coxilha Rica e Jirau **(PR)** (sem especificar)	y=0,6734x Material particulado suspenso (MPT) em mg/L e x é turbidez(NTU)	Linear	R2=0,8194 (todos os dados)
				y=0,7333x Material particulado suspenso (MPT) em mg/L e x é turbidez(NTU)	Linear	R2=0,981 (dados dentro dos limites de variação
Vestena, Lucini & Kobiyama (2007) e Vestena (2008)	Solar SL 2000-TS (0-2500 NTU/ 700-3x105 ηm)	23/11/2005 (26 amostras de solo) 6 pontos	bacia hidrográfica de Caeté **(SC)** (163 km²)	y = 0,0006x2 + 2,4231x - 276,54 (X é turbidez em mV, y é Concentração de SS diluídos em mg/L)	Potencial-polinomial	R2=0,9993
Bonumá (2006); Nadia Bernardi Bonumá, Maria do Carmo Cauduro Gastaldini, João Batista Dias de Paiva (2008)	Nefelométrico (Sem especificar)	dezembro de 2004 a janeiro de 2006 (11 campanhas de campo em tempo seco e 13 eventos de chuva) (13 valores)	bacia hidrográfica do Lageado Grande **(RS)** (33,12 km2)	y = 3,9853x + 62,841 (y Sólidos suspensos totais em mg/L e x é turbidez em NTU)	Linear	R2 = 0,7248
Minella et al. (2008)	Solar SL 2000-TS (0-2500 NTU/ 700-3x105 ηm)	campo: eventos coletados	bacia de Arvorezinha **(RS)** (1.19 km2)	SSCcalc=0,098XTUR2,313 (SSC em gm/L e Turbidez em %)	Potencial	R2=0,84

		em 8 dias (15/07/04, 20/09/04, 22/09/04 e 23/10/04; 01/04, 11/05, 18/05 e 20/05/05), 458 amostras				
		15 amostras de solo da bacia (<63 µm), medidas em laboratório		SSCsoil=0,569 x TUR2,039 (SSC em gm/L e Turbidez em %)	Potencial	R2=0,807
Lopes et al. (2009) Lopez (2010)	SL2000-TS (0-2500 NTU/ 700-3x105 ηm)	Sem especificar	bacia do Capão Comprido **(DF)** (16,40 km²)	C = 0,0006×T + 0,0046 SS para T < 390 Em que CSS (mg/L) e T (NTU)	Linear	R^2 = 0,9239
				C = 0,0014×T − 0,1646 SS :. para T > 390 Em que CSS (mg/L) e T (NTU).	Linear	R^2 = 0,9084
GUIMARAES, 2010	Sonda DTS-12- Marca FTS (0/1600 NTU780 ηm)	agosto/novembro de 2008 (3 amostragens) j, 16 amostragens Agosto de 2009 (sem especificar valores)	bacia do Arroio Lajeado Grande **(RS)** 33,12 km2)	Css = 1,0649 T – 5,2001 (todas al leituras)	Linear	R2= 0,53
				Css = 15,468e0,0121x (valores médios de turbidez (faixa de 10 ntu) valores médios de CSS) (0-300 NTU)	Exponencial	R2 = 0,6662
				Css = 0,9762 T - 5,5754 (medias por amostragem)	Linear	R2 = 0,8422
				y = 8,3262e0,0356x (valores médios de turbidez (faixa de 10 ntu) valores médios de CSS) (0-50 NTU)	exponencial	R2 = 0,981

				y = 0,5617x + 12,375 (valores médios de turbidez (faixa de 10 ntu) valores médios de CSS) (50-100 NTU	Linear	R2 = 0,3905
				Y= 8E-05x2,7597 (valores médios de turbidez (faixa de 10 ntu) valores médios de CSS) (100-300 NTU	exponencial	R2= 0,55
Manz, Santos & Paula (2010)	DTS-12 (0-1600 NTU/780 ηm)	13 amostras em diferentes condições de vazão	bacia do rio Sagrado **(PR**) (85 km²)	CSS=1,2481.T-3,6393	linear	R²=0,976
Pereira (2010); Pereira, Paiva, Paiva (2012)	Sonda DTS-12 (0/1500 NTU)	julho de 2008 a dezembro de 2009 (sonda de turbidez: 29/09/09 a 11/01/2010,) sem especificar	Rancho do Amaral **(RS)** (4,45 km2)	CSS = 0,5602 . T + 4,1413	Linear	R² = 0,76
	Solar SL 2000-TS (0-2500 NTU/ 700-3x105 ηm)	setembro de 2009 a janeiro de 2010 (Sonda de turbidez 07/08/2009 a 29/12/2009).	Rincão do Soturno **(RS)** (11,98 km2)	CSS = 0,7278 . T - 19,98	linear	R² = 0,71
Silveira, et al. (2011)	SL 2000-TS (0-2500 NTU/ 700-3x105 ηm)	Sem especificar data / 48 amostras de solo compostas, representativas da bacia	Bacia Hidrográfica do Arroio Pelotas, Pelotas **(RS)** Sem especificar	y = 1,9996x0,9067 (Y é CSS em mg/L e x é turbidez em mV)	Exponencial	R2=0,94

Lima et al. (2011)	turbidímetro de bancada (sem especificar)	165 amostras coletadas em períodos de secas e cheias	Bacia Experimental do Alto Rio Jardim **(DF)**(104,86 km²)	Y=1,114x+1,4731 (Onde y é CSS em mg/L e x é turbidez em NTU)	Linear	R2=0,9579
Kobiyama, et al. (2011)	Sem especificar	March 23, 2008, to June 11, 2010 (28 datos de eventos de deslizamentos)	Bacia hidrográfica do río Cubatão do Norte **(SC)** (492 km2)	Sem especificar (Todos os dados)	Sem especificar	R=0,17
				Sem especificar (Antes de um evento de deslizamento)	Sem especificar	R=0,79
				Sem especificar (Após evento de deslizamento)	Sem especificar	R=0,14
Pellegrini, et al. (2011)	Sem especificar	Três eventos de chuva: 21/02/2010, 31/07/2010, 02/09/2010 (82 pares de dados)	bacia de Arvorezinha **(RS)** (1.39 km2)	y=5,1203x-302,7 (Todos os eventos, onde Csss em mg/L e X é turbidez em NTU)	Linear	R2 = 0,66
		15		y = 8,4866x - 590,56 (Sedimento < 106 µm sem dispersão prévia)	Linear	R2 =0,993
		10		y = 14,496x - 1445 (Sedimento disperso com Agitação + 2ml NaOH 6%)	Linear	R2 =0,9502
		10		y = 17,874x – 1526,6 (Sedimento disperso com Agitação)	Linear	R2 =0,9873
		10		y = 47,292x - 4316,8 (Sedimento sem dispersão prévia)	Linear	R2 =0,9766
Poletto, et al. (2011)	Sem especificar	11 medições (11/09/06- 11/16/06 11/20/06 12/15/06 12/22/06 12/27/06 01/04/07 01/15/07	Bacia hidrográfica São Francisco Falso **(PR)** (520.96 km²)	Qss = 51.52 Ln(T) - 101.62 (Descarga solida em suspensão em ton/dia e turbidez em V)	Logarítmica	QME=0.0057 (residual average squared)

		01/24/07 02/01/07 02/09/07)				
Rodrigues (2011)	Sem especificar	Sem especificar (6 amostras com granulometrias selecionadas	Bacia hidrográfica do córrego do horto florestal Terra Dura (94,46 ha). **(RS)**	y= 4,218 x (Y é CSS e X é turbidez em Mv)	Linear	R2=0,98
		Sem especificar (6 amostras com granulometrias selecionadas	E Sub bacia hidrográfica do córrego do mesmo horto (38,86 ha) **(RS)**	y= 3,053 x (Y é CSS e X é turbidez em Mv)	Linear	R2=0,98
Barros (2012)	Solar SL 2000-TS (0-2500 NTU/ 700-3x105 ηm)	Sem especificar	bacia hidrográfica do Arroio Lajeado Ferreira, Arvorezinha **(RS)** (1,19 km2)	Css =1,7738*NTU + 4,16 (IPH-estudo anterior)	Linear	Sem especificar
	ANALITE NEP9500 (0-3000 mV)					
Sari, et al (2012)	DTS-12 -SDI Turbity Sensor da empresa Forest Technology System, LTD. (0-1600 NTU), com uma resolução de 0,01 NTU	Sem especificar	bacias do Taboão (78 km²), **(RS)**	CSS =4,1915261875406 E-4. T² +2,5940109768801.T-11,7256 - 604266052	Polinomial	R² = 0,975
		Sem especificar	do Turcato (19,5 km²) **(RS)**	CSS = 2,49258406690381.T1,06684164079064 (para CSS > 100 mg/L) CSS = 3,32329465614166.T - 0,141809738951552 (para CSS 100 mg/L)	Potencial Potencia polinomial	R² = 0,970 R² = 0,981
		Sem especificar	e do Donato (1,13 km²) **(RS)**	CSS = 3,03088967058664. T1,03193586266284 (para CSS > 100 mg/L)	Potencial Potencia polinomial	R² = 0.952 R² = 0.909

				CSS =3,75657266416121. T-13,7472535935668 (para CSS 100 mg/L)		
Cardoso, Kobiyama e Grison (2012),	FTS (modelo DTS-12).	dezembro de 2011 e junho de 2012 turbidímetro, janeiro e junho de 2012 10 amostras	Bacia Hidrográfica do Rio dos Bugres. **(SC)** (66,41 km2)	CSS = 1,1118 T + 1,9092	Linear	R^2 = 0,9711
				CSS = 2,4086 T 0,7509	Potencial	R^2 = 0,8512
Pinheiro, et al (2013)	(DTS-12)	Sem especificar (6 subamostras de amostragem do reservatório)	Bacia do Açude Benguê, rio umbuzeiro (800 km²) **(CE)**	y=-6*10^-7*X^3+0,0013X^2+0,6306x-5,4136	Potencial-polinomial	R2=0,9999
Grutka (2013)	DTS-12	ano de monitoramento, de novembro de 2011 a outubro de 2012. (sem especificar)	bacia hidrográfica Menino Deus IV, **(RS)** (18,796 km²)	Css = 0,766T + 8,465 (USDH48 ondas de cheia e dias sem precipitação)	Linear	R2=0,867
				Css = 1,0116T + 3,709 (USDH 48 - subida das ondas cheia)	Linear	R2=0,867
				Css = 0,501T + 39,79 (USDH 48 -descida de onda de cheia	Linear	R2=0,735
				Css = 0,001T2 + 0,572T + 13,60 (ISCO na subida e descida das ondas de cheia)	Potencial-polinomial	R^2 = 0,903
				Css = 0,592T1,102 (ISCO subida das ondas de cheia	Potencial	R^2 = 0,925
				Css = 0,001T2 + 0,460T + 22,16 (ISCO na descida das ondas de cheia)	Potencial-polinomial	R^2 = 0,851
Cardoso (2014)	sensor digital de turbidez modelo DTS-12	19 amostras de CSS	bacia hidrográfica do Rio dos Bugres	Primer ajuste: CSS = 2,28XTurb	Linear	R2=0,94
				segundo ajuste: CSS =1,15xTurb (Turb<_ 37,47)	Linear	R2=0,94

			(RB01) **(SC)** 64,41 km2	segundo ajuste: CSS = 2,89xTurb-65,2 (Turb>_ 37,47)	Linear	R2=0,94
		10 amostras de sedimentos em suspensão,	Sub bacia RB10 **(SC)** 11,45 km2	CSS =1,84xTurb	Linear	R2=0,95
		Sem especificar	Sub bacia RB11 **(SC)** 6,95 km2	CSS =2,08xTurb	Linear	R2=0,94
Bartels, Silva e Loguercio (2014)	Turbidímetro marca solar	16/04 a 02/10/2014. (7 amostras de concentração diferente)	bacia do Arroio do Ouro, sub-bacia do Arroio Pelotas - **(RS)** (16,96 km²)	y=4,5439x-178,6	Linear	R2=0,9852
				y=0,0025x^2+2,5953x-37,706	Potencial polinomial	R2=0,9992
				y=2,90889x-47,273 (0 a 400 mg/L)	Linear	R2=0,9559
				y=4,9763x-451,62 (400-4000 mg/L)	Linear	R2=0,9876
				y=0,0149x2+0,5753x-2,6292(0 a 400 mg/L)	Potencial polinomial	R2=0,9997
				y=0,0026x^2+2,2519x+48,845(400-4000 mg/L)	Potencial polinomial	R2=0,9992
Brasil et al (2014)	OBS300 da Campbell Scientific	16 amostras em campo eventos de chuva-deflúvio entre os dias 9 a 16 de maio de 2013, artificialmente 5 e uma de agua destilada	Bacia Experimental de Iguatu (**CE)** (16,74 km2)	y = 7E-05x2 + 0,3523x - 10,093	Potencial polinomial	R2=0,9892
Carvalho (2014)	multiparamétrica (turbidez, pH, temperatura, oxigênio	18 de dezembro de 2012 a 30 de janeiro de 2013.	Bacia do Alto Rio Jardim **(DF)** (104,86 km²)	Y=1,114x+1,4731 (Onde y é CSS em mg/L e x é turbidez em NTU) (Lima et al. 2011)	Linear	R2=0,9579

	dissolvido e condutividade elétrica) HYDROLAB	Calibração sete campanhas de campo entre janeiro e fevereiro de 2013 para coleta de amostras.				
Costa, (2014)	Solar SL 2000-TS (0-2500 NTU/ 700-3x105 ηm)	08/04/2009 a 09/02/2011 (89 amostras)	São Francisco Verdadeiro 139.823 hectares **(PR)**	y=0,3915x-20,925 y em mg/L e x em turbidez em mv)	Linear	R2=0,9678
		28/02/11 a 26/12/11 (46 amostras)	Arroio Xaxim 3.572 hectares**.(PR)**			
Lima, et al. (2014)	Turbidimetro de bancada	160 amostras da mistura água-sedimentos resultante do escoamento superficial ocorrido nas calhas da Serra, e 264 amostras nas da Sede EMBRAPA calhas de Wischmeier.	Bacia Experimental do Córrego Sarandi **(DF)**	y=2,079x+489,063 Solo arenoso	Linear	R2=0,249
				y=1,696x-33,530 solo argiloso	Linear	R2=0,4390
Schmidt (2014)	Tubidímetro de bancada Hach 2100P	Formulas calibradas de outras bacias	bacia hidrográfica do rio São Francisco	Tomazoni et al. (2005) e Guimarães (2010),		

			Verdadeiro **(PR)** (2.219,1 km2)			
Santos. Et al. (2014)	a sonda multiparâmetro YSI 6600	27 e 29 de janeiro de 2014 (1ª campanha) e 20 de março de 2014 (2ª campanha). 61 amostras	sub bacia do Alto Mogi **(SP)** / reservatório	y=0,4436x	Linear	R2=0,4436
Chagas (2015)	modelo OBS 3+, número de série - NS 9118 e 9119, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA),	20 amostras de 0 a 26,7 mg/L	Amostras de solo açude de Fazenda Santo Antônio, **(BA)**	Ŷ = -8E-07x2+ 0,0085x + 0,4072 (todo o solo)	potencial, polinomial	R2=0,994
				Ŷ = 0,0036x + 0,0937 (silte e argila)	Linear	R2=0,999
				Ŷ = -2E-06x2 + 0,0245x - 1,024 (areia fina e muito fina)	potencial, polinomial	R2=0,991
				Ŷ = -7E-06x2 + 0,0351x + 0,6375 (areia grossa e média)	potencial, polinomial	R2=0,9876
Latuf, Santos e Castro (2015)	Turbidimetro de bancada microprocessador	estação chuvosa de 2012/2013 (Outubro/2012 a Março/2013) em dois horários distintos: às 07h00 e às 17h00,	bacia hidrográfica do rio de Ondas **(BA)**	CSS = 3,8358*EXP(0,09349*Turbidez)	exponencial	R2=0,9385
Aguiar (2015)	uma sonda multiparamétrica DS5X da marca Hydrolab. Substituída por outra sonda DS5X.	seis meses entre o mês de novembro de 2014 e abril de 2015 (67 amostras coletadas)	Sub-bacia do Riacho Fundo da bacia hidrográfica do Lago Paranoá **(DF)** (171,26 Km²)	T= 1,5256 CSS + 42,571 (18/12/2014) 14 amostras	Linear	R2=0,9159

Madeiros et al (2015)	sonda multiparamétrica YSI-6600	coletas mensais, durante os anos de 2001, 2004 e 2007.	Rio San Francisco (baixo)	Sem especificar	Linear	R=0,992
					Linear	R=0,977
					Linear	R=0,658
Carvalho (2015)	Hach DR 2800 e Hach turbidimeter 2100 P	Ano hidrológico de 2014 (sem especificar)	bacia hidrográfica do córrego Assistência possui cerca de 38 km2 de área **(SP)**	y=0,3068x+2,691 (CSS em mg/L e turbidez NTU)	Linear	R2=0,9876
Teixeira (2015)	Turbidímetro digital DTS-12 (DTS-12 SDI TURBIDITY SENSOR, 2008). 0 a 1600 NTU.	fevereiro de 2014 a julho de 2015	Sub bacia João Goulart, rio Vacarai Mirim **(RS)** (34,76 km2)	Css=3,064 x T - 22,18 (evento 2/09/2014)	Linear	R2=0,476
				Css = 0,213T^1,612 (evento 12/09/2014)	Potencial	R2=0,955
				Css = 0,326T + 34,26 (evento 30/09/2014)	Linear	R2=0,964
				CSS=0,777 T+29,93 (evento 06/10/2014)	Linear	R2=0,227
				Css=0,795 T^1,229 (melhores correlações)	Potencial	R2=0,84
Bartels (2015)	Solar Instrumentação modelo SL2000-PNV	(16/04/2014 a 15/10/2014). 19 amostras de sedimento suspenso, 13 eventos de chuva	bacia hidrográfica do Arroio do Ouro, **(RS)** (17,17 km2)	Css 0,0098xTurb^2+0,479 xTurb- 77,868	Potencial-polinomial	R2=0,9029
Teixeira et al (2016)	Turbidímetro digital DTS-12 (DTS-12 SDI TURBIDITY SENSOR, 2008). 0 a 1600 NTU.	September to 6 October 2014 (4 eventos de chuva) 96 amostras de sedimentos	Sub bacia João Goulart, rio Vacarai Mirim **(RS)** (34,76 km2)	CSS=0,833T^1,2266	Potencial	R2=0,74
Oliveira, et al (2016)	Solar SL 2000-TS (0-2500 NTU/ 700-3x105 ηm)	Laboratorio (35 amostras)		y=0,9572x-2,2661	Linear	R2=0,82

	sensor de turbidez de bancada (Del lab-DTL-WV			y=1,3192x+33,97	Linear	R2=0,69
Armijos, et al. (2017)	YSI V2 6600 infrared (860-nm wavelength) nephelometer (0.1 NTU resolution, 2% accuracy, and 90° angle detection) Each value of turbidity (T) corresponded to the average signal over a height of 50 cm, and the maximum uncertainty of this measurement was ±7%.	4	(Rio Solimões) 5,961,000 km2 rio amazonas **(AM)**	y=0,4345x-9,0582 (Itacoatiara 12 um)	Linear	Sem especificar
		4		y=1,0302x-2,0529 (Obidos 20 um)	Linear	Sem especificar
		3		y=0,9349x-22,498 (Itacoatiara 20 um)	Linear	Sem especificar
		3		y=0,0863-0,8076 (Fonte boa (133 um)	Linear	Sem especificar
		4		y=0,0525x-1,7226 (Madeira 221 um)	Linear	Sem especificar
		4		y=0,0339-10,993 (Manacapuru (431 um)	Linear	Sem especificar
		4		y=0,0214x+92,684 (Areias)	Linear	Sem especificar
		4		y=0,0295x-0,5183 (finos+ areias)	Linear	Sem especificar
Dalbianco, et al. (2017)	Sem especificar	9	Bacia do rio Conceição **(RS)** (800 km2)	y = 0.003x2 + 1.317x - 19.759 Sampling strategies to estimate suspended sediment concentration for turbidimeter calibration	Potencial-polinomial	R2 = 1.0
		4 eventos (07/21/11; 10/01/;10/08/11; 07/05/12)		y = 1.058x - 28.246 SSC-NTU using suspended sediment samples collected during the rainfalls;	Linear	R2 = 0.693

		191		y = 1.163x - 30.458 SSC-NTU using daily-suspended sediment samples	Linear	R2 = 0.826
		15		y = 0.590x - 3.045 SSC-NTU using weekly-suspended sediment samples.	Linear	R2 = 0.870
		9	Bacia do rio Guaporé **(RS)** (2000 km2)	y = 0.007x2 + 2.307x - 45.795 (Sampling strategies to estimate suspended sediment concentration for turbidimeter calibration	Potencial-polinomial	R2 = 0.976
		3 eventos (08/09/11-08/29/11-07/06/12)		y = 2.108x - 94.462 SSC-NTU using suspended sediment samples collected during the rainfalls;	Linear	R2 = 0.808
		171		y = 0.502x - 1.050 SSC-NTU using daily-suspended sediment samples	Linear	R2 = 0.707
		17		y = 0.549x - 13.835 SSC-NTU using weekly-suspended sediment samples.	Linear	R2 = 0.705
Moreira (2017)	Solar SL 2000-TS (0-2500 NTU/ 700-3x105 ηm)	fevereiro de 2016 e finalizado em abril de 2017	Bacia Hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas **(MG)** (152,4 km2)	CSS=−0,0024*T^2+1,0157*T−7,0284 (estação 2)	Potencial-polinomial	r^2 = 0,9713
Lousada (2017)	sonda Hydrolab DS5X, com range entre 0 e 3000 NTU (Unidade Nefelométrica de Turbidez),	janeiro de 2015 a março de 2016 (11 eventos)	bacia hidrográfica do ribeirão do Gama (**DF)** (147 km2)	Sem especificar. Amostrador automatico	Linear	r2=0,5231
		(24 amostras)		Sem especificar. vertical central	Linear	R2=0,2443
Aquinno (2017) Aquino et al(2018)	Sonda Hydrolab DS5X	Sem especificar	Córrego Riacho Fundo **(DF)** (171,26 km2)	y=0,0002x^2+0,14x+369	Potencial-polinomial	R2 = 0,92

Sari (2017)	de turbidez DTS-12 SDI Turbidity Sensor , zero e 1600 NTU sendo classificado como um sensor óptico-nefelométrico, com comprimento de onda da energia incidente igual a 780 ηm	17 mistura água-sedimento, junio 2013-octubre de 2015 42 amostras em 5 eventos de chuvas Total 59 níveis amostrados	bacia hidrográfica do Taboão **(RS)** (78 km2)	CCS =0,18233+0,237*exp^(0,021018*Turbidez)	Exponencial	NS=0,911
				CSS=0,047056*NA^(1,9817+0,12435*exp^(0,001917*Turb) (NA é o nível da agua em m e Turbidez	Exponencial	NS=0,920
Carvalho (2018)	Sem especificar	12 meses (sem especificar)	sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba **(MS)** (362 km2)	CSS=1,482*T+10,84 (integração na vertical)	Linear	R2=0,842
				CSS=1,606*T+0,887 (pontual)	Linear	R2=0,965
Matti, Braz e Martim (2018)	Hanna	Agosto de 2017 (4 pares de dados)	Bacia alta do rio Jundiaí **(SP)** (100 km2)	Css = 0,14926*T + 17,79542	Linear	R^2 = 0,9018
Ramos e Miranda (2018)	Hanna HI93102 (bancada)	outubro de 2017 a maio de 2018 (8 pares de dados)	bacia hidrográfica do rio Grande Vermelho **(MT)** (867,76 km2)	y = -0,5487x + 66,553 (Y é sólidos totais e x é turbidez	Linear	R2= 0,1349
				y = 61,257e-0,01x	Exponencial	R2=0,0593
				y = 173,2x-0,406	Potencial	R2=0,1029
Golçaves (2019)	OBS-3+, Campbell Scientific Inc. (4000 NTUs) 850 nm ±5 nm	12 amostragens	1 microbacia (0,74 km2) Itaí, **SP**	[CSS]=0,4174.TURB-0,0813 (T<100)	Linear	R2=0,9967
				[CSS]=0,4059.TURB-0,2873 (T>100)	Linear	R2=0,9981
			2 microbacia (0,47 km2) Itaí, **SP**	[CSS]=1,1245.TURB-11,377 (T<100)	Linear	R2=0,9967
				[CSS]=0,8637.TURB+16,276 (T<100)	Linear	R2=0,9981
Latuf, et al (2019)	Sem especificar	2007-2017 (36 amostras)	bacia hidrográfica do rio Machado **(MG)** (775 km2)	CSS=(1,16418*T)+4,53318	Linear	r2=0,8923

Passos (2019)	Sem especificar	05/10/17 - 30/09/2018 (uma precipitação para ocasionar esse valor. Então, foram utilizados 26 dados das campanhas de campo.)	Bacia Hidrográfica do Córrego do Gigante **(MG)** (3,56 km²)	CSS=0,009·Tur2−0,4951·^Tur	Potencial-polinomial	R² = 0,732
CPRM (2019)	YSI EXO1 e Hydrolab MS5 no laboratório foi feita com o equipamento Turbidímetro HACH TL2360.	26/01 a 30/04/2019 (sem especificar)	Bacia do rio Paraopeba **(MG)** (13.640km²) - sendo que a montante do ribeirão Ferro Carvão, onde houve a ruptura da barragem a área é da ordem de 4.000km².	y = 0,4696x1,0321 (Mário Campos)	Potencial	R² = 0,8231
				y = 0,5462x0,936 (Ponte Nova do Paraopeba)	Potencial	R² = 0,8894
				y = 0,6944x0,9514 (ponte da Taquara)	Potencial	R² = 0,9135
Teixeira e Caliari (2005)		The effects of changes in concentration (SSC)	The effects of changes in mean diameter (D50)	The effects of changes in the coefficient of uniformity (Cu)	The effect of colour	
Merten et al. (2014)	Sem especificar	17 meses (1 6coletas)	Rio Cai **(RS)**em especificar	CSS=0,8653T	Linear	R2=0,6236
		17 meses (15 coletas)	Rio sinos **(RS)** sem especificar	CSS=0,768	Linear	R2=0,768
Sari 2015 Revisão -						

Oliveira. 2017	SOLAR SL 2000 PNV,Este sensor opera com feixe de luz no comprimento de onda infravermelho (de 700 a 3x105ηm),	Laboratorio (solo da sub-bacia do Córrego do Gigante que pertence a sub-bacia do Ribeirão do Cipó, encontrada na bacia do Ribeirão das Antas, localizada em Poços de Caldas-MG.)	60- relação CSS turbidez	T= 0,608.CSS	Linear	R^2= 0,932.
		Granulometria				
		Coeficiente angular em função da média das faixas granulométricas, equação da reta e R^2.				
Sari et al (2017)	DTS-12 SDI Turbidity Sensor					