

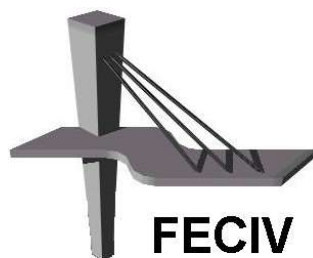


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTUDO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JORDÃO –
UPGRH-PN 1.**

RODRIGO DE ALMEIDA OLIVEIRA PEIXOTO



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Rodrigo de Almeida Oliveira Peixoto

ESTUDO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JORDÃO – UPGRH-PN 1.

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos
para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Ricardo Salla
Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eugênio Pereira

Uberlândia, 28 de fevereiro de 2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

P379e Peixoto, Rodrigo de Almeida Oliveira, 1992
2019 Estudo do transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Jordão – UPGRH-PN 1 [recurso eletrônico] / Rodrigo de Almeida Oliveira Peixoto. - 2019.

Orientador: Marcio Ricardo Salla.

Coorientador: Carlos Eugênio Pereira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.1281>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. 2. Sedimentologia. 3. Sedimentos (Geologia) - Transportes. 4. Bacias hidrográficas – Rio Jordão. I. Salla, Marcio Ricardo, 1976, (Orient.). II. Pereira, Carlos Eugênio, 1974, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDU: 624

Angela Aparecida Vicentini Tzi Tziboy – CRB-6/947



ATA

ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

ATA Nº: 235/2019

CANDIDATO: Rodrigo de Almeida Oliveira Peixoto

Nº. Matrícula: 11712ECV010

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcio Ricardo Salla

TÍTULO: Estudo do transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Jordão – UPGRH-PN 1

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

LINHA DE PESQUISA: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

PROJETO DE PESQUISA: Avaliação do transporte de sedimentos gerados e calibração de parâmetros hidrológicos na bacia hidrográfica do ribeirão Jordão, UPGRH PN-01

DATA DA DEFESA: 28 de fevereiro de 2019

LOCAL: Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y

HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO: 14:00h/17:35h

Reuniu-se na **Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y - Campus Santa Mônica** da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGEC, assim composta: Professores Doutores: **José Eduardo Alamy Filho – FECIV/UFU; João Batista Dias de Paiva – CT/UFSM e Marcio Ricardo Salla** orientador do candidato. Ressalta-se que o **Prof. Dr. João Batista Dias de Paiva** participou da defesa por meio de vídeo conferência desde a cidade de Santa Maria/RS e os demais membros da banca e o aluno participaram in loco.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa **Prof. Dr. Marcio Ricardo Salla** apresentou a Comissão Examinadora e concedeu ao discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou o candidato APROVADO. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.

Membros titulares:

Prof. Dr. Marcio Ricardo Salla – FECIV/UFU

Prof. Dr. João Batista Dias de Paiva – CT/UFSM

Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho – FECIV/UFU



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Ricardo Salla, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/02/2019, às 17:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Eduardo Alamy Filho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/02/2019, às 17:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Batista Dias de Paiva, Usuário Externo**, em 06/03/2019, às 15:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1010797** e o código CRC **AD91ED88**.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar saúde e força para conseguir alcançar meus objetivos.

Aos meus pais, Sílvio e Cássia, e ao meu irmão Alberto, pelo amor, carinho, incentivo, apoio e sacrifício.

Aos meus professores, Carlos Eugênio Pereira e Marcio Ricardo Salla, pela orientação, conhecimentos transmitidos, apoio e amizade ao longo da pesquisa.

Aos professores, José Eduardo Alamy Filho e Hudson de Paula Carvalho, pelas contribuições no trabalho.

À Jessica, pelo carinho, ajuda e compreensão principalmente nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos, pela amizade e por me proporcionarem momentos de descontração.

Aos técnicos dos laboratórios da FECIV, principalmente ao técnico Josildo de Azevedo, pelo grande apoio nos trabalhos de campo.

Ao professor João Batista Dias de Paiva, por ter disponibilizado o programa WinTSR para o desenvolvimento do estudo.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

Por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento dessa pesquisa.

“Não se deve ir atrás de objetivos fáceis, é preciso buscar o que só pode ser alcançado por meio dos maiores esforços.”

Albert Einstein

PEIXOTO, R. A. O. **Estudo do transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Jordão – UPGRH-PN 1**. 2019. 146 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

RESUMO

O entendimento do escoamento de sedimentos é fundamental para a adequada gestão dos recursos hídricos. A falta de planejamento de uso e ocupação do solo, marcado por ações antrópicas irracionais, influencia diretamente o carreamento dos sedimentos nas bacias hidrográficas em todo território nacional. A intensificação do transporte de sedimentos provoca diversos problemas, que interferem nas condições normais de equilíbrio do meio ambiente, prejudicando aspectos ambientais, econômicos e sociais. Nesse contexto, a pesquisa tem como objetivo estudar o transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Jordão, que pertence a Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos – Alto Rio Paranaíba 1 (UPGRH-PN1), visando entender o escoamento das partículas sólidas para contribuir com os estudos relacionados ao assoreamento de reservatórios, planejamento e gestão dos recursos hídricos da região. Para isso foram estabelecidas quatro estações de amostragem, sendo realizado quatorze campanhas de medições de vazões e coletas de água e de sedimentos para análise de sedimentos suspensos e de leito em épocas secas e chuvosas no período de agosto de 2017 a Dezembro de 2018. Com isso foi possível estimar a descarga sólida por diferentes métodos; caracterizar a granulometria dos sedimentos e os aspectos hidráulicos e geométricos das seções estudadas; construir as curvas-chave das vazões líquida e sólida; simular o transporte de sedimentos a partir da ferramenta computacional (HEC-RAS) e analisar os fatores que influenciam o carreamento de sedimentos no Rio Jordão. Os resultados mostraram que as concentrações e descargas de sedimentos apresentaram variações entre as estações e os períodos de amostragem. Na época chuvosa os valores obtidos de descargas e concentrações foram maiores do que no período de estiagem. As curvas-chave de sedimentos em suspensão e totais obtidas, para cada estação e para os dados unidos de todas as estações, apresentaram boas correlações. As simulações indicaram as tendências temporais e espaciais de erosão e deposição de sedimentos ao longo do rio. Com isso, foi possível entender melhor o transporte de sedimentos no Rio Jordão, e

fornecer subsídios para tomada de decisão dos setores competentes, no sentido de melhorar a gestão dos recursos hídricos da bacia hidrográfica.

Palavras-chave: Sedimentologia, Descarga de sedimentos, Curva-chave de sedimentos, HEC-RAS, Rio Jordão.

PEIXOTO, R. A. O. **Study of sediment transport in the watershed of the Jordão river - UPGRH-PN 1**. 2019. 146pp. MSc Dissertation, Faculty of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2019.

ABSTRACT

The understanding of the sediment flow is fundamental for the adequate management of the water resources. The lack of planning for land use and occupation marked by irrational anthropogenic actions directly influences the sediment transport in river basins throughout the national territory. The intensification of the transport of sediments causes several problems that interfere in the normal conditions of balance of the environment, damaging environmental, economic and social aspects. In this context, the research aims to study sediment transport in the Rio Jordão basin, which belongs to the Water Resources Planning and Management Unit - Alto Rio Paranaíba 1 (UPGRH-PN1), in order to understand the the flow of solid particles to contribute to studies related to silting reservoirs, planning and management of the region's water resources. For this purpose, four sampling stations were established, fourteen campaigns were carried out for flow measurements and collection of water and sediments for the analysis of suspended and bed sediments during dry and rainy seasons from August 2017 to December 2018. With this it was possible to estimate the solid discharge by different methods; characterize the sediment granulometry and the hydraulic and geometric aspects of the studied sections; build the key curves of liquid and solid flow; simulate sediment transport from the computational tool (HEC-RAS); and to analyze the factors that influence sediment transport in the river basin of the Jordan River. The results showed that sediment concentrations and discharges showed variations between the seasons and sampling periods. In the rainy season the values of discharges and concentrations were higher than in the dry season. In the rainy season the values of discharges and concentrations were higher than in the dry season. The sediment and total sediment key curves obtained for each season and for the united data of all seasons showed good correlations. The simulations indicated temporal and spatial trends of erosion and sediment deposition along the river. In this way, it was possible to better understand sediment transport transport in the Jordan

River, and to provide subsidies for decision-making by the competent sectors, in order to improve the management of water resources in the river basin.

Keywords: Sedimentology, Sediment Discharge, Sediment Key Curve, HEC-RAS, Rio Jordão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação das formas de transporte de sedimentos. a) arrasto, b) salto, c) suspensão.....	34
Figura 2 - Distribuições verticais que podem ser encontradas em um rio.....	35
Figura 3 - Diagrama de distribuição de velocidade, concentração de sedimentos e descargas sólidas nos rios.....	36
Figura 4 - Mapa representativo de localização da bacia hidrográfica do Rio Jordão.....	48
Figura 5 - Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do Rio Jordão.....	50
Figura 6 - Postos fluviométricos/sedimentológicos e as respectivas imagens dos locais.....	51
Figura 7 - a) Imagem do ADCP, b) Medição da vazão com uso do equipamento.....	53
Figura 8 - a) Molinete fluviométrico, b) Molinete montado para uso	53
Figura 9 - Pontos de fixação do molinete fluviométrico na seção transversal.....	55
Figura 10 - a) Coleta de água realizada em campo; b) Amostrador integrador de série Norte-Americana (U.S–DH 48) e Corda graduada na seção transversal do rio.....	57
Figura 11 - Seção dividida em segmentos de larguras iguais.....	57
Figura 12 - Amostragem pelo método de igual incremento de largura	58
Figura 13 - Sistema para filtração a vácuo.....	60
Figura 14 - O agitador mecânico com a série de peneiras.....	64
Figura 15 - Amostras secadas ao ar.....	64
Figura 16 - Ábaco 1- Obtenção da descarga sólida não medida aproximada, por metro de largura do rio, a partir da velocidade média do curso d'água.....	70
Figura 17 - Ábaco 2- Obtenção da concentração relativa a partir da velocidade média e da profundidade média do curso d'água.....	71
Figura 18 - Ábaco 3- Obtenção do fator de correção a partir da razão de eficiência.....	72
Figura 19 - Fator de correção da distribuição logarítmica da velocidade de Einstein (1950).....	77
Figura 20 - Ábaco da função de carga do fundo segundo Einstein (1950).....	78
Figura 21 - A) Valores de I_1 , em termos de E_1 , para vários valores de z ; B) Valores de I_2 , em termos de E_1 , para vários valores de Z segundo Einstein (1950).....	78

Figura 22 - Valores de Z' em função de $Q's / if.Qf$, para o grão dominante segundo Colby e Hubel (1964).....	79
Figura 23 - A) Integral de $J1$ em termos de $E1$ e Z' ; B) Integral de $J1$ em termos de $E1$ e Z'	79
Figura 24 - A) Integral de $J2$ em termos de $E1$ e Z' ; B) Integral de $J2$ em termos de $E1$ e Z'	80
Figura 25 - Trecho de simulação e perfil transversal das estações criadas no HEC-RAS.....	83
Figura 26 - A) Seção transversal com a mudança vertical no leito; B) Seção transversal após a simulação do escoamento.....	84
Figura 27 - Perfil e módulo da velocidade de escoamento da água nas estações: Estação 1; b) Estação 2; c) Estação 3; d) Estação 4.....	89
Figura 28 - Curvas-chave das estações obtidas entre cota da régua e vazão: A) seção 1; B) Seção 2; C) Seção 3; D) Seção 4.....	90
Figura 29 - Curva granulométrica do material de leito da Estação 1.....	91
Figura 30 - Curva granulométrica do material de leito da Estação 2.....	93
Figura 31 - Curva granulométrica do material de leito da Estação 3.....	94
Figura 32 - Curva granulométrica do material de leito da Estação 4.....	95
Figura 33- Concentração de sedimentos em suspensão nas estações nos diferentes períodos de mostragem.....	99
Figura 34 - Curva-chave de sedimentos da Estação 1.....	100
Figura 35 - Curva-chave de sedimentos da Estação 2.....	100
Figura 36 - Curva-chave de sedimentos da Estação 3.....	101
Figura 37 - Curva-chave de sedimentos da Estação 4.....	101
Figura 38 - Relação entre a descarga sólida em suspensão e a vazão das quatro estações de amostragem do Rio Jordão.....	102
Figura 39 - Curva-chave de sedimentos suspensos do Rio Jordão.....	102
Figura 40 - Relação entre a descarga sólida total e a vazão das quatro estações de amostragem do Rio Jordão.....	103
Figura 41 - Curva-chave de sedimentos do Rio Jordão.....	103
Figura 42 - Correlação entre concentração de sedimentos e vazão na estação 1.....	104
Figura 43 - Correlação entre concentração de sedimentos e vazão na estação 2.....	104
Figura 44 - Correlação entre concentração de sedimentos e vazão na estação 3.....	105
Figura 45 - Correlação entre concentração de sedimentos e vazão na estação 4.....	105

Figura 46 - Correlação entre concentração de sedimentos e vazão do Rio Jordão.....	106
Figura 47 - Vazão, concentração e descarga sólida ao longo do tempo na estação 1.....	107
Figura 48 - Vazão, concentração e descarga sólida ao longo do tempo na estação 2.....	107
Figura 49 - Vazão, concentração e descarga sólida ao longo do tempo na estação 3.....	108
Figura 50 - Vazão, concentração e descarga sólida ao longo do tempo na estação 4.....	108
Figura 51 - Hidrograma gerado pelo HEC-RAS.....	115
Figura 52 - Alteração no leito das estações 2, 3 e 4.....	116
Figura 53 - Mudança temporal na geometria do leito em função da massa acumulativa para cada estação.....	117
Figura 54 - Variação da morfologia transversal: A) Estação 2; B) Estação 3; C) Estação 4.....	118
Figura 55 - Velocidade de escoamento, tensão de cisalhamento e alteração do canal principal em um trecho do Rio Jordão.....	119
Figura 56 - A mudança na geometria do leito pela variação cumulativa longitudinal em massa.....	120
Figura 57 - Perfil longitudinal do trecho de amostragem do Rio Jordão	121
Figura 58 - Perfil e módulo da velocidade de escoamento da água na estação 1: A) Período seco; B) Período chuvoso.....	122
Figura 59 - Perfil e módulo da velocidade de escoamento da água na estação 4: A) Período seco; B) Período chuvoso.....	122
Figura 60 - Curva granulométrica dos sedimentos em suspensão.....	136
Figura 61 - Janela principal do HEC-RAS.....	138
Figura 62 - Janela do editor de dados de geometria do rio.....	138
Figura 63 - Editor de dados de seção transversal.....	139
Figura 64 - Janela do editor de fluxo quase-permanente.....	139
Figura 65 - Editor de série de fluxo.....	140
Figura 66 - Janela do editor de dados de sedimentos.....	140
Figura 67 - Exemplo da curva granulométrica gerada no editor de granulometria de sedimentos de leito.....	141
Figura 68 - Interface principal do programa WinTSR.....	143
Figura 69 - Janela apresentado alguns dados de entrada e os resultados.....	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das principais fórmulas para estimar a descarga de leito e do material de leito.....	41
Tabela 2 - Distância recomendada entre cada seção vertical, de acordo com a largura da seção.....	54
Tabela 3 - Número de pontos e profundidade recomendada em cada seção vertical de acordo com a profundidade.....	54
Tabela 4 - Tempo de pipetagem em função da temperatura, profundidade de retirada e diâmetro de partícula.....	63
Tabela 5 - Valores das constantes da fórmula de Ackers e White.....	69
Tabela 6 - Características hidráulicas e geométricas da estação 1.....	86
Tabela 7 - Características hidráulicas e geométricas da estação 2.....	87
Tabela 8 - Características hidráulicas e geométricas da estação 3.....	87
Tabela 9 - Características hidráulicas e geométricas da estação 4.....	88
Tabela 10 - Diâmetros característicos do material de leito da seção 1 do rio Jordão.....	92
Tabela 11 - Diâmetros característicos do material de leito da seção 2 do rio Jordão.....	94
Tabela 12 - Diâmetros característicos do material de leito da seção 3 do rio Jordão.....	95
Tabela 13 - Diâmetros característicos do material de leito da seção 3 do rio Jordão.....	96
Tabela 14 - Resultados da concentração de sedimentos e descarga sólida estimada pelo método de Coby (1957) nas estações 1 e 2.....	97
Tabela 15 - Resultados da concentração de sedimentos e descarga sólida estimada pelo método de Coby (1957) nas estações 3 e 4.....	98
Tabela 16 - Descargas sólidas da estação 1 estimadas pelos métodos propostos.....	110
Tabela 17 - Descargas sólidas da estação 2 estimadas pelos métodos propostos.....	111
Tabela 18 - Descargas sólidas da estação 3 estimadas pelos métodos propostos.....	112
Tabela 19 - Descargas sólidas da estação 4 estimadas pelos métodos propostos.....	113

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

SÍMBOLOS

A_m	Área molhada da seção transversal do rio
a'	Profundidade não amostrada
A_i	Elemento de área
A e B	Constantes que individualizam cada aparelho aferido.
a e b	Parâmetros de ajuste para determinação da curva chave
C _{ss}	Concentração de sedimentos suspensos
C _{sd}	Concentração de sais dissolvidos
C	Concentração de descarga sólida do material de leito
C _A	Coefficiente da função de transporte de sedimento
d	Profundidade do escoamento
D _{gr}	Diâmetro adimensional do grão
D _i	Diâmetro do grão, da fração considerada
D _m	Diâmetro médio de partícula
D _{si}	Diâmetro médio geométrico entre dois diâmetros de uma faixa
dV	Profundidade média nas verticais de amostragem
D ₃₅	Diâmetro do grão para o qual 35% do material do leito são mais finos
D ₅₀	Diâmetro dos sedimentos em que 50% das partículas são mais finas
D ₆₅	Diâmetro dos sedimentos em que 65% das partículas são mais finas
D ₉₀	Diâmetro dos sedimentos em que 90% das partículas são mais finas
F	Valor do número de Froude em movimento inicial
F _{gr}	Grandeza adimensional de mobilidade

g	Aceleração da gravidade
G_{gr}	Descarga sólida adimensional
H	Cota da régua
i_b	Fração do material do leito de diâmetro D_i
i_s	Fração do material em suspensão de diâmetro D_i
i_f	Fração granulométrica entre os dois diâmetros
K	Fator de correção (adimensional)
K_r	Coefficiente de rugosidade devido à força de cisalhamento
K_{st}	Coefficiente de rugosidade de Strickler
L	Largura da seção
m	Expoente da função de transporte de sedimento
n	Coefficiente de rugosidade
n	Expoente de transição que depende da granulometria do sedimento
N	Número de rotações por segundo
P_m	Perímetro molhado
P_i	Profundidade na primeira vertical amostrada
P_1	Tara do cadinho
P_2	Peso do cadinho com amostra após secagem
q	Descarga líquida por unidade de largura do canal
Q	Vazão total
q_b	Peso submerso do sedimento transportado
Q_b	Descarga de sedimentos
Q_b'	Peso total do sedimento submerso
q_i	Vazão em cada elemento de área
q_{nm}	Descarga sólida não medida aproximada por metro de largura
Q_{nm}	Descarga sólida não medida

Q_{sml}	Descarga sólida de material de leito
Q_{ss}	Descarga sólida em suspensão
Q_{st}	Descarga sólida total
R	Raio hidráulico do fundo
R_h	Raio hidráulico
S	Declividade da linha d'água
S_g	Gravidade específica do sedimento
τ	Tensão de cisalhamento
T	Temperatura
T_{min}	Tempo mínimo de percurso na descida e subida
U	Velocidade média do escoamento
U'	Velocidade de cisalhamento do leito
U^*	Velocidade de atrito relativa aos grãos
V_a	Volume da amostra
V_t	Velocidade de trânsito máxima
w_i	Velocidade de sedimentação
γ	Peso específico da água
γ'_s	Peso específico do sedimento submerso
ρ	Massa específica da água
γ_s	Peso específico do sedimento
ν	Viscosidade cinemática da água
α	Coeficiente no regime turbulento
ρ_s	Massa específica do sedimento
Ψ	Intensidade de atrito, para cada fração individual de grão

ABREVIATURAS

d	Dia
ha	Hectares
h	Horas
L	Litros
m	Metros
m ²	Metros quadrados
m ³	Metros cúbicos
mg	Miligrama
ml	Mililitros
mm	Milímetros
min	Minutos
ppm	Parte por milhão
km	Quilometro
pa	Pascal
s	Segundos
s ²	Segundos quadrados
T	Toneladas

SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APP	Área de preservação permanente
ARCGIS	Geographic Information System - GIS

CL	Carga de leito
CML	Carga de material de leito
EUA	Estados Unidos da América
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center's - River Analysis System
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LABGEO	Laboratório de Geotecnia
LABSAN	Laboratório de Saneamento
MPM	Meyer- Peter e Muller
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
QGIS	Quantum GIS
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
UPGRH-PN1	Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos – Alto Rio Paranaíba 1

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1 Considerações iniciais e justificativas	20
1.2 Objetivos.....	23
1.3 Estrutura do trabalho	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 Bacias hidrográficas	26
<i>2.1.1 Impactos ambientais na bacia hidrográfica devido às atividades antrópicas....</i>	<i>28</i>
2.2 Processos sedimentológicos.....	29
<i>2.2.1 Erosão.....</i>	<i>29</i>
<i>2.2.2 Transporte de sedimentos</i>	<i>32</i>
<i>2.2.3 Deposição de sedimentos</i>	<i>38</i>
2.3 Métodos para estimativa de transporte de sedimentos	39
<i>2.3.1 Método de Meyer-Peter e Muller (1947).....</i>	<i>43</i>
<i>2.3.2 Método de Ackers e White (1973).....</i>	<i>44</i>
<i>2.3.3 Método de Colby (1957).....</i>	<i>44</i>
<i>2.3.4 Método modificado de Einstein Colby e Hembree (1955)</i>	<i>45</i>
2.4 Hec-Ras.....	45
3. METODOLOGIA.....	47
3.1 Caracterização da área de estudo	47
3.2 Monitoramento hidrológico e sedimentológico.....	50
3.3 Determinação da vazão líquida	52
3.4 Determinação da curva-chave	55
3.5 Amostragem e análise de sedimento	56
<i>3.5.1 Amostragem de sedimentos em suspensão pelo método do igual incremento de largura – IIL</i>	<i>56</i>
<i>3.5.2 Análises de concentração de sedimentos em suspensão</i>	<i>59</i>
<i>3.5.3 Análise granulométrica de sedimentos em suspensão.....</i>	<i>61</i>

3.5.4 Amostragem dos sedimentos de material de leito	63
3.5.5 Análises dos sedimentos de material de leito	63
3.6 Estimativa de descarga de sedimentos	65
3.6.1 Descarga de arrasto (Método de Meyer-Peter e Muller (1948)).....	65
3.6.2 Descarga de material de leito (Método Ackers e White (1973)).....	67
3.6.3 Descarga total (Métodos de Colby (1957)).....	69
3.6.4 Descarga total (Métodos de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955)).....	73
3.7 Aplicação do programa Hec-Ras	80
3.7.1 Geometria do Rio.....	80
3.7.2 Escoamento quase-permanente	81
3.7.3 Sedimentos de Leito.....	82
4. RESULTADOS	85
4.1 Caracterização hidráulica e geométrica das seções transversais	85
4.2 Caracterização granulométrica dos sedimentos	91
4.3 Descarga de sedimentos em suspensão e total.....	97
4.4 Descarga de sedimentos pelos métodos propostos	109
4.5 Hec-Has	114
4.6 Análises de fatores que influenciam o carreamento de sedimentos no Rio Jordão.....	121
5. CONCLUSÕES.....	123
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126
APÊNDICE A	135
ANEXO A.....	137
ANEXO B.....	142

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Esse capítulo apresenta a introdução do assunto tratado ao longo do desenvolvimento da dissertação. São expostas as considerações iniciais juntamente com as justificativas para realização da pesquisa. Na sequência é apresentado o objetivo geral, os objetivos específicos, bem como a estrutura geral do trabalho.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E JUSTIFICATIVAS

Na formação do planeta terra, para o surgimento de organismos e aparecimento da espécie humana, a constituição das rochas pela agregação dos minerais e posteriormente formação dos solos foram essenciais. As rochas expostas na superfície terrestre sofrem diversas ações por agentes químicos, físicos e biológicos, esse processo é chamado de intemperismo e atua diretamente na desagregação de partículas e formação dos sedimentos.

Segundo Carvalho (2008), no sentido semântico o termo sedimento refere-se à partícula depositada. Porém, nesse estudo será a partícula derivada da fragmentação das rochas, solo ou material biológico por processos intempéricos, e que pode ser transportada e depositada. A disciplina que estuda os sedimentos, conhecida como sedimentologia, abrange os processos de erosão, transporte e deposição de partículas sólidas. A sedimentologia apresenta grande importância devido à necessidade de entendimento dos diversos fenômenos, problemas ambientais e de engenharia causados pelos sedimentos.

Estudos relativos ao entendimento dos fenômenos da natureza e dinâmica do meio ambiente são realizados desde os primórdios da humanidade. Com o passar do tempo, o desenvolvimento das sociedades, o aumento da população, os processos de revolução

industrial e avanço do modelo econômico capitalista, o homem passa a ter influência mais frequente e expressiva no meio ambiente.

A erosão, transporte e a deposição de sedimentos são fenômenos naturais do meio ambiente que têm sido intensificados e acelerados significativamente pela atividade humana (BRITO et al., 2009). As ações irracionais do homem afetam diretamente o equilíbrio da natureza. O desmatamento, a poluição, a degradação excessiva da mata, do solo e da água intensificam os impactos ambientais de forma negativa trazendo grandes prejuízos. Com isso, tem crescido estudos relacionados à utilização racional dos recursos naturais, com ideias de preservação e conservação, com objetivo de estabelecer um desenvolvimento sustentável.

Dentre os principais fatores relacionados com o aumento da degradação ambiental estão as frequentes alterações não planejadas no uso da terra, acima da capacidade de suporte do solo. A falta de planejamento da bacia hidrográfica e o uso inadequado dos recursos naturais geram contaminação da água e a intensificação de processos erosivos (CARVALHO et al., 2012). Desse modo segundo Arroio Junior (2013), as ações pautadas no manejo integrado dos recursos hídricos são de extrema importância, envolvendo o gerenciamento das águas articulado às ações de planejamento e ordenamento do uso do solo.

A falta de planejamento de uso e ocupação do solo influencia diretamente a dinâmica do sedimento na bacia hidrográfica, favorecendo a erosão dos solos e o aumento da carga de sedimentos no rio. Após ocorrer a erosão, esses sedimentos chegam no corpo hídrico onde são transportados em suspensão ou pelo leito do canal até serem depositados. Apesar da importância de todos esses processos, nesse trabalho será enfatizado o transporte de sedimentos no rio.

Grandes avanços foram dados no entendimento do mecanismo de transporte de sedimentos em rios naturais. Na evolução da ciência da sedimentação fluvial, diversos trabalhos foram realizados, como os de Meyer-Peter e Muller (1948), Ackers e White (1973), Colby e Hembree (1955), Engelund e Hansen (1967), Van Rijn (1984), Cheng (2002), na tentativa de estimar a descarga de sedimentos. A importância deste tópico veio de sua grande influência nas práticas de engenharia fluvial, no gerenciamento de rios e nos projetos de construções hidráulicas. O entendimento sobre o assunto atrai muita atenção das comunidades científicas (NAGY; WATANABE; HIRANO, 2002).

O transporte de sedimentos em um rio natural é um processo transitório, devido a mudanças no escoamento, a qualquer momento, causado por eventos aleatórios. Vários modelos são desenvolvidos para estimar a quantidade de sedimentos transportados, com objetivo de obter uma compreensão mais profunda da dinâmica do transporte de sedimentos e dos eventos que influenciam esse transporte (WANG et al., 2008). Apesar das diversas equações de estimativa, ainda não existe um modelo universal devido à complexidade do processo.

De acordo com Castilho (1998), o levantamento das informações necessárias para a utilização das equações de cálculo da descarga sólida, bem com a instalação de amostradores de material de fundo e a frequência de operações das estações sedimentométricas sendo diária ou mensal, podem, em muitos casos, ser inviável. Sendo assim, é usual o estabelecimento de correlações entre os dados de concentração ou descarga sólida em função da descarga líquida. Essa correlação é chamada de curva-chave de sedimento.

A análise eficiente e o entendimento do transporte de sedimentos juntamente com a descarga líquida de cursos hídricos são essenciais e fundamentais para o bom planejamento e gerenciamento de bacias hidrográficas. As descargas líquida e sólida afetam aspectos ambientais, econômicos e sociais inerentes à população que depende dos recursos naturais da bacia. Os sedimentos e os problemas deles advindos representam, atualmente, um grande desafio para a gestão dos recursos hídricos.

Para Cobaner, Unal e Kisi (2009), o estudo do transporte de sedimentos em rios é muito importante, pois fatores como a poluição da água, assoreamento de rios, diminuição da vida útil de reservatórios, comprometimento de equipamentos, diminuição da produção de energia em hidrelétricas e perda da capacidade de navegabilidade entre outros, são alguns problemas influenciados por esse processo.

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2018), mais de 60% da produção anual de eletricidade do Brasil são provenientes de fontes hidráulicas. Nesse sentido, as pesquisas relacionadas ao assunto se tornam cada vez mais importantes, pois a energia elétrica, fundamental para o desenvolvimento do país é gerada principalmente por usinas hidrelétricas, que apresentam reservatórios sujeitos a assoreamento e turbinas e máquinas propensas a abrasão por partículas suspensas.

A Bacia hidrográfica do Rio Jordão, área de estudo da pesquisa, está inserida nesse contexto, apresentando potencial de geração de energia elétrica para atender a região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. O Rio principal tem ao longo de quase 100 km de comprimento, nove eixos para execução de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), dos quais quatro estão aceitos e cinco tem o eixo disponível segundo informações da ANEEL.

Além da geração de energia elétrica, o entendimento da dinâmica dos sedimentos na área de estudo é importante, pois a região apresenta evidências de ocorrência de processos erosivos que afetam a qualidade ambiental e principalmente a carga de sedimentos no corpo hídrico. Assim, a necessidade de entender a dinâmica das partículas sólidas na bacia hidrográfica é essencial para auxiliar no manejo mais adequado do solo e da água, resultando em melhorias nos aspectos ambientais e econômicos.

Considerando a grande importância do assunto, a dificuldade em compreender os fenômenos, a necessidade de estudos relacionados ao tema para melhor conhecimento do comportamento hidrossedimentológico, e que os problemas causados pelos sedimentos na bacia hidrográfica representam, atualmente, um grande desafio para a adequada gestão e uso dos recursos hídricos, será realizado nessa pesquisa um estudo do transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Jordão.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo Geral

A pesquisa tem como objetivo geral estudar o transporte de sedimentos no Rio Jordão, que pertence à Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos-UPGRH PN-01, visando entender o escoamento das partículas sólidas para contribuir com os estudos relacionados ao assoreamento de reservatórios, planejamento e gestão mais adequada dos recursos hídricos da região.

Objetivos Específicos

- Determinar as curvas-chave de sedimentos e de vazão.

- Caracterizar a granulometria dos sedimentos e dos aspectos hidráulicos e geométricos das seções estudadas.
- Estimar a descarga sólida pelos métodos de Meyer- Peter e Muller (1948), Ackers e White (1973), Colby (1957) e pelo método modificado de Einstein por Colby e Hembree (1955).
- Simular o transporte de sedimentos a partir da ferramenta computacional (HEC-RAS).
- Analisar os fatores que podem influenciar o transporte de sedimentos no Rio Jordão.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura dessa dissertação é constituída de cinco capítulos:

Capítulo 1: Apresenta a introdução do tema abordado com as considerações iniciais a respeito dos sedimentos e a influência do mesmo quando transportado no rio. Simultaneamente à abordagem do tema, é exposta a motivação e importância do desenvolvimento da pesquisa. Na sequência é apresentado o objetivo geral, os objetivos específicos e a estrutura do texto.

Capítulo 2: Apresenta a revisão bibliográfica da dissertação, com a fundamentação teórica desenvolvida a partir do estudo de livros e artigos. Descreve sobre bacias hidrográficas, impactos ambientais devido à ação antrópica, processos sedimentológicos com ênfase no transporte de sedimentos, e por fim apresenta a ferramenta computacional HEC-RAS utilizada na simulação realizada no trabalho.

Capítulo 3: Apresenta a metodologia utilizada na pesquisa. Nesse capítulo é descrito os caminhos percorridos para alcançar os objetivos, com a caracterização da área de estudo, medição de vazão líquida, determinação da curva-chave de vazão e de sedimentos, amostragem e análise de sedimentos suspensos e de leito e os métodos de determinação da descarga sólida.

Capítulo 4: Apresenta os resultados obtidos para cada etapa definida nos objetivos do trabalho. Nesse capítulo são apresentados e analisados os resultados das características hidráulicas e geométricas das seções, das curvas-chave de vazão líquida e sólida, das descargas sólidas em suspensão, das estimativas de descarga de sedimentos pelos métodos, da simulação no HEC-RAS e por fim dos fatores que influenciam o carreamento de sedimentos na Bacia Hidrográfica.

Capítulo 5: Apresenta as conclusões do trabalho.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda aspectos interessantes que da base para o desenvolvimento do estudo. No subitem 2.1 é apresentada a importância das bacias hidrográficas, definições e os impactos ambientais devido às atividades antrópicas. O subitem 2.2 aborda todos os processos sedimentológicos, fazendo definições, mostrando os tipos e os problemas causados pela intensificação de cada processo. No subitem 2.3 são expostos de forma geral os métodos de estimativa de transporte de sedimentos e na sequência especificam-se os métodos de Meyer- Peter e Muller (1948), Ackers e White (1973), Colby (1957) e o método modificado de Einstein por Colby e Hembree (1955). Por último o programa HEC-RAS utilizada no estudo é apresentado.

2.1 BACIAS HIDROGRÁFICAS

A caracterização morfométrica de uma bacia hidrográfica é muito importante e representa um dos primeiros procedimentos na avaliação e análise de diferentes aspectos para o entendimento da dinâmica ambiental regional e local (TEODORO et al., 2007).

Diversas definições de bacia hidrográfica foram formuladas por diferentes autores. Tucci (1997) define como uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída, compondo um conjunto de superfícies vertentes e redes de drenagem de água que confluem até resultar em um leito único. Já para Flotemersch et al. (2015) as bacias hidrográficas são unidades de paisagem que compreende um conjunto de atributos químicos, físicos e biológicos interligados pelo fluxo de água. Essas unidades são delimitadas pela topografia do terreno, representando áreas que contribuem para a drenagem da água para um local específico.

Embora tecnicamente os conceitos de diferentes autores se assemelham pelo fato de considerar as bacias hidrográficas áreas importantes e que apresenta drenagem de água para

um único local, podem existir variações no foco principal, conforme a percepção que os pesquisadores utilizam em seus estudos (PIRES; SANTOS; PRETTE., 2002).

As bacias hidrográficas representam sistemas socioecológicos que fornecem diversos serviços importantes para a sociedade. Sua capacidade de fornecer esses serviços depende diretamente das atividades antrópicas (FLOTEMERSCH et al., 2015). Nesse sentido, para Farber et al. (2002) a acelerada taxa de mudanças no uso e ocupação do solo e consumo de recursos hídricos tem diminuído significativamente a qualidade e quantidade dos serviços oferecidos.

As bacias hidrográficas são formadas por unidades ambientais, em que diferentes elementos naturais ou humanos se interagem de forma efetiva. Qualquer interferência decorrente de atividades antrópicas tende a dirigir-se para o sistema aquático, que é o espelho do que acontece na região. A adoção da bacia hidrográfica como unidade de estudo é de grande aceitação, pois representa uma unidade física bem caracterizada, tanto do ponto de vista de integração como da funcionalidade de seus elementos (PISSARRA, 1998).

A estrutura terrestre segundo Bueno et al. (2010) é fortemente influenciada pelas bacias hidrográficas e suas redes de drenagem, uma vez que as direções preferenciais dos fluxos superficiais definem os mecanismos de erosão e deposição de sedimentos e são resultados da interação do uso e ocupação do solo, clima, aspectos geológicos, tipo de solo, relevo e cobertura vegetal.

Na busca de se garantir um planejamento que tenha como foco a sustentabilidade ambiental, a bacia hidrográfica tem sido um elemento fundamental. O manejo de uma bacia hidrográfica não se restringe apenas aos corpos d'água de superfície, mas inclui a interação de todos os componentes dentro dos limites da bacia hidrográfica (RATHA; AGRAWAL, 2015). Nesse sentido, essas unidades geográficas permitem estabelecer relações entre diversos elementos da natureza e sociedade.

Nesse contexto, a bacia hidrográfica do Rio Jordão foi utilizada para o desenvolvimento desse trabalho. Essa bacia oferece diversos serviços para a população e representa um elemento fundamental para o gerenciamento dos recursos hídricos. Os recursos hídricos provenientes desta bacia hidrográfica são utilizados para diversos fins, além de oferecer

potencial capacidade de geração de energia elétrica através da construção de Pequenas Centrais Hidrelétricas.

2.1.1 Impactos ambientais na bacia hidrográfica devido às atividades antrópicas

Ao longo dos anos, as condições de equilíbrio natural foram progressivamente transformadas pela atividade humana, a qual crescentemente aprofundou os conhecimentos e o grau de intervenção sobre os ciclos da natureza, à medida que aprimoravam os sistemas produtivos e os conhecimentos científicos e tecnológicos (BORINELLI, 2011). Essa interação do homem sobre a natureza resulta em diversas alterações ambientais, podendo provocar sérias modificações que acabam por comprometer a qualidade ambiental (CUNICO, 2007).

A ação antrópica, por meio da intensificação das atividades rurais e industriais e da expansão e desenvolvimento de grandes centros urbanos de forma desordenada, são os principais responsáveis pela degradação ambiental. Nesse contexto, Leff (2010) acredita que a problemática ambiental acarreta várias mudanças globais que comprometem diversos sistemas socioambientais, prejudicando a sustentabilidade do planeta.

Os desmatamentos desordenados, a agricultura e pastagem extensiva, as obras civis sobre a bacia hidrográfica, têm gerado diversos danos ambientais e econômicos, entre eles: o aumento dos processos erosivos, o transporte de sedimentos e contaminantes nos cursos de água e o assoreamento de rios e reservatórios (CARVALHO et al., 2005).

Oliveira Filho et al. (1994) e Arcova e Cicco (1997), já salientavam que a degradação das matas ciliares e o uso agrícola das bacias hidrográficas contribuem para a intensificação do processo de assoreamento e erosão das margens dos cursos hídricos, além de comprometerem o equilíbrio do ecossistema, a qualidade da água, aumentar o transporte de sedimentos e a perda de nutrientes.

As matas ciliares em todo território brasileiro passaram por diversos tipos de degradação. Isso fica evidente quando se consideram as cidades que foram desenvolvidas as margens dos rios (Davide et al., 2002). Nessa perspectiva, Martins (2001) demonstra a importância da conservação e preservação dessa vegetação, para diminuição de erosão e assoreamento,

melhoria da qualidade da água, aumento da infiltração das águas e a regularização da vazão superficial.

A intensificação da erosão devido às atividades antrópicas se constitui no início de todos os problemas derivados do sedimento na bacia hidrográfica. Além de produzir sedimento prejudicial, também pode causar diversos prejuízos nas terras agrícolas. Os sedimentos erodidos podem ser transportados em suspensão no curso hídrico trazendo prejuízos a qualidade da água para consumo, e ainda formar depósitos indesejáveis em outras posições (CARVALHO, 2008).

2.2 PROCESSOS SEDIMENTOLÓGICOS

Os processos responsáveis pela sedimentação são bastante complexos, abrangendo erosão, transporte de sedimentos nos cursos da água, deposição de sedimentos na calha do rio, lagos e reservatórios e sua compactação. Todos esses fenômenos ocorrem naturalmente em tempos geológicos e podem ser agravados por agentes externos (CARVALHO, 2008).

Neste trabalho o transporte de sedimentos no rio será o principal processo a ser estudado, porém ele não ocorre de forma isolada. Assim, foi realizada devido à significativa importância, uma breve revisão de literatura dos fenômenos de erosão, deposição e compactação, além de uma ampla revisão de diversos trabalhos relacionados ao transporte de sedimentos em rios para melhor entendimento da dinâmica dos sedimentos na bacia hidrográfica.

2.2.1 Erosão

A erosão é o fenômeno de desgaste dos solos e rochas, com desagregação, deslocamento ou arrasto das partículas. Os processos erosivos são muito complexos e dependentes de diversos fatores, como: água, temperatura, topografia, tipo de solo, cobertura vegetal, entre outros. Além de aspectos naturais, reconhece que as ações antrópicas intensificam significativamente a erosão nas bacias hidrográficas (REUSSER, BIERMAN E ROOD., 2015; WAN et al., 2015). Esses fatores são chamados de agentes erosivos e correspondem aos elementos do meio físico que causam, ou afetam diretamente a erosão (CARVALHO, 2008).

Ainda segundo Carvalho (2008), existe vários tipos de erosão, contudo a erosão hídrica superficial, a erosão eólica e a fluvial estão dentro dos principais e mais significativos tipos de erosão. No Brasil estima-se que a erosão carrega anualmente 610 milhões de toneladas de solo. Esse material arrastado principalmente pela erosão hídrica, irá se depositar nas depressões e nos rios, causando enormes prejuízos (LIMA et al., 2005).

A erosão hídrica é o processo de desprendimento e transporte de partículas do solo causado pela água. Constitui-se em uma das principais causas de deterioração acelerada das terras utilizadas na agricultura (OLIVEIRA et al., 2005). Esse tipo de erosão está diretamente ligado com a intensidade da precipitação. Panachuki et al. (2006), mostraram que ocorre uma correlação negativa entre a intensidade de precipitação e o tempo de início do escoamento superficial que leva a mobilização das partículas de solo.

Segundo Bissonnais e Singer (1993) a erosão hídrica resulta da interação de forças, como a intensidade de precipitação, a declividade do terreno, a capacidade de infiltração do solo, os métodos de cultivo e a densidade da cobertura vegetal. A resistência do solo determina a sua erodibilidade, que é a tendência inerente do solo de erodir-se em diferentes proporções, devido unicamente às diferenças peculiares de cada classe de solo.

A erosão eólica é provocada pela ação do vento e ocorre principalmente em grandes planícies, dependendo da superfície do terreno, umidade, tamanho e estabilidades das partículas de solo. Sua intensidade está relacionada principalmente com a velocidade dos ventos e a área livre de vegetação ou obstáculos naturais (BRITO, 2012).

A erosão fluvial é aquela que ocorre nos cursos d'água, ocasionada principalmente pela ação das correntes dos rios. Esse tipo de erosão apresenta grande interesse na morfologia fluvial podendo explicar a formação do rio e da rede hidrográfica, sendo responsável pelo alargamento e aprofundamento do leito dos rios (CARVALHO, 2008).

De acordo com Valle Junior (2008), quando a erosão ocorre de forma natural é considerada lenta e gradual, resultando em uma condição de relativa estabilidade do solo. No entanto, quando as atividades antrópicas atuam na intensificação dos processos erosivos, pela não adoção de técnicas apropriadas de diagnóstico e conservação do solo, os danos ambientais podem ser severos.

A erosão do solo é um grande problema ambiental global que envolve principalmente a degradação da terra, sedimentação em cursos d'água, degradação ecológica e poluição de fontes não pontuais. Nesse sentido, é importante entender os processos de erosão do solo e transporte de sedimentos ao longo dos rios, para identificar as áreas propensas à erosão e encontrar medidas potenciais para aliviar os efeitos ambientais (WU; CHEN, 2012).

A ação do homem por meio da inserção de práticas que desequilibram as condições naturais, acelera os processos erosivos originando a erosão acelerada (VALLE JUNIOR, 2008). Muitos estudos demonstram que a erosão degrada o solo resulta em prejuízos sociais bastante elevados para a população que depende desse recurso, pois reduzem a capacidade produtiva pela perda da fertilidade (ALEXANDRIDIS et al., 2013; ATUCHA et al., 2013; FORTIN et al., 2014).

Segundo Yang et al. (2003) a erosão do solo com o consequente transporte e deposição no rio, causam danos ambientais, problemas ecológicos e econômicos em todo mundo. Assim, devido à importância do estudo para o entendimento dos processos erosivos e seus efeitos, muitos pesquisadores desenvolveram diversos trabalhos relacionados com a erosão. Reusser, Bierman e Rood (2015), por exemplo, quantificaram a influência que os impactos antrópicos causam nas taxas de erosão e transporte de sedimentos em bacias hidrográficas. Demonstraram que as atividades agrícolas influenciaram o aumento da produção de sedimentos, e que de todo material erodido apenas cerca de 6% estava sendo transportado nos rios.

Wu e Chen (2012) investigaram a erosão do solo e identificaram as áreas mais seriamente erodidas na bacia hidrográfica do Rio Leste, no sul da China, usando um modelo baseado na Ferramenta de Avaliação de Solo e Água (SWAT). Os autores apresentaram resultados que podem fornecer subsídios para a gestão mais eficiente da bacia hidrográfica com melhores práticas de manejo e conservação. Já Ouyang et al. (2010), avaliaram a interação entre a cobertura vegetal com as características de erosão do solo. Assim, concluíram que o estado da vegetação tem um impacto significativo na formação de sedimentos, erosão e transporte na bacia hidrográfica.

A erosão do solo tem como consequência o aumento do aporte e transporte de sedimentos no curso hídrico. Nesse sentido, o tópico seguinte retratará o transporte de sedimentos no rio.

2.2.2 Transporte de Sedimentos

A produção de sedimentos pode ser entendida como a quantidade de partículas erodidas que são transportadas pelo curso d'água. Essa produção pode ocorrer por fatores antrópicos ou naturais que, associados a inúmeras variáveis, tem maior ou menor produção por área. A produção de sedimentos pode ser expressa em metros cúbicos ou em toneladas, quando referida à área da bacia, podendo ser também expressa como produção específica, em $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{ano}$ ou $\text{t}/\text{km}^2/\text{ano}$ (PEREIRA, 2010).

A carga de sedimentos nos rios é um indicador dos processos erosivos que estão ocorrendo na bacia hidrográfica (SUN et al., 2016). O sedimento produzido chega ao corpo hídrico, onde são depositados ou transportados de diversas formas. De acordo com Carvalho (2008), cada corpo hídrico tem a capacidade de transportar uma determinada quantidade de sedimentos, essa quantidade é conhecida como valor de saturação, e depende da vazão, declividade, granulometria e peso específico dos sedimentos.

Ainda segundo Carvalho (2008), o transporte de sedimentos ocorre principalmente em época chuvosa ou durante fortes precipitações, correspondendo cerca de 80% de todo sedimento transportado no curso d'água. Além de fatores como a precipitação, Mohammad et al. (2016) e Silva et al. (2005), expõem que a carga de sedimentos nos rios é influenciada pelo tipo de solo, cobertura vegetal, uso da terra e topografia da bacia hidrográfica. No rio, devido a grande energia de fluxo de corrente os sedimentos são transportados, porém quando essa corrente chega a um determinado reservatório o fluxo diminui e o sedimento é depositado.

O transporte de sedimentos na água é governado pela relação entre a capacidade de carregamento do escoamento e a força necessária para deslocar as partículas. As partículas mais finas e leves precisam de menos quantidade de energia que as partículas mais pesadas para serem carregadas. Escoamentos muito velozes e turbulentos possuem grande capacidade de carregamento, deslocando partículas finas e grossas, já com a diminuição da velocidade, o transporte de sedimentos se torna mais seletivo. Assim, os processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos são dependentes da granulometria do material particulado presente na bacia (LEOPOLD et al., 1964 apud ROCHA, 2016)

O movimento dos sedimentos depende de diversos parâmetros que podem se relacionar diretamente ou indiretamente com as partículas sólidas. Dolvitsch (2013) exemplifica no seu trabalho alguns parâmetros como: viscosidade cinemática, massa específica, peso específico, diâmetro e forma da partícula, capacidade de transporte e velocidade de queda. Esses parâmetros citados são essenciais para o entendimento do transporte de sedimentos e foram utilizados no desenvolvimento de modelos matemáticos.

Os sedimentos que chegam ao corpo hídrico apresentam diversas granulometrias e serão transportadas de acordo com condições locais e de escoamento. As forças que atuarão sobre as partículas podem mantê-las em suspensão ou no fundo do rio. Essas condições é função do tipo de escoamento, do tamanho, forma e peso da partícula, da velocidade da corrente e de outros fatores inter-relacionados como forma do canal, temperatura da água, declividade do leito entre outros (VANONI, 1977 apud CARVALHO et al., 2000)

Segundo Carvalho (2008), “as formas de transporte sólido são discutidas separadamente, pois o fenômeno não está suficientemente entendido para permitir uma explicação completa e inter-relacionada”. Assim, para o propósito de análise, a carga total de sedimentos é frequentemente dividida em dois grupos, representado pela carga de leito (arrasto e saltante) e carga suspensa (suspensão) (BHOWMIK et al., 1980).

O transporte de sedimentos por fluxo de água depende do material, das condições de fluxo e do tamanho das partículas. Geralmente, os movimentos das partículas são por rolamento, deslizamento e saltos no leito ou através do movimento de partículas suspensas (VAN RIJN, 1984a). Os diversos meios de transporte devem-se ao fato de que os sedimentos apresentam diferentes tipos e características. Sedimentos com granulometria mais grosseira movimentam-se como carga de fundo, enquanto as partículas mais finas são transportadas como carga suspensa no curso hídrico (NAGLE; FAHEY; LASSOIE, 1999).

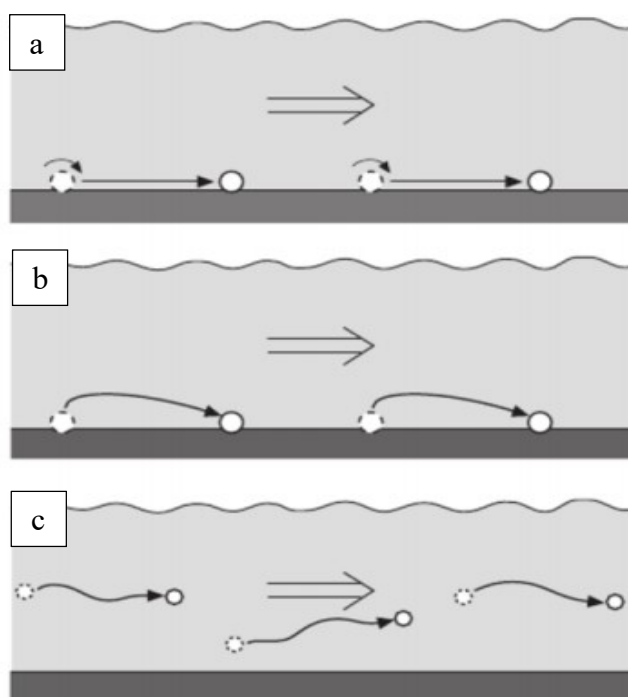
As definições dos tipos de transporte amplamente difundidas na bibliografia estão apresentadas na sequência (*subcommitte on sedimentation*, 1963):

Carga de arrasto: nesse tipo de transporte as partículas sólidas rolam ou deslizam longitudinalmente sem perder contato com o leito. Isso ocorre porque a energia de transporte, com relação ao tamanho e peso da partícula, não é capaz de promover a suspensão nem o salto da partícula;

Carga saltante: nessa forma de transporte, as partículas deslocam por saltos ao longo do curso d'água por efeito de corrente ou por impactos com outras partículas. A ativação do processo de salto depende, além da intensidade do fluxo da corrente, das características de densidade, forma e tamanho da partícula;

Carga em suspensão: representa as partículas que estão suportadas pelas componentes verticais de velocidade do fluxo turbulento, enquanto estão sendo transportadas pelas componentes horizontais dessas velocidades, sendo pequenas suficientemente para permanecerem em suspensão. Neste caso, as partículas são carregadas de forma completamente independente do leito fluvial. A velocidade de deslocamento da partícula no corpo líquido é diretamente proporcional à velocidade da corrente.

Figura 1: Representação das formas de transporte de sedimentos. a) arrasto, b) salto, c) suspensão.



Fonte: Lopes (2012).

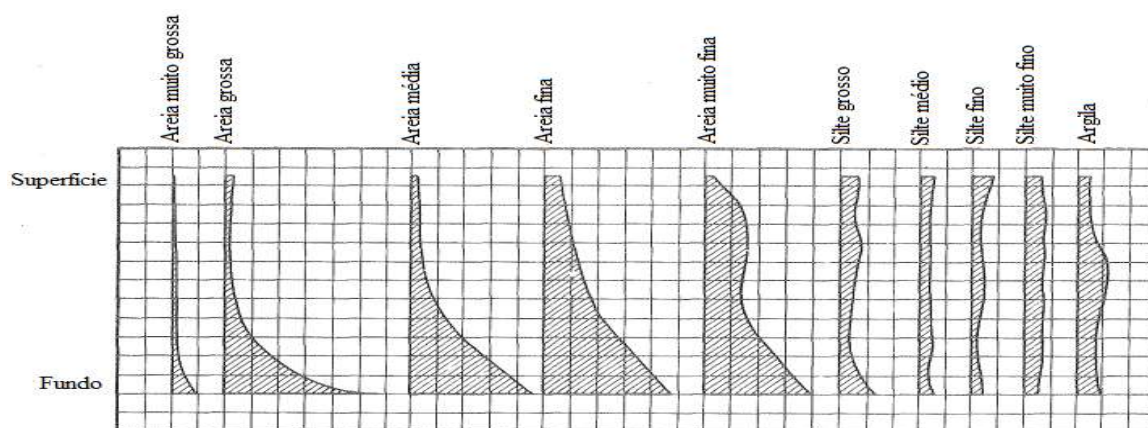
De acordo com Wilson Junior e Paiva (2003), a carga sólida em suspensão é proveniente da bacia hidrográfica e são produzidos principalmente após uma precipitação, gerando o que é conhecido como carga de lavagem (*Wash-load*). Esses sedimentos são transportados por

grandes distâncias ao longo do rio, podendo vir a sedimentar nos reservatórios ou onde não há correntes muito caudalosas.

A quantidade de sedimentos transportada, proveniente do leito do rio, é altamente dependente da composição do material do leito e das características geométricas e hidráulicas da seção e do trecho do rio (SCAPIN, 2005). O tamanho do material do leito é uma das características físicas que mais afeta o transporte de sedimentos. As propriedades atrativas das partículas de argila fazem com que as frações de sedimentos se liguem devido às forças de coesão que são superiores a força da gravidade. Com isso, as partículas de sedimento não se comportam como partículas individuais, mas se unem formando um floco cujo tamanho e velocidades de sedimentação são muito maiores (NAZIR et al., 2016).

O escoamento dos sedimentos no curso hídrico apresenta distribuição de partículas variadas numa vertical, numa seção transversal e ao longo do curso d'água. Segundo Carvalho (2008), devido à ação da velocidade e peso de partículas, os sedimentos com granulometrias variadas apresentam distribuição diferentes na vertical, como exposto na Figura 2. Partículas mais grossas do sedimento em suspensão, que são geralmente areias, apresentam uma variação crescente da superfície para o leito. As partículas mais finas têm distribuição mais uniforme na vertical.

Figura 2: Distribuições verticais que podem ser encontradas em um rio.

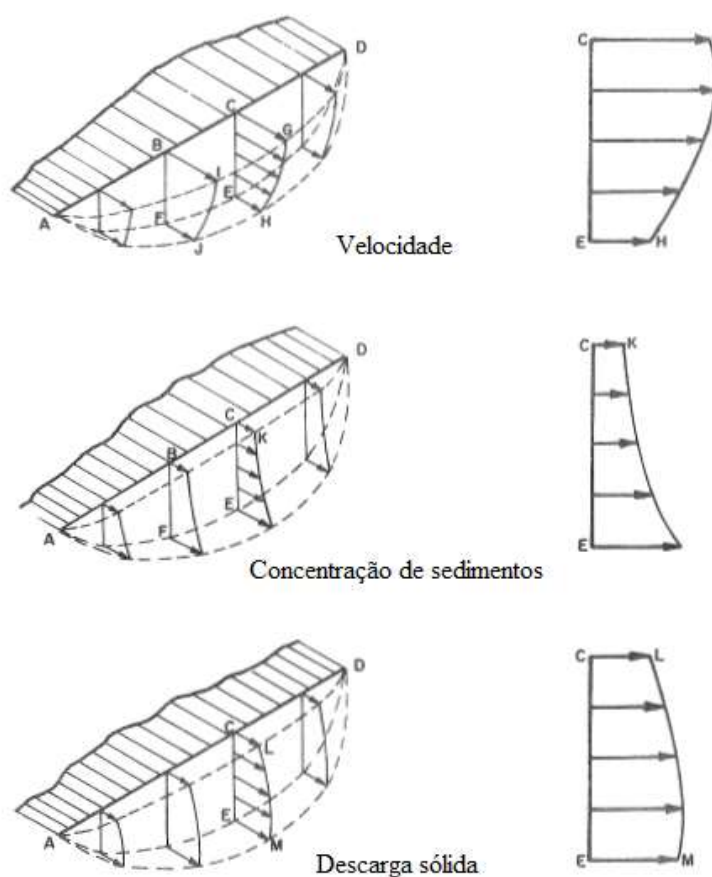


Fonte: Adaptado do *Subcommittee on Sedimentation* (1963).

Na seção transversal, a distribuição de sedimentos em suspensão é variável em toda largura do rio. Essa distribuição é mais bem expressa em termos de concentração. Considerando que as velocidades são menores perto da margem, as concentrações, também são menores,

aumentando para o centro do rio. O peso da partícula é outro fator responsável pela variação da concentração devido às velocidades de corrente na vertical. Essa distribuição de concentração juntamente com as velocidades de corrente e descargas sólidas são apresentadas na Figura 3.

Figura 3: Diagrama de distribuição de velocidade, concentração de sedimentos e descargas sólidas nos rios.



Fonte: Adaptado do Subcommittee on Sedimentation (1963).

O transporte de sedimentos é um fenômeno de grande complexidade, por sua natureza aleatória, intermitente e descontínua. A grande necessidade de entender a dinâmica desse fenômeno está relacionada dentre outros fatores, com processos de inundações e capacidade de armazenamento de barragens (BERGHOUT; MEDDI, 2016).

O conhecimento do comportamento, da quantidade e qualidade dos sedimentos nos corpos hídricos de uma bacia hidrográfica é fundamental para a adequada gestão e uso de seus recursos hídricos, além de ser essencial para desenvolvimento de projetos hidráulicos.

Acompanhar o fluxo de sedimentos permite ainda o diagnóstico de eventuais impactos em sua área de drenagem ao longo do tempo, podendo se tornar um importante indicador ambiental (CRISPIM et al., 2015).

Os sedimentos transportados em meio líquido ou no leito do rio provocam diversos problemas que interferem diretamente nas condições normais de equilíbrio do meio ambiente, prejudicando a fauna e flora do ecossistema, além de afetar aspectos econômicos e sociais. Carvalho (2008) lista os seguintes problemas:

- Partículas em suspensão degradam o uso consumptivo da água, aumentando o custo de tratamento.
- O sedimento afeta a vida aquática e degrada a água especificamente para o abastecimento, recreação e consumo industrial.
- O sedimento em suspensão impede a penetração da luz e do calor, reduzindo a atividade da fotossíntese necessária à salubridade dos corpos hídricos.
- O aumento dos sedimentos finos em suspensão, diminui a população de peixes e outros animais nos rios, sobrevivendo somente espécies resistentes.
- O sedimento atua como portador de bactérias, vírus e de poluentes, tais como nutrientes químicos, inseticidas, herbicidas e metais pesados.
- A carga sólida provoca perturbação na forma do canal.
- O sedimento no leito dos rios, pode prejudicar a navegação ou elevar o nível d'água, provocando enchentes mais frequentes.
- A areia em suspensão produz abrasão em turbinas, máquinas e comportas.

Diversos autores desenvolveram estudos que mostraram as consequências do transporte de sedimentos em corpos hídricos. Bhuyan et al. (2002) destacam os problemas causados pelo transporte de sedimentos devido a ampla utilização de fertilizantes e agrotóxicos que podem ser absorvidos pelos solos e sedimentos e, através do seu transporte, causar poluição dos cursos d'água, desequilíbrio do ecossistema, além de efeitos negativos para a saúde humana.

Cornelli et al. (2016) analisaram a influência do uso e ocupação do solo na qualidade da água e mostraram que o arraste de sedimentos pode comprometer a qualidade e o equilíbrio de ecossistemas aquáticos. Costa e Roselen (2012) avaliaram a concentração de metais pesados

presentes nos sedimentos em vários córregos de Uberlândia (MG). Segundo esses autores, os sedimentos podem estocar grande quantidade de substâncias tóxicas influenciando a qualidade ambiental dos corpos hídricos. Neves (2010) avaliou a influência do transporte de sedimentos em suspensão na população de algumas espécies aquáticas. Experimentos realizados com animais de uma espécie de bivalve demonstraram intolerância a condições de elevada concentração de sedimentos.

Thapa (2011) analisou o desempenho hidráulico da turbina Francis para escoamento carregado de sedimentos. De acordo com o autor, o desgaste dos componentes da turbina tem sido um grande desafio técnico e operacional para as usinas hidrelétricas de alto-desempenho. Partículas de sedimentos, que são transportadas pelos rios e chegam à turbina, corroem a superfície em contato. Isso causa a mudança no perfil do rotor com massa reduzida irregularmente, o que causa perda de eficiência, vibrações e redução da vida útil da turbina. A perda financeira associada a esse problema é enorme, principalmente com as usinas de energia de alta potência.

2.2.3 Deposição de sedimentos

Além da erosão e transporte, a deposição de sedimentos consiste em um processo sedimentológico. Segundo Carvalho (2008), o processo de deposição ocorre quando as forças do escoamento se reduzem até a condição de não poder continuar a deslocar a partícula. O depósito pode ocorrer em locais planos, em canais, planícies de inundação, reservatórios, deltas, estuários ou no oceano. Esses sedimentos depositados podem causar diversos problemas, dependendo da quantidade, qualidade e local de deposição. O autor cita alguns problemas:

- O depósito no leito do rio pode prejudicar a navegação e o escoamento, aumentar os riscos de enchente, prejudicar tomadas de água, provocar erosão nas margens;
- O depósito em reservatórios pode provocar assoreamento, reduzindo o volume d'água e a vida útil do lago.

No Brasil um dos maiores problemas de deposição de sedimentos consiste no assoreamento de reservatórios. De acordo com Carvalho et al. (2000), um grande número de reservatórios brasileiros se encontra total ou parcialmente assoreados, principalmente os de pequeno e

médio porte. Isto acontece devido ao fato de não se considerar o potencial de erosão das bacias hidrográficas, bem como os estudos prospectivos sobre o processo de sedimentação que ocorre nos reservatórios, ampliando-se, dessa forma, a probabilidade de vida útil dos mesmos.

Os problemas trazidos pela deposição de sedimento em reservatórios interferem no uso para o qual foi construído, como: geração de energia, abastecimento público ou industrial, irrigação, contenção de enchentes, dentre outros (MAIA; VILLELA, 2006). Assim, como o Brasil apresenta um grande número de reservatórios e grande parte da energia elétrica é gerada por aproveitamento hidrelétrico, fica evidente a importância do desenvolvimento de estudos sedimentológicos para diminuir os problemas causados pela deposição dos sedimentos.

2.3 MÉTODOS DE ESTIMATIVA DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

O transporte das partículas sólidas no corpo hídrico depende de vários fatores. Diversas equações empíricas foram desenvolvidas e verificadas por vários investigadores, com a finalidade de prever o transporte sólido num escoamento em superfície livre. Esses modelos ditos clássicos variam em eficácia devido aos parâmetros utilizados para defini-las, às hipóteses simplificadoras, às técnicas de amostragem e abordagens matemáticas (SINNAKAUDAN; SULAIMAN; TEOH, 2010).

As hipóteses idealizadas e simplificadas têm sido usadas pelos cientistas para desenvolver suas equações usando um ou dois fatores dominantes, como a descarga líquida, a velocidade média de escoamento, a declividade entre outros. Devido a diferentes hipóteses utilizadas, várias fórmulas têm diferentes resultados computadas entre si e a partir de dados medidos (YANG; MARSOOLI; AALAMI, 2009). Segundo Alamy Filho (2006) esses modelos seguem a tendência em dividir a região de escoamento em transporte de fundo e transporte em suspensão, sendo cada transporte é avaliado a partir de equações próprias e a carga total representando a soma dos dois transportes.

A estimativa correta do transporte de sedimentos em uma determinada bacia hidrográfica depende da escolha do método que melhor se ajusta com os dados de campo. Quando o fluxo de sedimentos é modelado a partir de métodos de cálculo indiretos de transporte, os dados

devem ser coletados criteriosamente para não produzir resultados indesejados (RICKER; ODHIAMBO; CHURCH, 2008). Segundo Stevens e Yang (1989), a seleção de uma fórmula adequada é muito importante para prever com precisão as descargas de sedimentos em rios e estuários. Assim o autor expõe as seguintes regras para seguir na seleção de uma determinada fórmula:

- Determinar o tipo de dados de campo, disponíveis ou mensuráveis;
- Examinar as experiências e dados de campo usados para desenvolver cada fórmula;
- Comparar a condição de campo e as limitações das fórmulas;
- Avaliar quais as fórmulas que melhor se ajustam à descarga sólida medida.

As diferentes fórmulas de transporte sólido foram desenvolvidas em diferentes condições, por isso, é importante avaliar a aptidão de cada uma nas condições registradas e observadas no local (LOPES, 2012). Atualmente, não há nenhuma equação de transporte de sedimentos que possa consistentemente prever a descarga de sedimentos corretamente para todos os tamanhos de partículas e condições experimentais variadas (SINNAKAUDAN et al., 2006).

Das diversas equações e métodos desenvolvidos, um grupo estima a descarga de leito ou arrasto que representa a carga em contato com o leito, no qual as partículas estão rolando, deslizando ou saltando. Outro grupo de fórmulas calcula a descarga de material de leito que corresponde à descarga de leito mais as partículas em suspensão maiores que silte e argila. Assim, as fórmulas de material de leito correspondem à descarga sólida total excluída a descarga do material fino. Por fim, o grupo de equações que calcula a descarga sólida total é composto pela soma da descarga em suspensão com a descarga de arrasto mais uma parcela que leva em conta a descarga não amostrada ou pela soma da descarga de material de leito com a descarga do material fino (CARVALHO, 2008).

Stevens e Yang (1989) fazem uma revisão de estudos comparativos das principais fórmulas para o cálculo de descarga sólida de leito e do material de leito, como apresentado na Tabela 1.

Tabela1: Resumo das principais fórmulas para estimar a descarga de leito e do material de leito.

Autor e data da fórmula	Carga de leito (CL) e Carga de material de leito (CML)	Granulometria
Ackers and White (1973)	CML	Areia e Pedregulho
Colby (1964)	CML	Areia
Einstein (carga de leito) (1950)	CL	Areia e Pedregulho
Einstein (material de leito) (1950)	CML	Areia
Engelund and Hansen (1967)	CML	Areia
Kalinske (1947)	CL	Areia
Laursen (1958)	CML	Areia
Meyer- Peter and Muller (1948)	CL	Areia e Pedregulho
Rottner (1959)	CL	Areia
Schoklitsch (1934)	CL	Areia e Pedregulho
Toffaleti (1968)	CML	Areia
Yang (areia) (1973)	CML	Areia
Yang (pedregulho) (1984)	CML	Pedregulho

Fonte: Adaptado de Stevens e Yang (1989).

Para Stevens e Yang (1989), as fórmulas de Schoklitsch (1934) e Meyer-Peter e Muller (1948) para descarga de leito e as fórmulas de Yang (1973) para areia, Yang (1984) para cascalho, Ackers e White (1973), Engelund e Hansen (1967) para descarga de material de leito são as mais confiáveis. Carvalho et al. (2000), no guia de práticas sedimentométricas, citam o método modificado de Einstein por Colby e Hembree (1955) e o método de Colby (1957) para cálculo de descarga sólida total.

Outros métodos mais recentes como de Van Rijn (1984), Karim (1998) e Cheng (2002) também podem ser citados. Van Rijn (1984), por exemplo, apresentou um método que possibilita o cálculo do transporte da carga do leito como produto da altura de salto, da velocidade da partícula e da concentração da carga do leito. O autor salienta que o método apresenta estimativa confiável de transporte de fundo para partículas na faixa de 0,2 a 2 mm, as quais foram baseadas em uma análise de verificação usando cerca de 600 dados de campo.

Karim (1998) desenvolveu um método para obtenção da descarga total de sedimentos por unidade de largura, tendo como princípio que a velocidade de queda das partículas, a velocidade média do escoamento e a velocidade de atrito no fundo são as variáveis mais importantes. Já Cheng (2002), explora a possibilidade de estender algumas fórmulas de

transporte de leito que se adaptam bem para condições de cisalhamento moderadas e altas, e também para situações onde ocorrem transportes fracos.

Vários pesquisadores desenvolveram estudos em diferentes rios para comparar e testar os métodos de determinação de descarga sólida. Yang e Molinas (1982) testaram sete fórmulas de descarga sólida (Einstein modificado 1955; Engelund e Hansen 1967; Maddock 1967; Shen e Hung 1972; Ackers e White 1973; Yang 1973; Yang 1979) para as seis estações fluviais dos quais são caracterizados por sedimentos de areia. Os autores concluíram que os modelos propostos por Ackers e White, Engelund e Hansen e Yang são mais confiáveis. Nakato (1990) testou no rio Sacramento, na Califórnia, onze fórmulas de estimativa de transporte de sedimentos cujo tamanho do material de leito foram classificados como areia e cascalho. Os resultados demonstram claramente a dificuldade em prever descargas de sedimentos em rios naturais.

Scapin, Paiva e Beling (2007) avaliaram os métodos de Meyer Peter e Muller (1948), Einstein (1950), Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955), Colby (1957), Engelund e Hansen (1967), Yang (1973), Ackers e White (1973), Van Rijn (1984), Karim (1998) e Cheng (2002), em um pequeno rio na cidade de Santa Maria-RS. Os métodos de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955) e Colby (1957), apresentaram os melhores resultados entre a descarga sólida estimada e medida. Wu, Van Maren e Li (2008) avaliaram a aplicabilidade dos métodos de transporte de sedimentos para o Rio Amarelo, na China, com elevada concentração de sedimentos.

Sobrinho et al. (2013) mediram a descarga sólida em uma seção do córrego Guariroba, município de Campo Grande – MS e realizaram o cálculo indireto da descarga sólida utilizando os métodos de Colby (1957), Ackers e White (1973), Yang (1973) e Karim (1998). Segundo os autores, as estimativas pelo método de Colby (1957) foram as que melhor se aproximaram da descarga sólida medida. Brune (2014) realizou uma análise comparativa de oito métodos em diferentes corpos hídricos de características diferentes e obteve resultados bastante variados para cada método.

Além dos métodos empíricos apresentados, ainda existem outros modelos mais embasados fisicamente. Segundo Aksoy e Kavvas (2005) os modelos físicos de transporte de sedimentos são desenvolvidos utilizando a equação de conservação de massa. Esses modelos

de base física normalmente necessitam de grande quantidade de dados de entrada, podendo tornar inviável sua aplicação em grandes escalas.

De acordo com Alamy Filho e Schulz (2006) existem duas abordagens mais utilizadas para transporte de sedimentos. A primeira, através dos modelos ditos lagrangeanos procura descrever a trajetória das partículas, já a segunda abordagem descreve a distribuição temporal e espacial das partículas em termos de concentração no escoamento a partir da equação de Advecção-Difusão. Para o autor a segunda abordagem fornece resultados mais satisfatórios em escoamento práticos.

A modelação do transporte de sedimentos através da equação de Advecção-Difusão surge da necessidade de quantificar a concentração de partículas em suspensão. A equação apresenta elevada generalidade e princípio físico que rege essa equação é o da Conservação de Massa (ALAMY FILHO, 2006).

2.3.1 Meyer- Peter e Muller (1948)

Meyer- Peter e Muller desenvolveram uma equação para estimar a descarga de arrasto que representa o transporte da carga de leito. Segundo Huang (2010) o transporte de carga no leito em um rio depende da força do fluxo atuando no leito do canal e da resistência dos grãos soltos que compõem o leito. Com base neste mecanismo físico, foram feitas inúmeras tentativas para desenvolver uma equação de transporte de carga de leito com uma variedade de perspectivas. Dentre as tentativas, a fórmula desenvolvida por Meyer- Peter e Muller em 1948 (MPM) representa uma das mais utilizadas no mundo.

Segundo Scapin, Paiva e Beling (2007), a fórmula de MPM foi desenvolvida a partir de diversos experimentos com diferentes granulometrias de material de leito. Sendo baseada nas seguintes hipóteses:

Que a declividade da linha de energia é uma característica da interação entre o movimento sólido e o líquido de um escoamento com transporte de sedimentos. Uma dada porção de energia é consumida para o transporte sólido e a energia remanescente para o movimento líquido. E que os mesmos fenômenos governam o transporte de sedimentos e o início do movimento.

A aplicação do método requer o conhecimento dos seguintes parâmetros: diâmetros característicos do material de fundo, peso específico dos sedimentos, declividade da linha

de energia, vazão e características da seção transversal do canal. Os testes realizados para desenvolvimento da fórmula compreendem declividades de 0,0004 a 0,020 m/m, profundidades de 1 a 120 cm e diâmetro das partículas do leito de 0,4 a 30 mm (MEYER-PETER; MULLER, 1948).

2.3.2 Ackers e White (1973)

O método de Ackers e White (1973) é semiempírico e foi desenvolvido para estimativa da descarga sólida de material de leito. O método considera que os sedimentos mais grosseiros são transportados principalmente como carga do leito e somente uma parte da tensão de cisalhamento no leito do canal causa o movimento dessas partículas. Os sedimentos finos são transportados como carga em suspensão devido à tensão de cisalhamento total que causa seu movimento (CARVALHO, 2008).

As relações propostas no método foram obtidas com base em mais de 900 experiências em calhas laboratoriais com movimentos uniformes e aproximadamente uniformes, para profundidades baixas, e para tamanhos de partículas entre 0,04 mm a 4,0 mm e número de Froude menor que 0,8 (SCAPIN; PAIVA; BELING, 2007; LOPES, 2012). A abordagem de Ackers e White (1973) baseia-se no conceito de potência de fluxo e na análise dimensional para expressar a mobilidade e a taxa de transporte de sedimentos em termos de três grupos adimensionais: granulometria (D_{gr}), mobilidade da partícula (F_{gr}) e descarga sólida (G_{gr}) (NAGY; WATANABE; HIRANO, 2002).

2.3.3 Método de Colby (1957)

De acordo com Carvalho (2008), Colby desenvolveu alguns métodos para estimar o transporte sólido baseado no método modificado de Einstein e em várias medições em campo. Um dos métodos foi desenvolvido em 1957, sendo considerado simples e de fácil aplicação. Nesse método o cálculo da descarga sólida total é feito basicamente com o uso de três ábacos e dados de descarga líquida, velocidade média, profundidade média, largura da seção e concentração medida de sedimentos em suspensão. A utilização desse método é vantajosa devido à simplicidade e ao uso de poucos dados, tornando o trabalho de sedimentometria econômico e fácil. Segundo Costa (2012), o método é bastante aplicado em estudos desenvolvidos no Brasil.

2.3.4 Método modificado de Einstein Colby e Hembree (1955)

Os autores Colby e Hembree em 1955 apresentaram modificações do método original de Einstein (1950). De acordo com Paiva (2001), o Método de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955) foi desenvolvido a partir de vários anos de pesquisas no Rio Niobrara no Estado de Nebraska (EUA) e fornece estimativas precisas de descarga total de sedimentos. No método a descarga sólida total é calculada a partir de medições da descarga em suspensão na seção do rio até uma pequena distância do fundo e da extrapolação da carga em suspensão até o leito do rio.

Ainda segundo Paiva (2001) as principais modificações apresentadas são:

- O método modificado baseia-se em dados que podem ser obtidos de uma seção, ao invés de um longo trecho do rio;
- O gradiente de energia não é medido em campo e a velocidade de atrito é calculada indiretamente;
- São introduzidas alterações nos fatores de correção utilizados por Einstein (1950);
- O valor do parâmetro de intensidade de transporte de carga de fundo, utilizado por Einstein (1950), é arbitrariamente dividido por dois para ajustar melhor aos dados experimentais.

2.4 HEC-RAS

O HEC-RAS é um programa computacional que permite ao usuário fazer simulações de transporte de sedimentos de leito móvel em trechos de rios artificiais ou naturais, considerando a erosão e deposição dos sedimentos ao longo do tempo. Para a simulação do fluxo de sedimentos, o programa utiliza como base, o escoamento em regime quase-permanente (USACE, 2016). Para simular o transporte sólido o programa dispõe dos modelos de Ackers e White, Meyer- Peter e Muller, Engelund Hansen, Laursen- Copeland, Toffaleti, Yang e Wilcock-Crowe.

Alguns autores desenvolveram trabalhos relacionados ao transporte de sedimentos com a utilização do HEC-RAS. Mohammad et al. (2016) por exemplo, utilizaram a ferramenta computacional para simular os fluxos mensais e carreamento de sedimentos para o

reservatório de Mosul, construído a partir do Rio Tigre, localizado no norte do Iraque. De acordo com o autor a represa de Mosul passa por diversos problemas, dentre eles o processo de sedimentação que ocorre próximo da estação de bombeamento de Al Jazeera. A deposição de sedimentos, além de aumentar os riscos de inundação pela diminuição da capacidade de armazenamento, afeta o rendimento da represa para diferentes demandas de água.

Berghout e Meddi (2016) realizaram um estudo de modelagem do transporte de sedimentos com a utilização do HEC-RAS. Os autores fizeram as simulações na bacia hidrográfica de Chemora e seus afluentes para analisar parâmetros como volume de sedimentos entrando e saindo do sistema, capacidade de transporte e assim determinar as áreas sensíveis à erosão e sedimentação durante eventos de inundação. Os resultados obtidos no estudo foram de grande utilidade na gestão da região.

Lopes (2012), utilizando o HEC-RAS, efetuou a simulação da ruptura da barragem das Minas da Fonte Santa a partir do transporte sólido de montante para jusante. O autor ainda avaliou entre as fórmulas de transporte sólido disponíveis no programa, a que melhor se adequa a situações empregadas no estudo. Haghiabi e Zaredehdasht (2012) fizeram simulações de transporte de sedimentos com o HEC-RAS no Rio Karun-Irã, para identificar os pontos de erosão e sedimentação ao longo do Rio. Os autores compararam os resultados das simulações com os modelos relatados na literatura.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

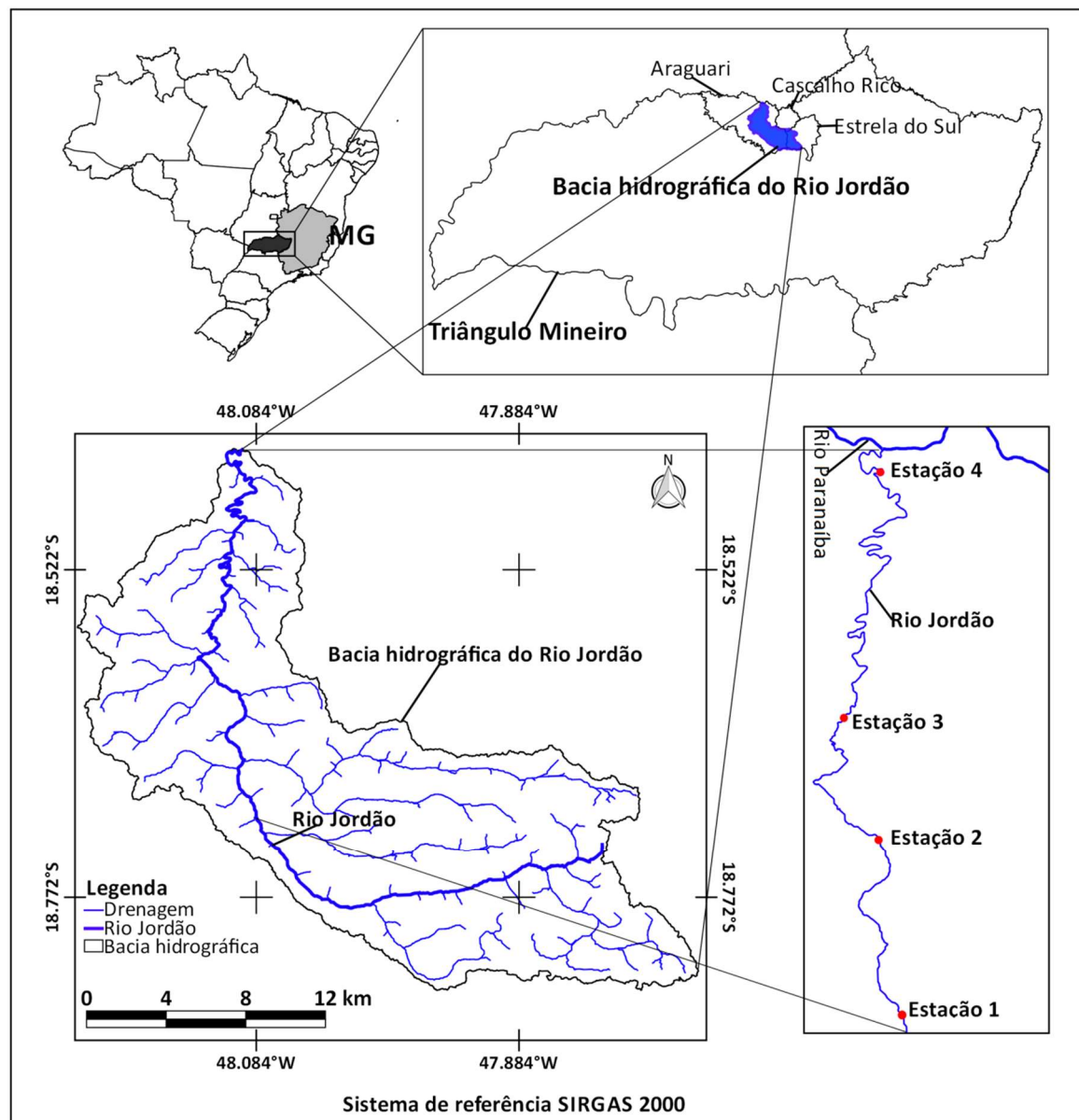
Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para realização do estudo do transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Jordão. Para isso, foi importante realizar a caracterização da área de estudo com a identificação dos pontos de coleta. Apresentar os métodos de medições e coletas de amostras nas estações, bem como, os equipamentos e aparelhos utilizados. Neste capítulo também foram descritos os métodos de análise de sedimentos em suspensão e de leito e as equações para determinação da descarga em suspensão, de arraste e total, além das sequências dos passos realizados para simular o transporte de sedimentos com a ferramenta computacional (HEC-RAS).

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O trabalho foi realizado na bacia hidrográfica do Rio Jordão localizada na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, na Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos – Alto Rio Paranaíba 1 (UPGRH-PN1), entre as coordenadas geográficas 18°25'41" e 18°50'51" de latitude Sul e 47°49'47" e 48°12'51" de longitude Oeste (SALLA et al., 2013). A área da bacia tem aproximadamente 926 km² e a extensão do curso d'água principal é de aproximadamente 90 km da nascente até a confluência com o Rio Paranaíba.

Os pontos de coletas foram definidos a partir de um planejamento e estudo do curso do rio e da bacia hidrográfica. Inicialmente a área foi caracterizada a partir da obtenção de mapas na ferramenta QGIS. Foram estabelecidos quatro pontos de coletas de amostras de água e sedimentos. A Figura 4 ilustra a localização da bacia hidrográfica do Rio Jordão, objeto de estudo deste projeto.

Figura 4: Mapa representativo de localização da bacia hidrográfica do Rio Jordão.



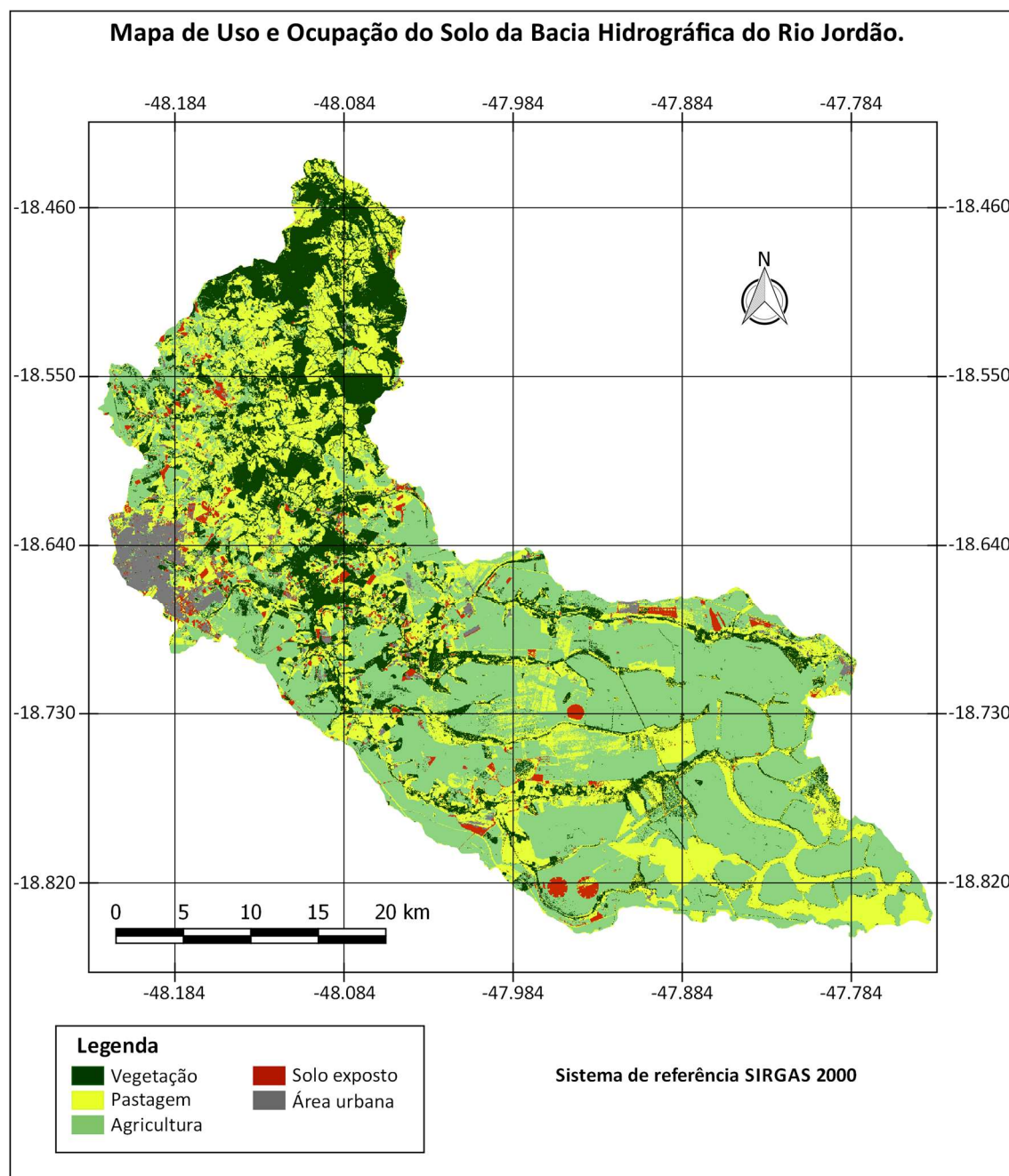
Fonte: Autor.

Foi realizada a instalação de quatro estações Fluviosedimentométricas ao longo do percurso do rio. Dentre os vários afluentes do Rio Jordão, o Córrego do Brejo Alegre se destaca pela influência direta no rio, a foz do córrego está localizada entre as Estações 2 e 3, sendo possível verificar a contribuição deste córrego em relação as descargas líquidas e sólidas.

A região em estudo é caracterizada pela presença de grandes áreas agrícolas, significativa quantidade de áreas de pastagem, além de vegetação e manchas de áreas urbanizadas, como observado no mapa de uso e ocupação do solo representado na Figura 5.

O desenvolvimento do mapa foi realizado a partir dos programas Quantum GIS – QGIS 2.18.4 e Multispec. O mapeamento foi realizado a partir da utilização de imagens atuais do satélite LANDSAT-8, baixadas no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (2018). No QGIS, as imagens das diferentes bandas baixadas foram georreferenciadas a partir do sistema de referência SIRGAS 2000 e recortadas utilizando o shape da bacia hidrográfica como camada máscara. No Multispec, foi realizado junção de todas as imagens recortadas das diferentes bandas para realizar a classificação supervisionada.

Figura 5: Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do Rio Jordão.



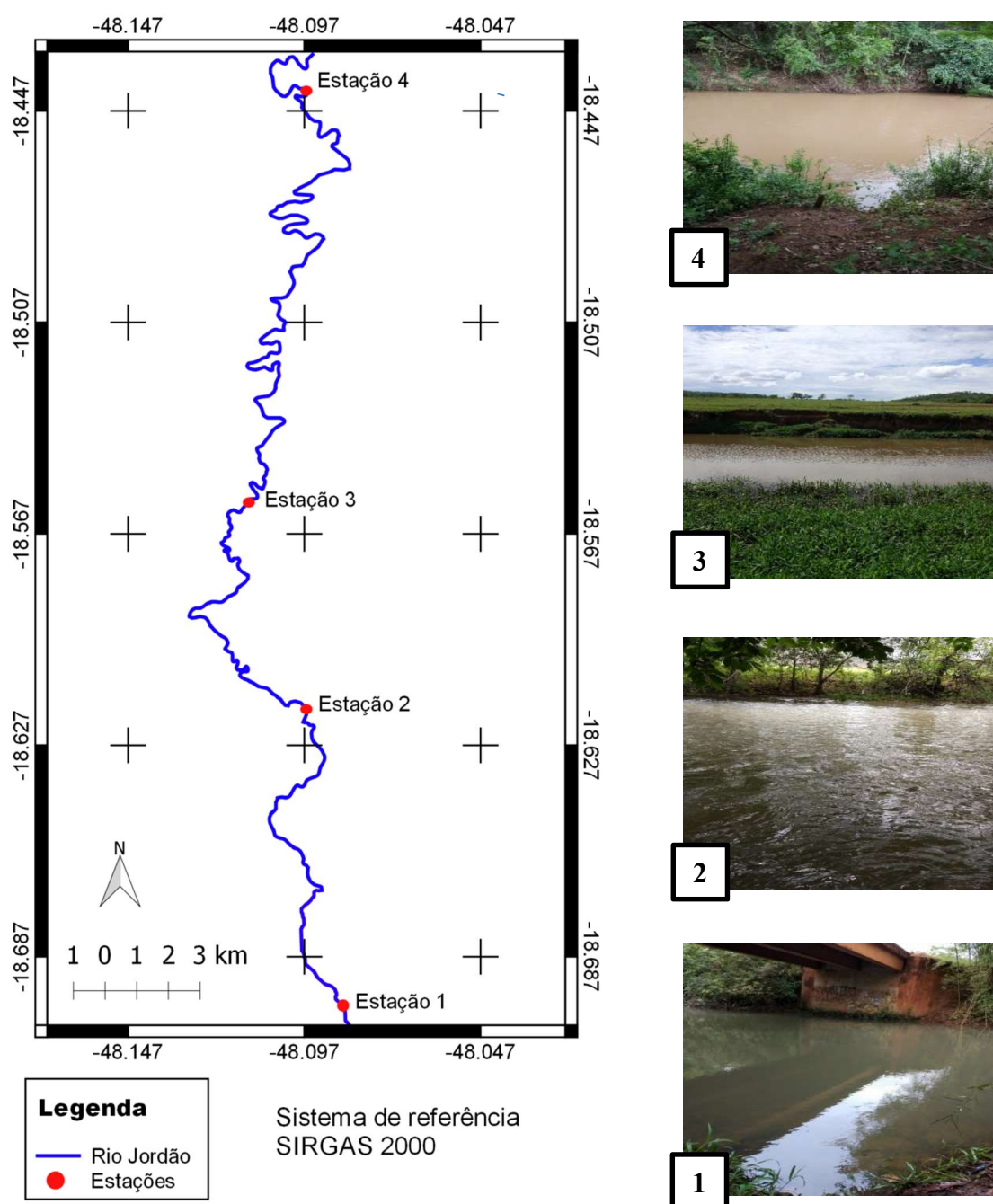
Fonte: Autor.

3.2 MONITORAMENTO HIDROLÓGICO E SEDIMENTOLÓGICO

Foram realizadas 14 campanhas com atividades de campo para medições e coletas em épocas secas e chuvosas no período de agosto de 2017 a dezembro de 2018. Entre esse período não ocorreu atividade de campo nos meses Abril, Junho e Agosto de 2018. As medições de vazão

e coletas de água para análise de sedimentos suspensos foram realizadas de mês em mês. Para sedimentos de fundo foram realizadas três coletas e análises de peneiramento ao longo da pesquisa. As estações com suas respectivas fotos dos locais estão representadas na Figura 6. Devido às dificuldades em realizar as campanhas principalmente na estação 2, optou-se por encerrar as amostragens nesse local no mês de Março de 2018.

Figura 6: Postos fluviométricos/sedimentológicos e as respectivas imagens dos locais.



Fonte: Autor.

As quatro estações de amostragem estão localizadas nas seguintes coordenadas geográficas: Estação 1, 18°41'33,02"S e 48°05'39,7"W, estação 2, 18°36'57,19"S e 48°05'46,03"W, estação 3, 18°33'37,94" S e 48°06'49,58"W e estação 4, 18°26'28,83"S e 48°05'43,99"W.

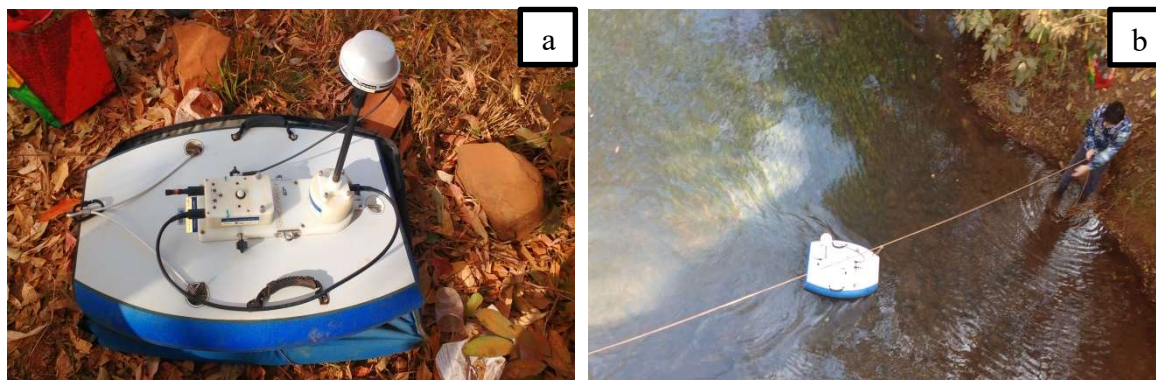
3.3 DETERMINAÇÃO DA VAZÃO LÍQUIDA

Para determinação da seção transversal, perfil de velocidade, velocidade pontual e da vazão líquida do curso d'água foram utilizados os equipamentos ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) ou molinete fluviométrico. Na pesquisa as vazões em cada seção foram obtidas por meio de trabalho de campo. A utilização de dois equipamentos é explicada pela diferença de profundidade das seções em períodos distintos. O ADCP pode ser utilizado somente em seções com profundidade superior a 0,30 m, com isso, em algumas seções de profundidade inferior a 0,30 m em períodos secos houve a necessidade da utilização do molinete para medição das vazões.

O ADCP é um equipamento desenvolvido para a medição de vazão líquida direta utilizando o método acústico fundamentado pelo princípio do efeito Doppler. O aparelho possui transdutores (emissores e receptores) que emitem ondas sonoras de frequência fixa e que detectam as ondas refletidas pelas partículas em suspensão na água quando o som entra em contato com as partículas. Assim, o pulso refletido por uma partícula a montante do ADCP é captado com frequência diferente da partícula que reflete o pulso a jusante. Com base nesta diferença de frequência produzida pelo efeito Doppler, o aparelho calcula diretamente a velocidade do escoamento e a vazão do rio (TERABE, 2003).

Em campo, uma corda foi amarrada ao ADCP que foi conectado a um notebook que contém o software *River Surveyor* fornecido pelo fabricante. Na sequência, com o auxílio da corda, foram realizadas no mínimo três travessias em cada seção amostrada do rio. O perfil de fundo, perfis e direções de velocidades foram registrados e o cálculo da vazão realizada pelo software. A imagem do ADCP e da medição realizada em campo estão apresentados na Figura 7.

Figura 7: a) Imagem do ADCP, b) Medição da vazão com uso do equipamento.



Fonte: Autor.

O molinete fluviométrico, apresentado na Figura 8, foi utilizado na medição de vazões nas seções quando o nível de água estava abaixo de 30 cm e o ADCP não conseguia registrar a vazão. Esse aparelho apresenta uma hélice dinâmica que gira sob ação do movimento da água do rio e o número de rotações desta hélice é registrado em um contador de giros eletrônico.

Figura 8: a) Molinete fluviométrico, b) Molinete montado para uso.



Fonte: Autor.

No procedimento realizado em campo, foi utilizada uma corda graduada (Figura 10) para a realização das leituras de metro em metro com as verticais fixadas (formando subáreas verticais, Figura 9) ao longo da seção transversal real do curso d'água. A distância de 1 metro entre as verticais foi estabelecida de acordo com a largura de cada seção, como recomendado por Santos et al. (2001). O autor também recomenda o número de pontos de fixação do molinete em cada vertical de acordo com a profundidade (Tabela 2 e 3).

Tabela 2: Distância recomendada entre cada seção vertical, de acordo com a largura da seção.

Largura (m)	Distância entre as verticais (m)
<3	0,3
3 a 6	0,5
6 a 15	1
15 a 30	2
30 a 50	3
50 a 80	4
80 a 150	6
150 a 250	8
>250	12

Fonte:(SANTOS et al., 2001).

Tabela 3: Número de pontos e profundidade recomendada em cada seção vertical de acordo com a profundidade.

Profundidade (m)	Número de pontos	Profundidade fixada
0,15 a 0,6	1	0,6p
0,61 a 1,2	2	0,2p e 0,8p
1,21 a 2	3	0,2p; 0,6p e 0,8p
2,01 a 4	4	0,2p; 0,4p; 0,6p e 0,8p
>4,01	6	S; 0,2p; 0,4p; 0,6p; 0,8p e F

S: superfície do canal; F: fundo do canal; p: profundidade do canal.

Fonte: (SANTOS et al., 2001)

Para realizar a leitura, em cada metro o molinete é posicionado a uma profundidade fixada entre o leito e a superfície. Para obtenção da velocidade do escoamento, o molinete foi conectado a um contador de giros eletrônico controlado por um cronômetro digital que relaciona o número de rotação por segundo com a velocidade do escoamento, calculada por meio da equação 1.

$$U = A \cdot N + B \quad (1)$$

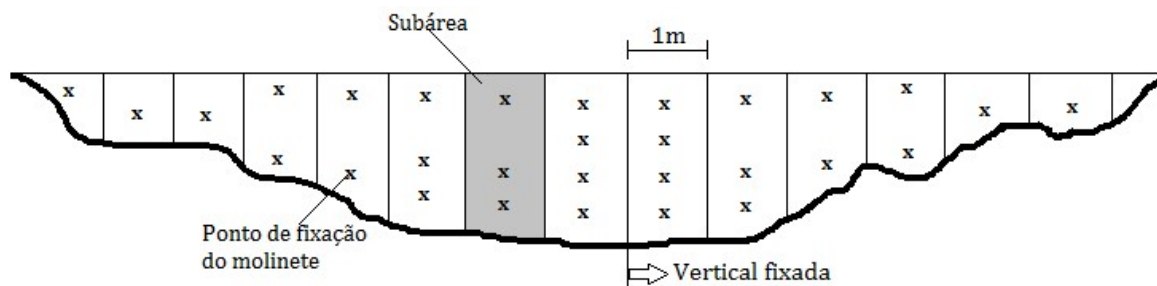
Na qual:

U : Velocidade da água (m/s)

N : Número de rotações por segundo;

A e B : são constantes que individualizam cada aparelho aferido, sendo $A = 0,2853$ e $B = 0,0022$

Figura 9: Exemplo dos pontos de fixação do molinete fluviométrico na seção transversal.



Fonte: Autor.

A vazão é determinada pelo produto da área molhada da subseção escolhida pela velocidade média (U) do escoamento da corrente líquida. A área molhada (A_m) foi obtida pela profundidade em várias verticais escalonadas. Cada elemento de área pode ser calculado como retângulo ou trapézio de acordo com a forma da seção topobatimétrica. Calculou-se a vazão (qi) em cada elemento de área (Ai), utilizando-se a equação 2:

$$qi = v \cdot Ai \quad (2)$$

A vazão total através da seção transversal do rio é igual à somatória das vazões em cada elemento de área:

$$Q = \sum qi \quad (3)$$

3.4 DETERMINAÇÃO DA CURVA CHAVE

Para a determinação da curva chave utilizaram-se os dados obtidos de altura da lâmina de água em metros e as respectivas vazões medidas através do molinete ou do ADCP. A determinação das curvas-chave foi feita buscando ajustar os pares de valores cota x vazão a uma equação do tipo potencial representada pela equação 4.

$$Q = a \cdot (H)^b \quad (4)$$

Na qual:

Q : a vazão (m^3/s);

a e b : são parâmetros de ajuste;

H : cota da régua (m);

Para obter o melhor ajuste dos parâmetros a e b , foi utilizada a ferramenta iterativa Solver do Excel®. Assim, foi obtida a equação e a curva que melhor se ajusta aos pares pontos cota x vazão medidos em campo.

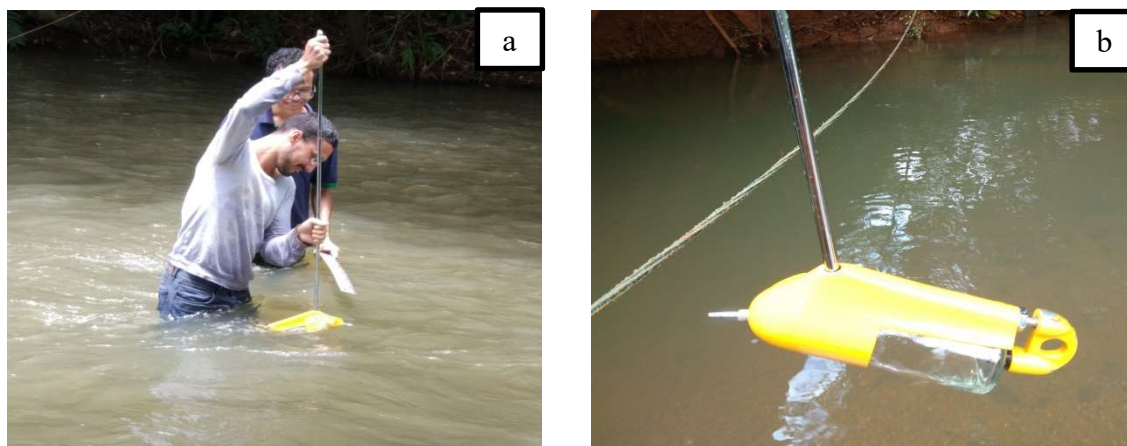
3.5 AMOSTRAGEM E ANÁLISE DE SEDIMENTOS

Nessa fase do trabalho foram realizadas as amostragens e análises de sedimentos suspensos e de leito. A amostragem de sedimentos com a utilização de métodos apropriados foi essencial para obter amostras representativas de sedimentos suspensos e de leito no curso do Rio Jordão. Após a coleta o material foi levado ao Laboratório de Saneamento (LABSAN) e Laboratório de Geotecnia (LABGEO) da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia para possíveis análises por métodos tradicionalmente encontrados na literatura.

3.5.1 Amostragem de sedimentos em suspensão pelo método do igual incremento de largura - IIL

A coleta de água para análise de concentração dos sedimentos suspensos foi realizada pelo método indireto de amostragem por igual incremento de largura – IIL conforme apresentado na Figura 11. O procedimento foi realizado com o auxílio do amostrador integrador de série Norte-Americana (U.S–DH 48) (Figura 10). Durante a amostragem a temperatura da água e do ar foram medidas por meio da utilização de termômetros.

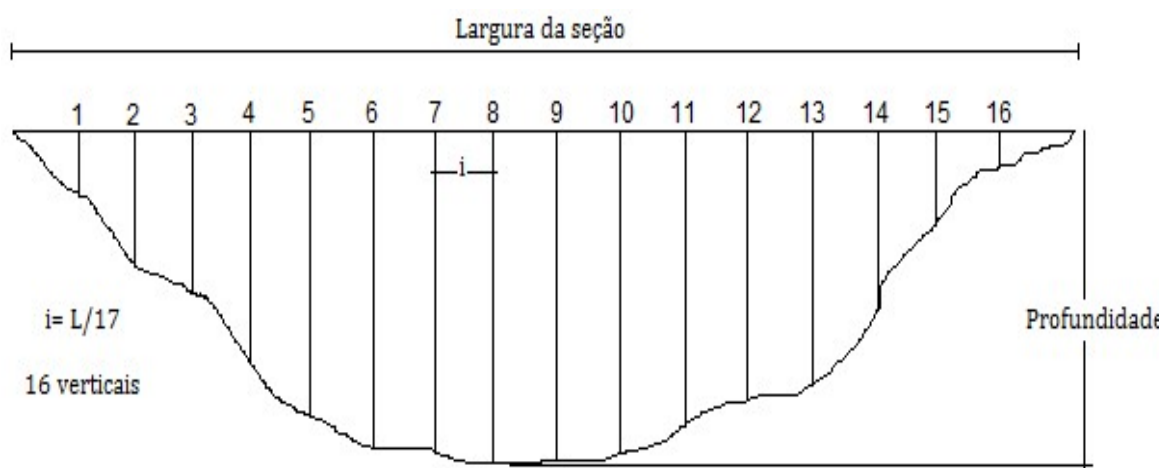
Figura 10: a) Coleta de água realizada em campo; b) Amostrador integrador de série Norte-Americana (U.S–DH 48) e Corda graduada na seção transversal do Rio.



Fonte: Autor.

Para a amostragem, cada seção transversal do rio foi dividida em segmentos de larguras iguais (i) utilizando uma corda graduada (Figura 10) com a seleção de 10 a 20 verticais, conforme mostrado na Figura 11. As coletas das amostras foram realizadas com a mesma velocidade de trânsito nas verticais, obtendo uma série de sub-amostras com volumes diferentes. Em todas as coletas, foi utilizado o mesmo amostrador com diâmetro do bocal de coleta de 1/8”.

Figura 11: Seção dividida em segmentos de larguras iguais.

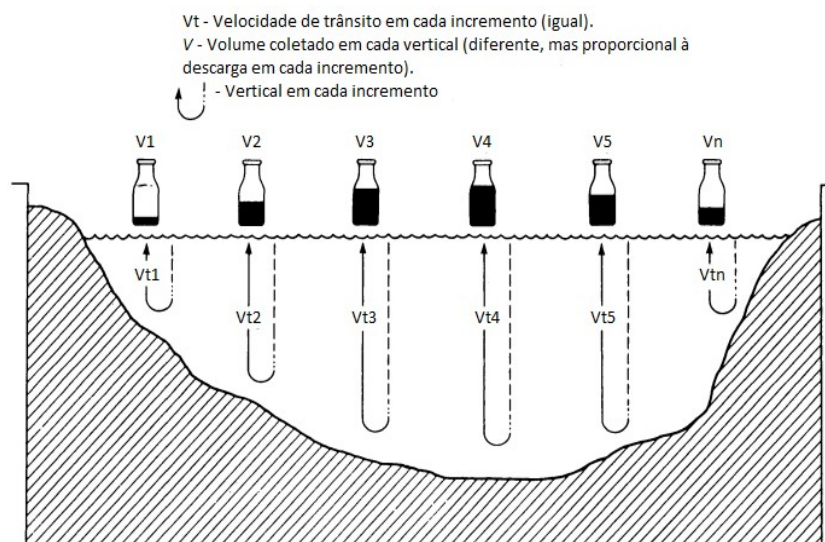


Fonte: Autor.

Segundo Carvalho et al. (2000) as velocidades médias do curso d'água são diferentes em cada vertical, geralmente decrescendo do talvegue para as margens. Assim, as quantidades

de água em cada amostragem vertical vão se reduzindo em quantidades proporcionais ao escoamento na medida em que se aproxima das margens conforme mostrado na Figura 12.

Figura 12: Amostragem pelo método de igual incremento de largura.



Fonte: Adaptado de Edwards e Glysson (1988).

Na execução, a vertical mais próxima ao talvegue foi selecionada e a velocidade média do escoamento dessa vertical foi medida. A velocidade média foi multiplicada por 0,2 devido ao bico do equipamento usado, obtendo assim, a velocidade de trânsito máxima (V_t). O cálculo do tempo mínimo de percurso na descida e subida do equipamento foi realizado pela equação 5. Todas as amostragens foram realizadas com auxílio de um cronômetro.

$$T_{\min} = \frac{2 \cdot P_i}{V_t} \quad (5)$$

Na qual:

T_{\min} : Tempo mínimo de percurso na descida e subida;

P_i : Profundidade na primeira vertical amostrada;

V_t : Velocidade de trânsito máxima.

Nas outras verticais o tempo de amostragem deve ser proporcional, obtendo por regra de três entre o tempo e a profundidade. O procedimento forneceu em cada vertical uma sub-amostra com volumes proporcionais a vazão da zona amostrada. As amostras parciais foram reunidas em uma única amostra armazenada em um frasco de vidro. Os frascos de vidro, contendo a

amostra final em cada ponto de coleta, foram devidamente etiquetados e acondicionados em uma caixa térmica para serem transportadas ao laboratório.

3.5.2 Análises de concentração de sedimentos em suspensão

No Laboratório de Saneamento (LABSAN) da Faculdade de Engenharia Civil foram realizadas as análises de concentração e granulometria dos sedimentos em suspensão conforme descrito por Carvalho et al. (2000) no guia de práticas sedimentométricas da ANEEL. Segundo Braga (2013), essas análises de concentração de sedimentos em ambiente fluvial são de fundamental importância para que se possam realizar estudos visando o planejamento ordenado do uso da terra e dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica.

Ao chegar do campo as amostras foram pesadas para evitar erros nos cálculos devido à possibilidade de ocorrer perdas de água por evaporação. As análises de concentração de sedimentos foram realizadas pelos métodos de filtração em épocas secas com menores concentrações e evaporação em épocas chuvosas com concentrações maiores. Todas as análises foram realizadas no menor tempo possível para evitar mudanças nas características das amostras.

Procedimento realizado no método de filtração:

- 1- Preparação do cadinho: Em cada cadinho foi colocado uma membrana de fibra de vidro de 0,45 μm com a parte rugosa para baixo. Para aderência da membrana no cadinho foi necessário filtrar uma pequena quantidade de água destilada. Após a filtração o cadinho com a fibra foi colocado na estufa ($105 \pm 2^\circ\text{C}$) por 15 minutos, e em seguida levado ao forno mufla ($550 \pm 50^\circ\text{C}$) por 30 minutos. O cadinho resfriado até temperatura ambiente foi pesado (P1) g.
- 2- Filtração e secagem da amostra: As amostras foram homogeneizadas em um béquer e filtradas no cadinho, através do sistema de filtração a vácuo com a utilização de uma bomba e de kitassato como mostra na Figura 13. O procedimento de filtração foi realizado com toda amostra coletada. Em seguida, o cadinho contendo os sólidos suspensos retidos no filtro, foi levado para estufa ($105 \pm 2^\circ\text{C}$). Ao atingir peso constante o cadinho foi resfriado em um dessecador até a temperatura ambiente para a pesagem (P2) g.

3- Cálculo: A determinação da concentração de sedimentos em suspensão é realizada pela equação 6.

$$\text{Concentração de sedimentos suspensos } (C_{ss}) = \frac{P_2 - P_1}{V} \cdot 1000 \quad (6)$$

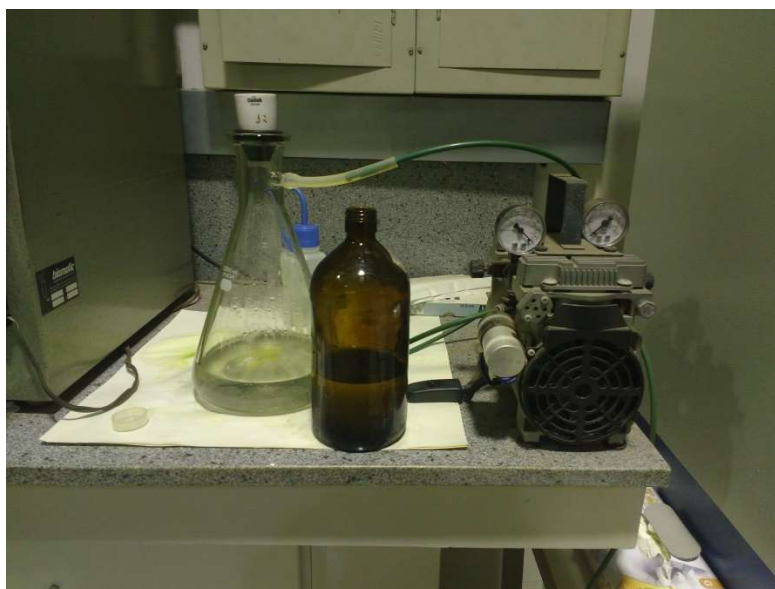
Na qual:

P1: Tara do cadinho (g);

P2: Cadinho com amostra após secagem (g);

V: Volume da amostra (L).

Figura 13: Sistema para filtração a vácuo.



Fonte: Autor.

Procedimento realizado pelo método de evaporação:

- 1- Preparação da amostra: A amostra foi deixada em repouso por 24 horas, na sequência retiraram-se com o auxílio de pipetas, três alíquotas de 50 ml da parte superior da amostra isenta de sedimentos para determinação da quantidade de sais solúveis. A determinação de sais solúveis foi realizada para correção dos resultados obtidos pelo método de evaporação.
- 2- Secagem: A amostra de água mais sedimentos com volume reduzido foi colocada em um béquer pré-pesado (P1) g e levada para a estufa ($105 \pm 2^\circ\text{C}$) até a secagem do recipiente

contendo o sedimento. O recipiente com o sedimento foi resfriado no dessecador e após obter temperatura ambiente uma nova pesagem foi realizada (P2) g.

3- Cálculo: A determinação da concentração de sedimentos em suspensão é realizada pela equação 7.

$$\text{Concentração de sedimentos suspensos } (C_{ss}) = \frac{P_2 - P_1}{V} \cdot 1000 - C_{sd} \quad (7)$$

Na qual:

P1: Tara do cadinho (g);

P2: Cadinho com amostra após secagem (g);

V: Volume da amostra (L);

Csd: Concentração de sais dissolvidos (mg/L).

Com a realização das análises de sedimentos suspensos e as medições de vazão, calculou-se a descarga sólida em suspensão de cada seção estudada. A descarga sólida representa a quantidade de material transportado em massa por unidade de tempo conforme a equação 8.

$$Q_{ss} = 0,0864 \cdot Q \cdot C_{ss} \quad (8)$$

Na qual:

Q_{ss} : descarga sólida em suspensão (T/dia);

Q : Vazão total da seção (m³/s);

C_{ss} : Concentração de sedimentos suspensos (mg/L).

3.5.3 Análise granulométrica de sedimentos em suspensão

Além das análises de concentração foi realizada análise de granulometria dos sedimentos suspensos pelo método de pipetagem para sedimentos finos com diâmetro menor de 0,062 mm conforme descrito por Carvalho (2008). Devido a limitações dos diversos métodos de análise granulométrica para amostras de material em suspensão, foi necessário coletar grande quantidade de amostras para aumentar a concentração de sedimentos das mesmas.

As amostras foram deixadas em repouso para retirada da água isenta de sedimentos com o auxílio de pipetas de 100 ml. Após a retirada da água, os frascos contendo água e sedimentos

foram unidos para obtenção da amostra concentrada. Para análise mais eficiente pelo método de pipetagem a concentração deve estar na faixa de 3000 a 10000 ppm.

Procedimento realizado pelo método de pipetagem:

1- Preparação da amostra: A amostra concentrada foi deixada em repouso por 24 horas, na sequência retiraram-se com o auxílio de pipetas três alíquotas de 100 ml da parte superior da amostra isenta de sedimentos para determinação da quantidade de sólidos dissolvidos. A determinação de sais solúveis foi realizada para correção dos resultados obtidos pelo método de pipetagem.

2- Pipetagem: No momento da análise foi realizada a medição da temperatura da amostra. A amostra foi colocada em uma proveta de 1L com marcações de profundidade em cm e agitada por 60 segundos, na sequência, dá-se partida no cronômetro, iniciando a contagem do tempo indicada na Tabela 4, em correspondência com a temperatura da mistura e a profundidade da pipetagem. O enchimento da pipeta foi efetuado na faixa de 8 a 13 segundos. O tempo e a altura de pipetagem, determinada pela lei de Stokes com base na temperatura da água e na queda de partículas de diâmetros de 0,062, 0,031, 0,016, 0,008, 0,004 e 0,002mm, foi apresentado por Carvalho, (2008).

3- Secagem: As pipetas foram descarregadas em cadinhos pré-pesados (P1) g e lavadas com água destilada que se acrescenta ao mesmo cadinho. Os cadinhos foram colocados na estufa ($105 \pm 2^{\circ}\text{C}$) para evaporação e levados em seguida para um dessecador, após chegar a temperatura constante foram pesados (P2) g. A diferença entre as pesagens com a correção para sólidos dissolvidos obtém-se, o peso de sedimentos em suspensão. Esse peso é expresso em seguida, percentualmente em relação ao peso total de sedimentos da amostra, indicando para cada diâmetro a porcentagem do mais fino.

Tabela 4: Tempo de pipetagem em função da temperatura, profundidade de retirada e diâmetro de partícula.

Diâmetro da partícula (mm)	0,062	0,031	0,016	0,008	0,004	0,002
Profundidade de retirada (cm)	10	15	10	10	5	3
Temperatura (°C)	Tempo de retirada					
20	29 s	2 min 52 s	7 min 40 s	30 min 40 s	61 min 19 s	2 h 27 min
21	28 s	2 min 48 s	7 min 29 s	29 min 58 s	59 min 50 s	2 h 24 min
22	27 s	2 min 45 s	7 min 18 s	29 min 13 s	58 min 22 s	2 h 20 min
23	27 s	2 min 41 s	7 min 8 s	28 min 34 s	57 min 05 s	2 h 17 min
24	26 s	2 min 38 s	6 min 58 s	27 min 52 s	55 min 41 s	2 h 14 min
25	25 s	2 min 34 s	6 min 48 s	27 min 14 s	54 min 25 s	2 h 11 min
26	25 s	2 min 30 s	6 min 39 s	26 min 38 s	53 min 12 s	2 h 08 min
27	24 s	2 min 27 s	6 min 31 s	26 min 02 s	52 min 02 s	2 h 05 min
28	24 s	2 min 23 s	6 min 22 s	25 min 28 s	50 min 52 s	2 h 02 min
29	23 s	2 min 19 s	6 min 13 s	24 min 63 s	49 min 42 s	1 h 59 min
30	23 s	2 min 16 s	6 min 6 s	24 min 22 s	48 min 42 s	1 h 57 min

S, min, h: Tempo em segundos, minutos e horas

Fonte: Adaptado DANEE (1970) apud Carvalho (2008).

3.5.4 Amostragem dos sedimentos de material de leito

A amostragem foi efetuada em diferentes posições ao longo da seção transversal do rio, com cuidado para não coletar em locais de água parada. Os materiais do leito foram coletados com o auxílio de uma pá e de um coletor simples representado por um tubo de PVC. As amostras representativas com quantidades suficientes para análise granulométrica foram devidamente acondicionadas em sacos plásticos etiquetados e levados para o Laboratório de Geotecnia da Faculdade de Engenharia Civil da UFU.

3.5.5 Análises dos sedimentos de material de leito

Com as amostras de sedimentos de leito foram realizadas análises granulométricas seguindo a ABNT NBR 7181:2016, para identificar o tamanho das partículas ou grãos, e a sua distribuição em porcentagem dos diâmetros dos grãos. O material coletado foi levado para o Laboratório de Geotécnica e preparado de acordo com a ABNT NBR 6457:1986. Para se determinar a distribuição granulométrica da fração dos sedimentos grossos (partículas com diâmetro superior a 2,0 mm) e finos (partículas inferiores a 2,0 mm e superiores a 0,075 mm), realizou-se o ensaio de peneiramento.

Os aparelhos e materiais utilizados no ensaio foram: agitador mecânico de peneiras com dispositivo de fixação, peneiras de #50, #38, #25, #19, #9,5, #4,8, #2,0, #1,2, #0,6, #0,42, #0,25, #0,15 e #0,075mm (figura 14), escova com cerdas metálicas, balança, capsulas, almofariz e estufa.

Figura 14: O agitador mecânico com a série de peneiras.



Fonte: Autor.

As amostras de cada ponto de coleta foram secadas ao ar, até próximo a umidade higroscópica (Figura 15). O material seco foi destorreado e homogeneizado. Por quarteramento, a quantidade de material foi reduzida até obter uma amostra representativa para realização do ensaio. Para cada amostra foram realizados ensaios em triplicata com cerca de 2,0 kg de material.

Figura 15: Amostras sendo secadas ao ar.



Fonte: Autor

O material destorroado e homogeneizado foi passado na peneira de 2,0 mm, de modo a assegurar a retenção na peneira somente dos grãos maiores que a abertura da malha. A parte retida na peneira de 2,0 mm foi lavada para eliminar o material fino aderente. Na sequência, a amostra foi levada à estufa para secagem a 105°C, até constância de massa. O material obtido foi utilizado para o peneiramento grosso. Assim, com as peneiras de #50, #38, #25, #19, #9,5, #4,8 e #2,0mm de diâmetro foram realizadas as baterias de peneiramento. As frações do material retidas acumuladas em cada peneira foram pesadas, e em seguida as frações retidas e passantes e as porcentagens retidas e passantes foram calculadas.

O material que passou na peneira de 2,0 mm foi separado e utilizado cerca de 240g para o peneiramento fino. Esse material foi passado na peneira de 0,075mm e lavado a baixa pressão. A amostra foi levada à estufa para secagem a 105°C, até constância de massa. Com o material obtido foi realizado o peneiramento com peneiras de #1,2, #0,6, #0,42, #0,25, #0,15 e #0,075mm de diâmetro. As frações do material retidas acumuladas em cada peneira foram pesadas, e em seguida as frações retidas e passantes e as porcentagens retidas e passantes foram calculadas.

3.6 ESTIMATIVA DA DESCARGA DE SEDIMENTOS

Para estimar a descarga de sedimentos no Rio Jordão foi realizado uma análise dos melhores métodos de estimativa a partir e das limitações dos métodos e dos dados de granulometria, velocidade de escoamento e declividade do canal, obtidos nas campanhas realizadas. Assim, os métodos escolhidos foram: Meyer-Peter e Muller (1948), Ackers e White (1973), Colby (1957) e Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955).

3.6.1 Descarga de arrasto (Método de Meyer-Peter e Muller (1948))

A equação de Meyer Peter e Muller (1948), segundo Paiva (2001) é apresentada por Simons & Senturk (1977), na forma:

$$\gamma \cdot \left[\frac{K_{st}}{K_r} \right]^{3/2} \cdot Rh \cdot S = 0,047 \cdot \gamma'_s \cdot D_m + 0,25 \cdot \rho^{1/3} \cdot q_b^{2/3} \quad (9)$$

Na qual:

γ : peso específico da água (T/m³);

Rh: raio hidráulico (m);

S: gradiente de energia (m/m);

γ'_s : peso específico do sedimento submerso (T/m³);

ρ : massa específica da água (utm/m³/1000);

q_b : peso submerso do sedimento transportado (T/s.m);

K_{st} : coeficiente de rugosidade de Strickler, dado pela equação:

$$K_{st} = \left(\frac{U^2}{S \cdot R^{4/3}} \right)^{1/2} \quad (10)$$

Na qual:

U: velocidade média do escoamento.

K_r : coeficiente de rugosidade devido à força de cisalhamento dado pela equação:

$$K_r = \frac{26}{D_{90}^{1/6}} \quad (11)$$

Na qual:

D_{90} : diâmetro da partícula para o qual 90% do sedimento de leito são mais finos (m);

D_m : diâmetro médio de partícula, calculado pela equação:

$$D_m = \sum_{i=1}^m D_{si} \cdot i_f \quad (12)$$

Na qual:

D_{si} : diâmetro médio geométrico entre dois diâmetros de uma faixa (m);

i_f : fração granulométrica entre os dois diâmetros, normalmente expressa em porcentagem.

Após encontrar q_b é necessário encontrar o peso total do sedimento submerso (Qb'), pelo produto entre a largura da superfície e q_b . Na sequência a descarga de sedimentos (Qb) foi estimada pela fórmula:

$$Qb = Qb' \cdot \frac{\gamma}{\gamma'_s} \quad (13)$$

3.6.2 Descarga de material de leito (Método Ackers e White (1973))

Para aplicar o método de Ackers e White, são usados os seguintes dados de entrada:

Q: vazão em m³/s

U: velocidade média do escoamento em m/s;

D₃₅: diâmetro do grão para o qual 35% do material do leito são mais finos em m;

γs: peso específico do sedimento em T/m³;

d: profundidade do escoamento em m;

S: declividade da linha d'água em m/m;

v: viscosidade cinemática da água em m²/s;

g: aceleração da gravidade em m/s².

A aplicação do método é descrita em Brune (2014):

a) Cálculo da velocidade de cisalhamento do leito, equação 14:

$$U' = \sqrt{g \cdot d \cdot S} \quad (14)$$

b) Cálculo do diâmetro adimensional do grão, equação 15:

$$D_{gr} = D_{35} \cdot \left[\frac{g \cdot (s_g - 1)}{v} \right]^{1/3} \quad (15)$$

c) Cálculo da grandeza adimensional de mobilidade, equação 16:

$$F_{gr} = \frac{U'^n}{\sqrt{g \cdot D_{35} \cdot (S_g - 1)}} \cdot \left[\frac{U}{\sqrt{32 \cdot \log\left(\frac{\alpha \cdot d}{D_{35}}\right)}} \right]^{1-n} \quad (16)$$

d) Cálculo da descarga sólida adimensional, baseada no conceito de potência do escoamento, equação 17:

$$G_{gr} = C_A \cdot \left(\frac{F_{gr}}{F} - 1 \right)^m \quad (17)$$

e) Cálculo da concentração de descarga sólida de material de leito, em ppm, equação 18:

$$C = 10^6 \left(\frac{G_{gr} \cdot S_g \cdot D_{35} \cdot \left(\frac{U}{U'} \right)^n}{d} \right) \quad (18)$$

f) Cálculo da descarga sólida total do material de leito, em T/d, pela equação 19:

$$Q_{smI} = 0,0864. Q. C \quad (19)$$

Na qual:

D_{gr} : diâmetro adimensional do grão;

F_{gr} : grandeza adimensional de mobilidade;

G_{gr} : descarga sólida adimensional;

S_g : gravidade específica do sedimento, igual a γ_s / γ ;

ν : viscosidade cinemática da água, em m^2/s ;

U' : velocidade de cisalhamento do leito, em m/s ;

U : velocidade média do escoamento, em m/s ;

n : expoente de transição que depende da granulometria do sedimento;

m : expoente da função de transporte de sedimento;

F : valor do número de Froude em movimento inicial;

C_A : coeficiente da função de transporte de sedimento;

S : declividade da linha d'água, em m/m ;

α : coeficiente que no regime turbulento;

C : concentração de descarga sólida do material de leito, em ppm;

Q_{smI} : descarga sólida de material de leito, em T/d;

Os valores de n , F , m e C_A foram avaliados para dois diâmetros médios de material do leito, sendo para silte, $D_{gr} = 1$, e para areia, $D_{gr} = 60$, resultando nos valores apresentados na Tabela 5 (CARVALHO, 2008).

Tabela 5: Valores das constantes da fórmula de Ackers e White.

Coeficientes	$D_{gr} > 60$	$1 > D_{gr} \leq 60$
C_A	0,025	$2,86 \cdot \log D_{gr} - (\log D_{gr})^2 - 3,53$
n	0	$1,00 - 0,56 \cdot \log D_{gr}$
F	0,17	$\frac{0,23}{\sqrt{D_{gr}}} + 0,14$
m	1,5	$\frac{9,66}{D_{gr}} + 1,34$

Fonte: Brune (2014).

3.6.3 Descarga sólida total (Método de Colby (1957))

No método de Colby a descarga sólida total é calculada pela equação 20:

$$Q_{st} = Q_{ss} + Q_{nm} \quad (20)$$

Sendo:

$$Q_{ss} = 0,0864 \cdot Q \cdot C_{ss}$$

$$Q_{nm} = q_{nm} \cdot K \cdot L \quad (21)$$

Na qual:

Q_{st} : a descarga sólida total (T/d);

Q_{nm} : a descarga sólida não medida (T/d);

Q_{ss} : descarga sólida em suspensão medida (T/d);

Q : vazão total da seção (m^3/s);

C_{ss} : concentração de sedimentos suspensos (mg/L);

q_{nm} : descarga sólida não medida aproximada por metro de largura (T/d. m);

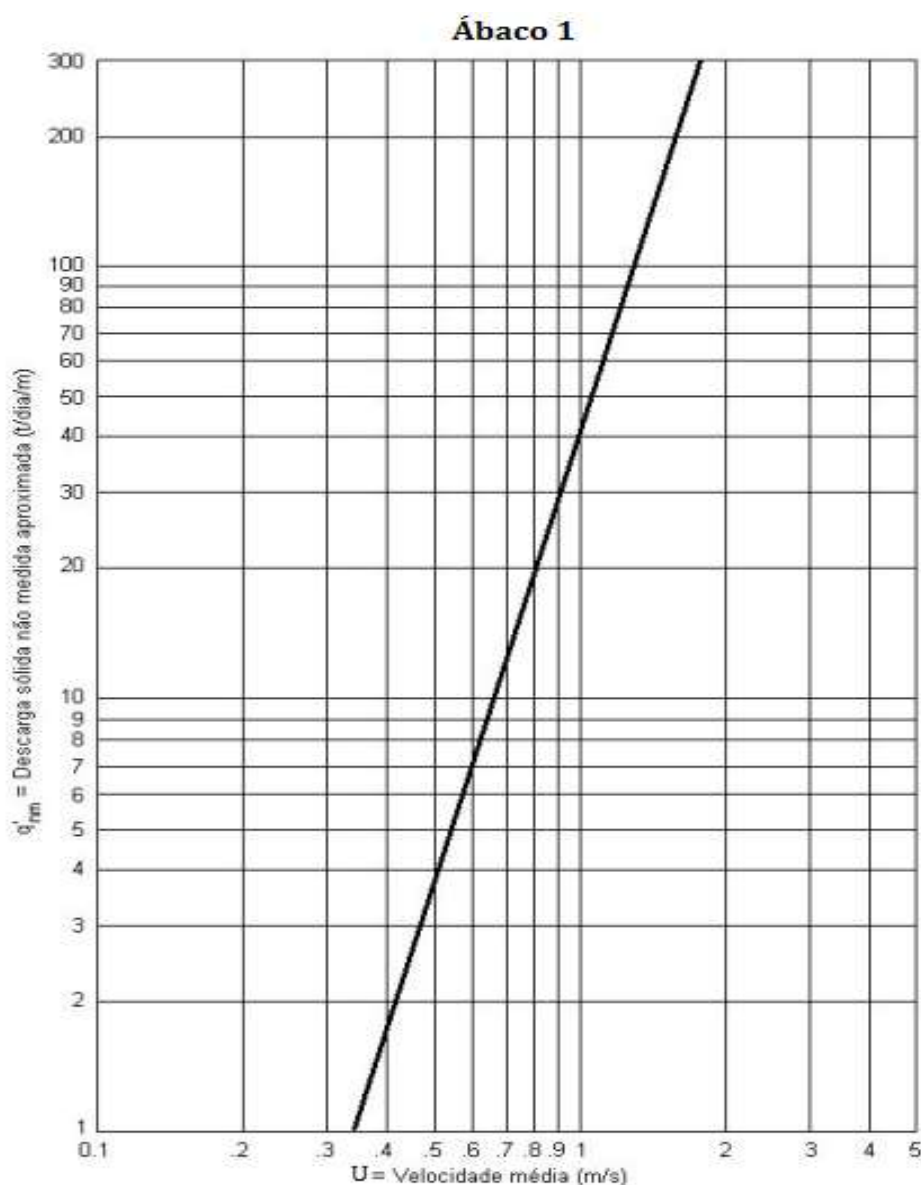
K : fator de correção (adimensional);

L : largura da seção (m);

A descarga não medida corresponde a descarga de arrasto somada a descarga não amostrada devido a limitações do equipamento de amostragem. A Q_{nm} é determinada com o auxílio dos ábacos. O procedimento para utilização dos ábacos é o seguinte:

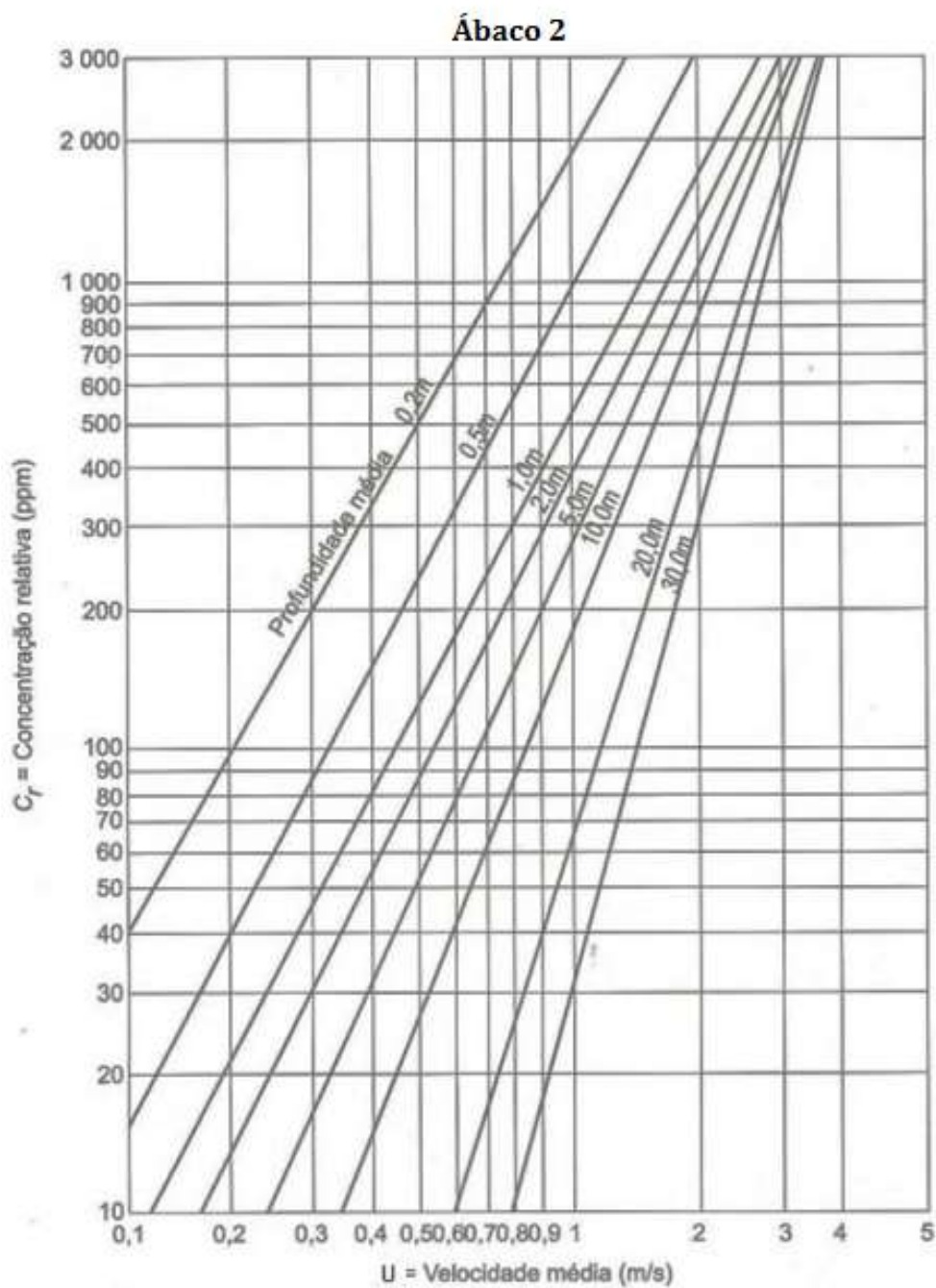
Com o ábaco 1 (figura 16) e a partir da velocidade média de escoamento, obtém-se o q_{nm} . Utilizando o ábaco 2 (Figura 17) e a partir da velocidade média e da profundidade média, obtém-se a concentração relativa e calcula-se a razão de eficiência. Já o ábaco 3 (Figura 18) é utilizado para obter o fator de correção.

Figura 16: Ábaco 1- Obtenção da descarga sólida não medida aproximada, por metro de largura do rio, a partir da velocidade média do curso d'água.



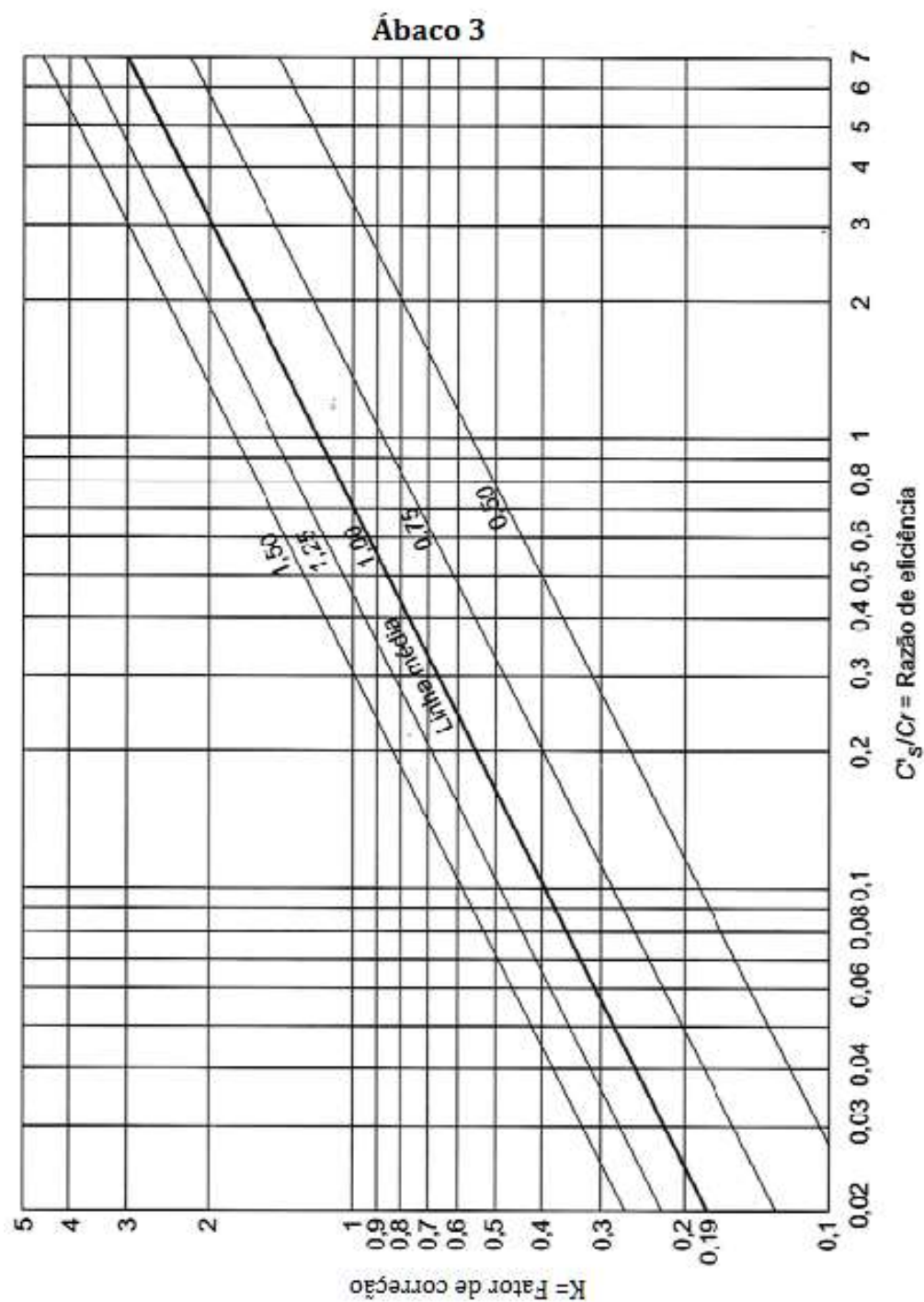
Fonte: USBR (1955), Simons e Senturk (1977) apud Carvalho (2008).

Figura 17: Ábaco 2- Obtenção da concentração relativa a partir da velocidade média e da profundidade média do curso d'água.



Fonte: USBR (1955), Simons e Senturk (1977) apud Carvalho (2008).

Figura 18: Ábaco 3- Obtenção do fator de correção a partir da razão de eficiência.



Fonte: USBR (1955), Simons e Senturk (1977) apud Carvalho (2008).

3.6.4 Descarga sólida total (Método modificado de Einstein Colby e Hembree (1955))

Os dados necessários para a aplicação do método, obtidos pelas coletas em campo e análises realizadas em laboratório são:

- vazão (m³/s);
- área da seção transversal (m²);
- largura da seção (m);
- velocidade média do escoamento (m/s);
- profundidade média das verticais de coletas de sedimentos (m);
- concentração de sedimentos em suspensão (mg/L);
- distribuição granulométrica de materiais de leito e suspensos;
- temperatura da água (°C);

No estudo o método foi empregado conforme descrito por Paiva (2001):

- O cálculo da intensidade de atrito, para cada fração individual de grão. Equação 22 e 23, usa-se o maior valor.

$$\Psi = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot \frac{D_{35}}{R' \cdot S} \quad (22)$$

$$\Psi = 0,4 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot \frac{D_i}{R' \cdot S} \quad (23)$$

Na qual:

ρ_s, ρ : massas específicas do sedimento e da água respectivamente;

D_i : diâmetro do grão, da fração considerada;

$R_h S$: produto do raio hidráulico pela declividade da linha de energia, calculado por iteração pela equação:

$$\sqrt{SR_h} = \frac{U}{5,75 \cdot \sqrt{g} \cdot \log \left[\frac{12,27 \cdot x \cdot d}{D_{65}} \right]} \quad (24)$$

Na qual:

U: velocidade do escoamento;

x: fator de correção da distribuição logarítmica de velocidade, dado na Figura 19, com d substituindo o raio hidráulico e sendo δ a espessura da subcamada limite laminar, dada pela equação 25:

$$\delta = 11,6 \frac{v}{U_*} \quad (25)$$

Na qual:

$U_* = \sqrt{g \cdot d \cdot S}$: velocidade de atrito relativa aos grãos;

v : viscosidade cinemática da água;

S : Declividade da linha de energia para condições do escoamento;

d : Profundidade do escoamento;

D_{65} : diâmetro dos sedimentos em que 65% das partículas são mais finas;

- Obtenção da intensidade de transporte de sedimentos, Φ^* , é obtida da Figura 20, com Ψ substituindo Ψ^* .
- Cálculo da descarga de fundo, em peso por unidade de largura do canal, para cada fração de diâmetro, pela equação 26:

$$i_B q_B = \frac{1}{2} \cdot \Phi^* \cdot i_b \cdot \gamma_s \cdot \sqrt{[d' \cdot g \cdot D_i^3]} \quad (26)$$

Na qual:

$$d' = \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1$$

i_b : fração do material do leito de diâmetro D_i ;

- O cálculo da carga em suspensão, em peso por unidade de largura, para cada fração de diâmetro, pela equação 27:

$$q_{sri} = i_s \cdot \gamma \cdot C_{ss} \cdot q \cdot \left[(1 - E') - 2,3 \cdot \frac{E' \cdot \log E}{P_m - 1} \right] \quad (27)$$

Na qual:

i_s : fração do material em suspensão de diâmetro D_i ;

C_{ss} : concentração medida de sedimentos em suspensão;

q : descarga líquida por unidade de largura do canal;

E' e P_m são calculados pelas equações 28 e 29 respectivamente:

$$E' = \frac{a'}{dV} \quad (28)$$

Na qual:

a' : profundidade não amostrada;

dV : profundidade média nas verticais de amostragem e,

$$p_m = 2,3 \cdot \log \left(\frac{30,2 \cdot x \cdot d}{D_{65}} \right) \quad (29)$$

- Cálculo do expoente Z' , da distribuição de concentração, de Rouze (1937), para cada fração de diâmetro, por tentativas, de modo a satisfazer a equação 30:

$$\frac{Q_{s'1}}{i_b \cdot Q_b} = \frac{q_{s'} \cdot B}{B \cdot i_b \cdot q_b} = \frac{I_1}{J_1} \cdot (P_m \cdot J'_1 + J'_2) \quad (30)$$

$$I_1 = 0,216 \cdot \frac{E_1^{Z'-1}}{(1-E_1)^{Z'}} \cdot J_1 \quad (31)$$

$$J_1 = \int_{E_1}^1 \left(\frac{1-Y}{Y} \right)^{Z'} \cdot dy \quad (32)$$

$$J_2 = \int_{E_1}^1 \left(\frac{1-Y}{Y} \right)^{Z'} \cdot \ln y \cdot dy \quad (33)$$

$$J_{1'} = \int_{E'}^1 \left(\frac{1-Y}{Y} \right)^{Z'} \cdot dy \quad (34)$$

$$J_{2'} = \int_{E'}^1 \left(\frac{1-Y}{Y} \right)^{Z'} \cdot \ln y \cdot dy \quad (35)$$

$$E_1 = \frac{2 \cdot D_i}{d} \quad (36)$$

Os valores de I_1 são obtidos pela Figura 21-A, os valores de J_1 e $J_{1'}$ da Figura 23 e os valores de J_2 e $J_{2'}$ da Figura 24.

A solução da equação 30, é determinada por tentativas, sendo $(Q_{s1}/i_b \cdot Q_b)$ já conhecido. Segundo Paiva (2001), um dos procedimentos para o cálculo de Z é o de Lara (1966):

- seleciona-se então pelo menos 3 frações de diâmetros existentes tanto na carga em suspensão como na carga de fundo e calcula-se os valores correspondentes de Z'_i para esses diâmetros pela equação 30.

- plota-se os valores de Z'_i em papel logarítmico em função da velocidade de sedimentação w_i . Em seguida, obtém-se por mínimos quadrados, uma equação, da qual são obtidos os valores de Z' para as demais faixas de diâmetro. A equação 37 tem a forma:

$$Z_{i'} = a \cdot w_i^b \quad (37)$$

Na qual:

w_i : velocidade de sedimentação da partícula de diâmetro D_i , dada pela equação de Rubey (1933):

$$w = \frac{\left[\frac{2}{3} \cdot g \cdot \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) \cdot D_i^3 + 36 \cdot v^2 \right]^{(1/2)} - 6 \cdot v}{D_i} \quad (38)$$

Quando não se tem 3 frações de diâmetro comuns em suspensão e no fundo, adota-se o procedimento original de Colby e Hembree (1955):

- calcula-se o valor de Z' para o diâmetro de grão dominante na carga em suspensão por iteração de modo a satisfazer a equação 30, partindo com o valor inicial obtido da Figura 22, proposta por Hubbel (1964) e calculam-se os valores de Z' para as demais frações, pela equação 38:

$$\frac{Z'_{i'}}{Z'_{1'}} = \left(\frac{w_i}{w_1} \right)^{0,7} \quad (39)$$

Na qual:

$Z'_{1'}$: valor de Z' para o grão dominante;

w_1 : velocidade de sedimentação do grão dominante.

• Cálculo de $J_1, J_2, J_{1'}$ e $J_{2'}$ é realizado pelas equações 32, 33, 34 e 35 ou pelas Figuras 23 e 24:

• Calcula-se I_1 pela equação 31 ou pela Figura 21-A e I_2 pela Figura 21-B ou pela equação 40:

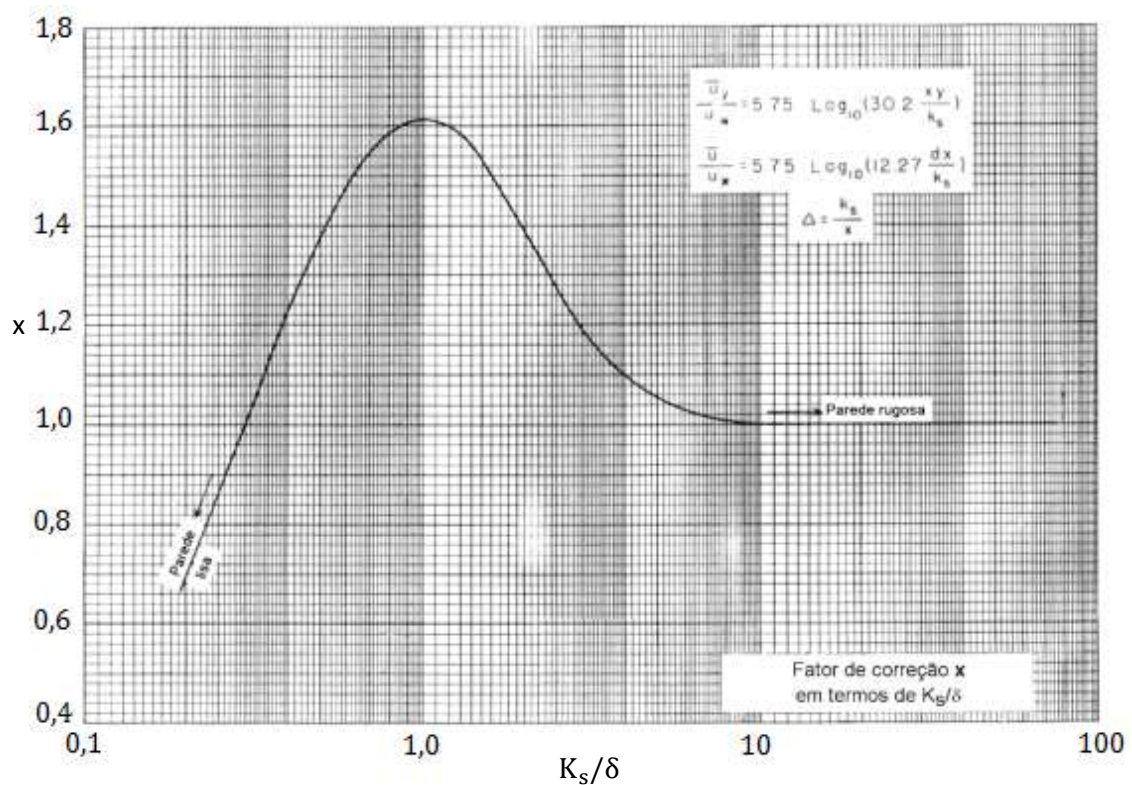
$$I_2 = 0,216 \cdot \frac{E_1^{Z-1}}{(1-E_1)^Z} \int_{E_1}^1 \left(\frac{1-Y}{Y} \right)^Z \cdot \ln y \cdot dy \quad (40)$$

• Por fim, para cada fração de diâmetro é calculado a carga total de sedimentos pela equação 41 para sedimentos finos e equação 42 para sedimentos grossos:

$$i_T \cdot Q_T = Q_{Si} \cdot \frac{P_m \cdot J_1 + J_2}{P_m \cdot J_{1'} + J_{2'}} \quad (41)$$

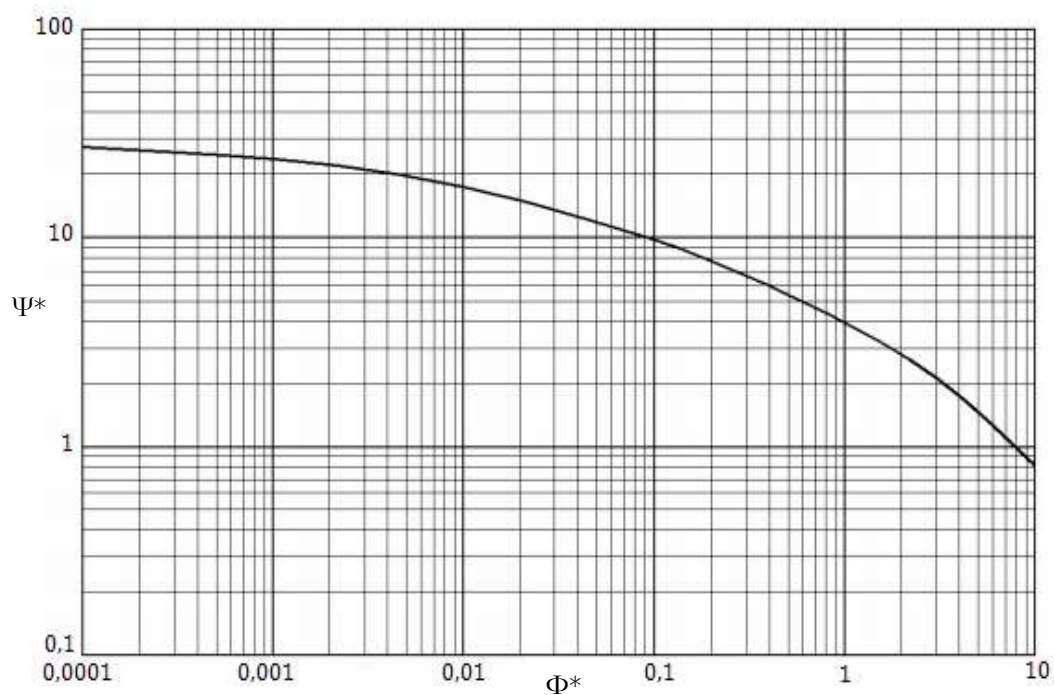
$$i_T \cdot Q_T = i_b \cdot Q_b \cdot (P_m \cdot I_1 + I_2 + 1) \quad (42)$$

Figura 19: Fator de correção da distribuição logarítmica da velocidade de Einstein (1950).

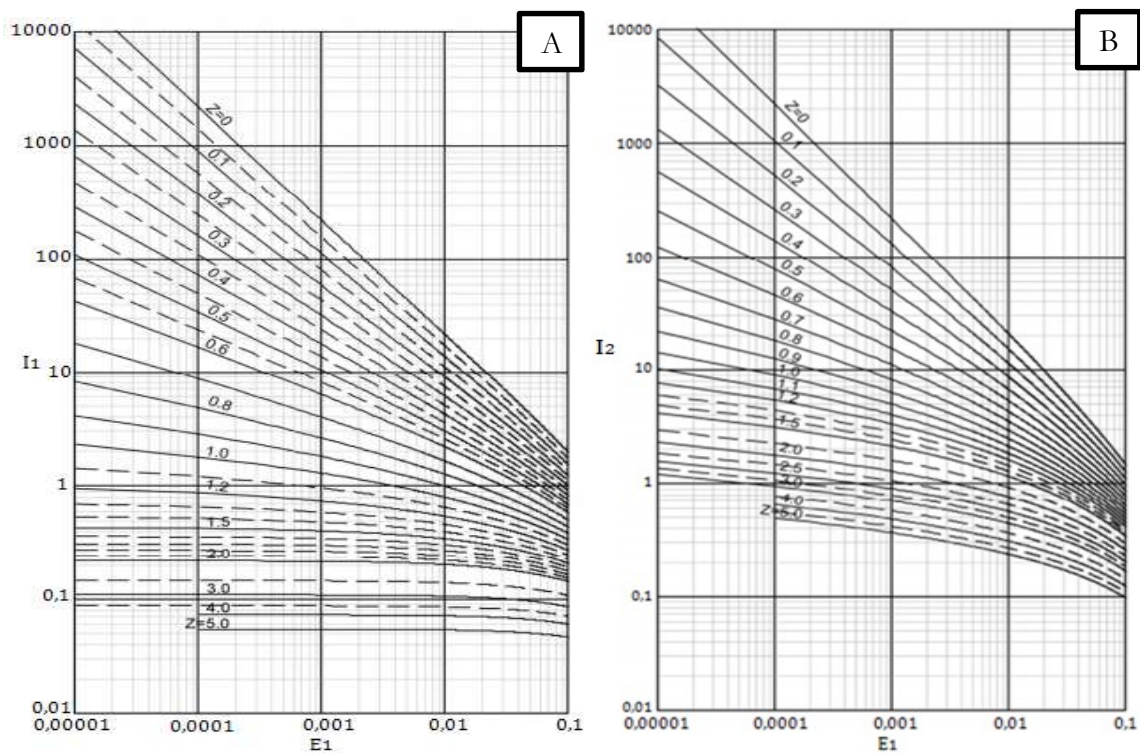


Fonte: Paiva (2001)

Figura 20: Ábaco da função de carga do fundo segundo Einstein (1950).

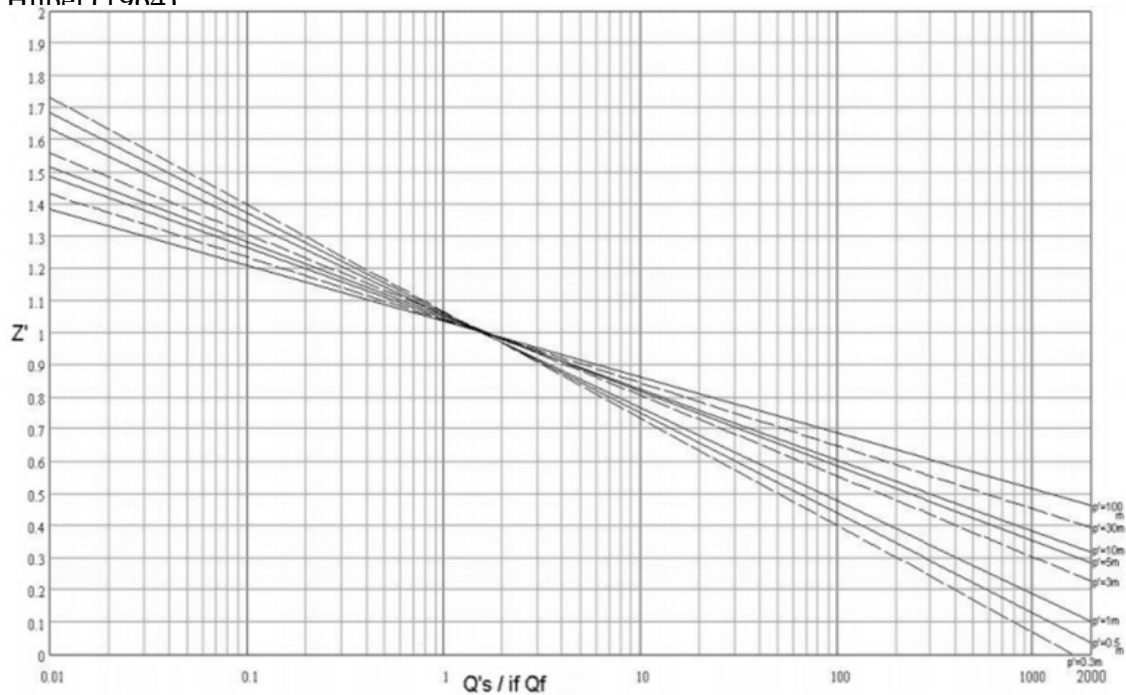


Fonte: Paiva (2001)

Figura 21: A) Valores de I_1 , em termos de E_1 , para vários valores de z segundo Einstein (1950); B) Valores de I_2 , em termos de E_1 , para vários valores de Z segundo Einstein (1950)

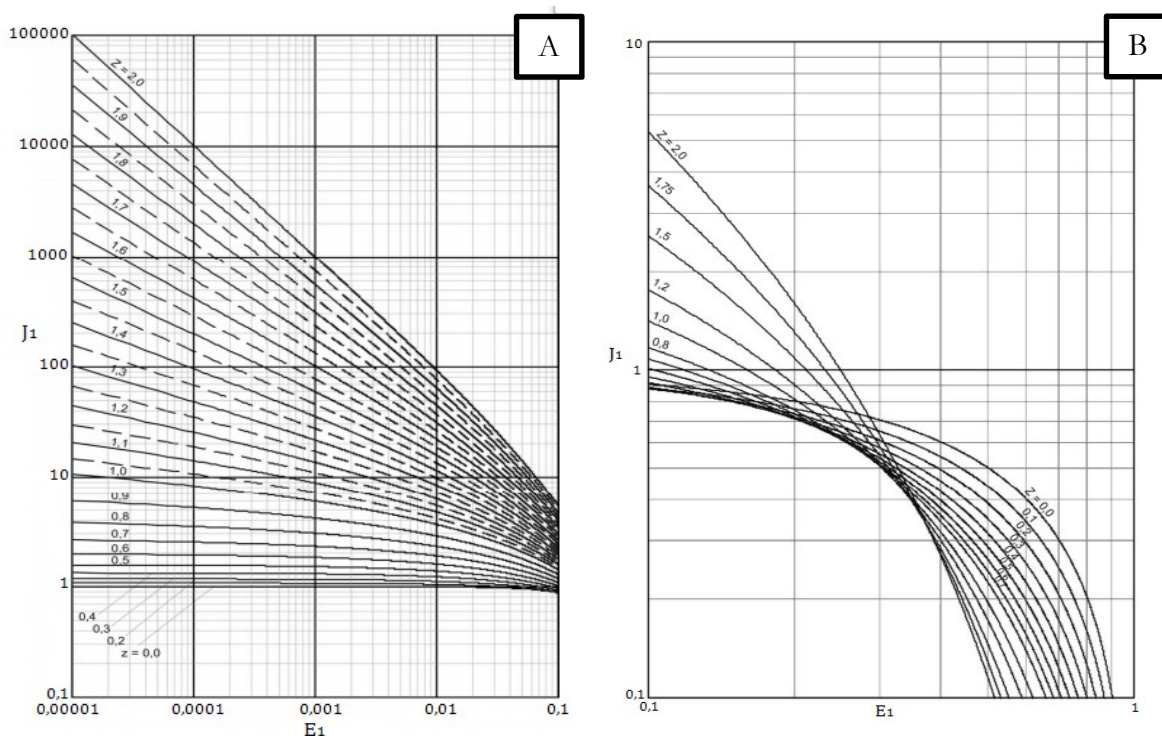
Fonte: Paiva (2001)

Figura 22: Valores de Z' em função de $Q's / if.Qf$, para o grão dominante segundo Colby e Hubel (1964)



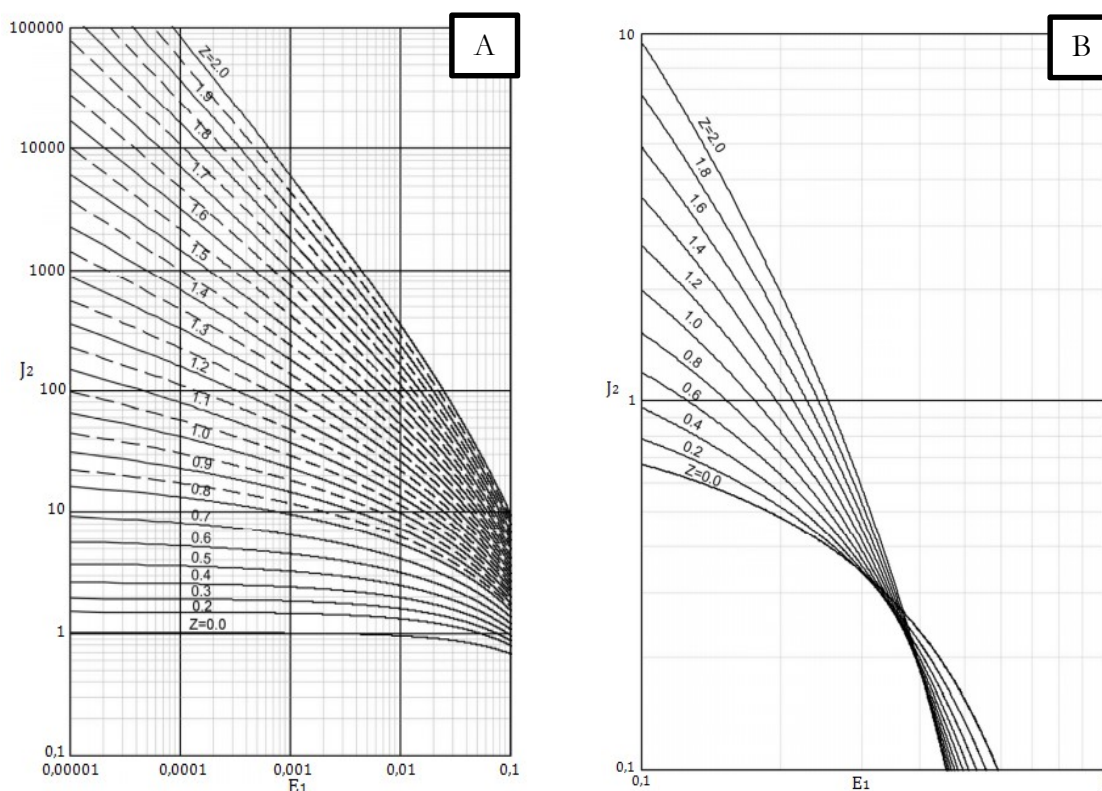
Fonte: Paiva (2001).

Figura 23: A) Integral de J_1 em termos de E_1 e Z' ; B) Integral de J_1 em termos de E_1 e Z' .



Fonte: Paiva (2001).

Figura 24: A) Integral de J_2 em termos de E_1 e Z' ; B) Integral de J_2 em termos de E_1 e Z' .



Fonte: Paiva (2001)

3.7 APLICAÇÃO DO PROGRAMA HEC-RAS

O programa computacional na versão HEC-RAS 5.0.6 foi utilizado para simular o transporte de partículas sólidas em um trecho de 45,5km no Rio Jordão. Assim, foi possível analisar ao longo do tempo os locais onde ocorrem erosão e depósito de sedimentos. Na Figura 61 do anexo A é ilustrada a Janela principal do HEC-RAS.

3.7.1 Geometria do Rio

Para a simulação no HEC-RAS, foi necessário introduzir a geometria do Rio Jordão a partir dos levantamentos de campo obtidos nas coletas realizadas. A drenagem do Rio foi criada com início na estação 2 e fim na confluência com o Rio Paranaíba, além disso, os afluentes não foram considerados. O trecho simulado apresenta aproximadamente 45500 metros.

Ao longo do trecho de simulação quatro seções foram adicionadas manualmente a partir dos dados obtidos pelo ADCP nas coletas de campo. As outras seções foram obtidas através da ferramenta ArcGIS. As seções foram adicionadas a cada 5000 metros e na sequência foram criadas seções interpoladas entre as existentes, com recurso da função interpoladora

existente no HEC-RAS. Após interpolação a distância máxima entre duas secções passou de 5000 para 500 metros. O coeficiente de Manning foi determinado para a estação 2, 3 e 4 a partir dos dados de granulometria pelas equações 44 e 45 indicadas nos resultados. A Figura (25) representa o trecho e o perfil das secções 2, 3 e 4 obtidos no programa. É importante salientar que o início do trecho é representado nos 45500 m e o fim do trecho corresponde a 0. Nas Figuras 62 e 63 do anexo A é ilustrado a janela do editor de geometria do rio com as secções interpoladas e o editor de dados de uma secção transversal.

3.7.2 Escoamento quase-permanente

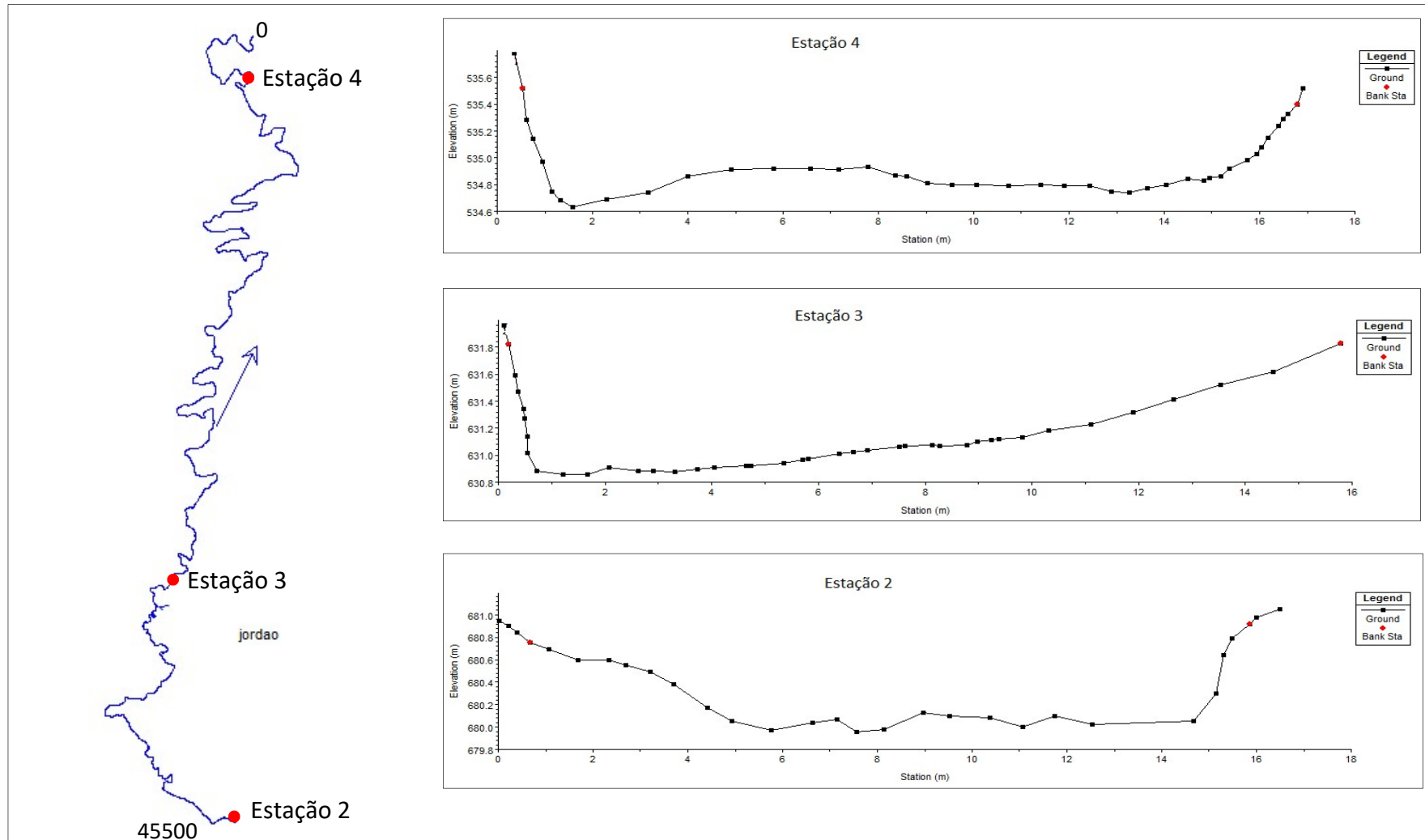
Após a criação da geometria os dados de vazões obtidos nas coletas foram inseridos como condições de contorno para o escoamento quase-permanente. Para inserir os dados, primeiramente considerou-se a estação 2 como limite a montante. No editor de série de fluxo os dados de vazões, a duração do fluxo e o incremento computacional foram inseridos. As vazões foram aquelas obtidas em cada campanha, a duração do fluxo consiste na diferença em horas de uma coleta para outra e o incremento computacional considerou-se de 24 horas. Nas Figuras 64 e 65 do anexo A, são apresentadas as janelas do editor de escoamento quase-permanente e do editor de serie de fluxo, no qual, foram inseridos dados de vazão na secção 2 a montante.

Apesar de não considerar na geometria, sabe-se que o rio apresenta diversos afluentes que contribuem para o incremento de vazão. Esses afluentes foram considerados nas condições de contorno do escoamento quase-permanente. Por diferença de vazão de uma secção a outra a jusante foi realizada uma estimativa do incremento de vazão de cada afluente pelo tamanho da área de contribuição e assim essas vazões foram consideradas no editor de série de fluxos laterais. Entre a estação 2 e 3 foram considerados quatro fluxos laterais e entre a estação 3 e 4 foram considerados cinco fluxos laterais. Antes de inserir os dados de sedimentos de fundo, foram realizados testes com simulações do modelo hidráulico, pois os resultados de sedimentos são muito sensíveis a parâmetros hidráulicos.

3.7.3 Sedimentos de leito

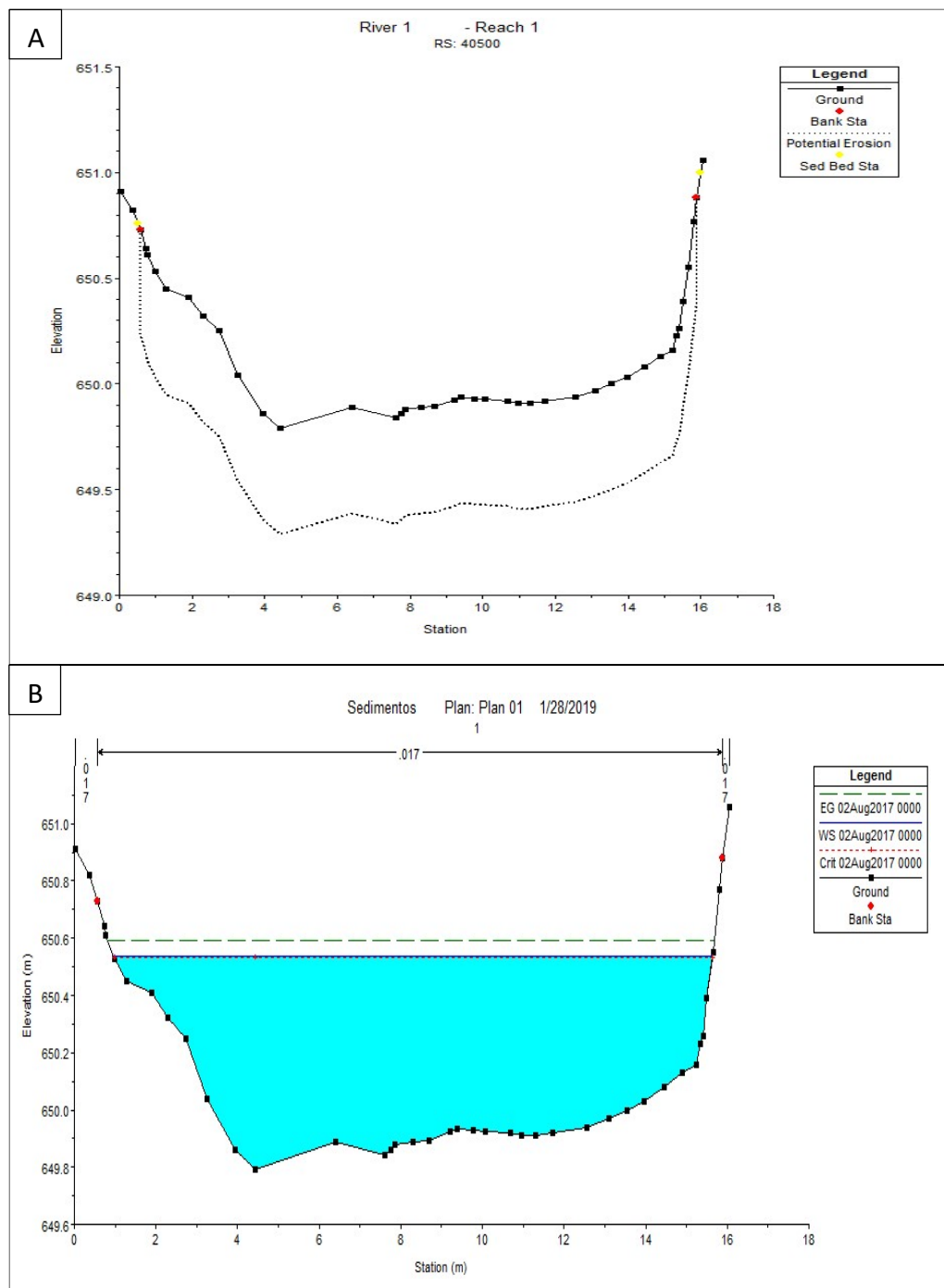
Para entrada de dados de sedimentos no programa, primeiramente foi inserida a distribuição granulométrica do leito da estação 2, 3 e 4 a partir das análises e curvas granulométricas criadas nas campanhas realizadas em campo. Em cada seção no programa foi considerada a distribuição granulométrica da estação mais próxima em que ocorreram coletas e análises de sedimentos de leito. Em todas as seções foi definido que a máxima mudança na dinâmica vertical do leito ficaria em 0,5 m. A Figura 26, representa uma determinada seção com a mudança vertical no leito e a seção após a simulação do escoamento. A janela para entrada de dados de sedimentos é apresentada na Figura 66 e uma curva granulométrica gerada no editor de granulometria de sedimentos de leito é ilustrada na Figura 67.

Figura 25: Trecho de simulação e perfis transversais das estações criadas no HEC-RAS.



Fonte: Autor.

Figura 26: A) Seção transversal com a mudança vertical no leito; B) Seção transversal após a simulação do escoamento.



Fonte: Autor.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Neste capítulo são abordados os diferentes resultados obtidos ao longo do desenvolvimento da pesquisa a partir da aplicação da metodologia proposta. Inicialmente são apresentadas e analisadas as características hidráulicas, geométricas e as curvas-chave de vazão líquida das seções de estudo no Rio Jordão. Na sequência, os resultados referentes às análises sedimentométricas, descargas sólidas em suspensão, estimativa de descarga de sedimentos pelos métodos propostos e as diferentes curvas de sedimentos são expostos e discutidos. Por fim, neste capítulo são mostrados os resultados obtidos nas simulações realizadas no programa HEC-RAS e as análises de fatores que influenciam o carregamento de sedimentos na Bacia Hidrográfica.

4.1 CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA E GEOMÉTRICA DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS

Para estimar a descarga de sedimentos no Rio Jordão, foi necessário obter parâmetros hidráulicos e geométricos das seções analisadas. A vazão (Q), velocidade média (U), profundidade média (d), largura (L) e o perfil topo batimétrico da seção foram determinadas em campo. Já declividade da linha de água, coeficiente de rugosidade, perímetro, área e raio hidráulico foram determinados a partir do programa *River Surveyor* e por meio de cálculos com equações conhecidas na literatura.

A determinação da declividade da linha de água (S) foi realizada pela equação de Manning. A fórmula de Manning é a mais utilizada para determinação da declividade em rios e canais em virtude de resultados comprovados sobre a sua validade e da grande quantidade de dados decorrentes das aplicações (SILVA et al., 2003 apud BRUNE, 2014)

O coeficiente de rugosidade (n) foi obtido a partir da média entre as equações 44 e 45, que representam a fórmula de Strickler (1923) alterada para D_{50} e D_{90} . Para determinar o perímetro molhado (P_m), as seções foram analisadas a partir dos perfis obtidos no programa *River Surveyor*. A área molhada (A_m) foi obtida pela equação da continuidade. O raio hidráulico foi determinado pela razão entre a área molhada e o perímetro molhado.

$$S = \left(\frac{Q \cdot n}{A \cdot Rh^{2/3}} \right)^2 \quad (43)$$

$$n = \frac{D_{50}^{1/6}}{21,1} \quad (44)$$

$$n = \frac{D_{90}^{1/6}}{26} \quad (45)$$

$$Q = U \cdot A \quad (46)$$

Os dados hidráulicos e geométricos das seções em cada campanha estão apresentados nas Tabelas 6, 7, 8 e 9.

Tabela 6: Características hidráulicas e geométricas da estação 1.

Data	Período	Estação 1							
		L (m)	d (m)	U(m/s)	Q(m³/s)	A(m²)	Pm (m)	Rh (m)	S(m/m)
02/08/2017	Seco	14,0	0,311	0,220	0,725	3,290	14,928	0,220	0,00013
12/09/2017		14,0	0,301	0,172	0,450	2,620	14,802	0,177	0,00010
18/10/2017		14,0	0,301	0,183	0,491	2,683	14,802	0,181	0,00011
07/11/2017	Chuvoso	15,4	0,454	0,450	3,289	7,309	16,289	0,449	0,00020
12/12/2017		16,0	0,678	0,588	6,118	10,405	16,829	0,618	0,00022
23/01/2018		15,0	0,439	0,417	2,637	6,329	15,877	0,399	0,00020
27/02/2018		15,1	0,531	0,501	4,300	8,583	16,121	0,532	0,00019
20/03/2018		15,5	0,467	0,364	2,159	5,927	16,435	0,361	0,00017
22/05/2018	Seco	15,0	0,377	0,367	1,850	5,045	15,754	0,320	0,00019
17/07/2018		15,0	0,300	0,273	0,879	3,216	15,600	0,206	0,00019
04/09/2018		14,5	0,275	0,180	0,392	2,177	15,022	0,145	0,00013
16/10/2018		-	-	-	-	-	-	-	-
20/11/2018	Chuvoso	15,5	0,583	0,521	4,786	9,193	16,295	0,564	0,00018
11/12/2018		15,6	0,570	0,523	4,598	8,792	16,287	0,540	0,00019
Média		15,0	0,4	0,4	2,5	5,8	15,8	0,4	0,00017

L: largura; d: profundidade média; U: velocidade média da água; Q vazão; Am: Área molhada; Pm: Perímetro molhado; Rh: Raio hidráulico; S: declividade.

Tabela 7: Características hidráulicas e geométricas da estação 2.

Data	Período	Estação 2							
		L (m)	d(m)	U(m/s)	Q(m³/s)	A (m²)	Pm (m)	Rh (m)	S(m/m)
02/08/2017	Seco	15,0	0,500	0,194	1,461	7,520	16,580	0,454	0,00003
12/09/2017		15,0	0,430	0,153	1,053	6,893	16,205	0,425	0,00002
18/10/2017		15,0	0,458	0,164	0,600	3,663	16,074	0,228	0,00005
07/11/2017	Chuvoso	15,5	0,568	0,637	5,204	8,167	17,592	0,464	0,00033
12/12/2017		16,5	0,772	0,905	11,927	13,179	19,004	0,693	0,00039
23/01/2018		16,0	0,605	0,689	6,046	8,770	17,850	0,491	0,00036
27/02/2018		16,0	0,655	0,749	7,560	10,095	18,319	0,551	0,00027
20/03/2018		15,5	0,537	0,609	4,814	7,901	17,192	0,460	0,00023
Média		15,6	0,6	0,5	4,8	8,3	17,4	0,5	0,00021

L: largura; d: profundidade média; U: velocidade média da água; Q vazão; Am: Área molhada; Pm: Perímetro molhado; Rh: Raio hidráulico; S: declividade.

Tabela 8: Características hidráulicas e geométricas da estação 3.

Data	Período	Estação 3							
		L (m)	d (m)	U(m/s)	Q(m³/s)	A(m²)	P (m)	Rh (m)	S(m/m)
02/08/2017	Seco	13,0	0,653	0,265	2,100	7,910	14,306	0,553	0,00004
12/09/2017		13,0	0,587	0,203	1,400	6,893	14,174	0,486	0,00003
18/10/2017		13,0	0,590	0,201	1,450	7,225	14,180	0,510	0,00003
07/11/2017	Chuvoso	14,0	0,705	0,314	5,343	17,004	15,410	1,103	0,00003
12/12/2017		15,5	0,946	0,555	13,832	24,917	18,021	1,383	0,00006
23/01/2018		15,0	0,891	0,410	7,913	19,289	16,781	1,149	0,00004
27/02/2018		15,0	0,918	0,395	8,663	21,954	16,836	1,304	0,00002
20/03/2018		14,0	0,908	0,377	6,918	18,330	15,816	1,159	0,00003
22/05/2018	Seco	14,0	0,865	0,336	4,778	14,210	15,729	0,903	0,00003
17/07/2018		14,0	0,670	0,302	2,561	8,480	15,294	0,554	0,00004
04/09/2018		13,5	0,590	0,250	1,834	7,336	14,892	0,493	0,00003
16/10/2018		-	-	-	-	-	-	-	-
20/11/2018	Chuvoso	15,0	0,720	0,453	9,256	20,437	16,445	1,243	0,00003
11/12/2018		15,0	0,729	0,460	9,142	19,870	16,500	1,204	0,00003
Média		14,2	0,8	0,3	5,8	14,9	15,7	0,9	0,00003

L: largura; d: profundidade média; U: velocidade média da água; Q vazão; Am: Área molhada; Pm: Perímetro molhado; Rh: Raio hidráulico; S: declividade.

Tabela 9: Características hidráulicas e geométricas da estação 4.

Data	Período	Estação 4							
		L (m)	d (m)	U(m/s)	Q(m³/s)	A(m²)	P (m)	Rh (m)	S(m/m)
02/08/2017	Seco	15,0	0,317	0,426	2,164	5,075	16,002	0,317	0,00027
12/09/2017		15,0	0,230	0,409	1,506	3,680	15,531	0,237	0,00036
18/10/2017		16,0	0,235	0,384	1,535	4,000	16,459	0,243	0,00031
07/11/2017	Chuvoso	16,5	0,629	0,475	6,921	14,573	17,758	0,821	0,00010
12/12/2017		18,0	1,083	0,711	16,111	22,654	21,166	1,070	0,00016
23/01/2018		17,0	0,987	0,508	8,655	17,026	17,964	0,948	0,00009
27/02/2018		18,5	0,996	0,561	10,905	19,425	20,492	0,948	0,00007
20/03/2018		18,0	0,853	0,490	6,948	14,183	19,705	0,720	0,00008
22/05/2018	Seco	18,5	0,772	0,455	5,174	11,382	20,044	0,568	0,00009
17/07/2018		16,5	0,589	0,453	3,248	7,169	17,520	0,409	0,00012
04/09/2018		16,5	0,559	0,429	2,543	5,928	17,386	0,341	0,00025
16/10/2018		-	-	-	-	-	-	-	-
20/11/2018	Chuvoso	18,5	0,984	0,572	10,030	17,535	19,993	0,877	0,00012
11/12/2018		18,5	0,993	0,601	11,096	18,463	20,091	0,919	0,00013
Média		17,1	0,7	0,5	6,7	12,4	18,5	0,6	0,00017

L: largura; d: profundidade média; U: velocidade média da água; Q vazão; Am: Área molhada; Pm: Perímetro molhado; Rh: Raio hidráulico; S: declividade.

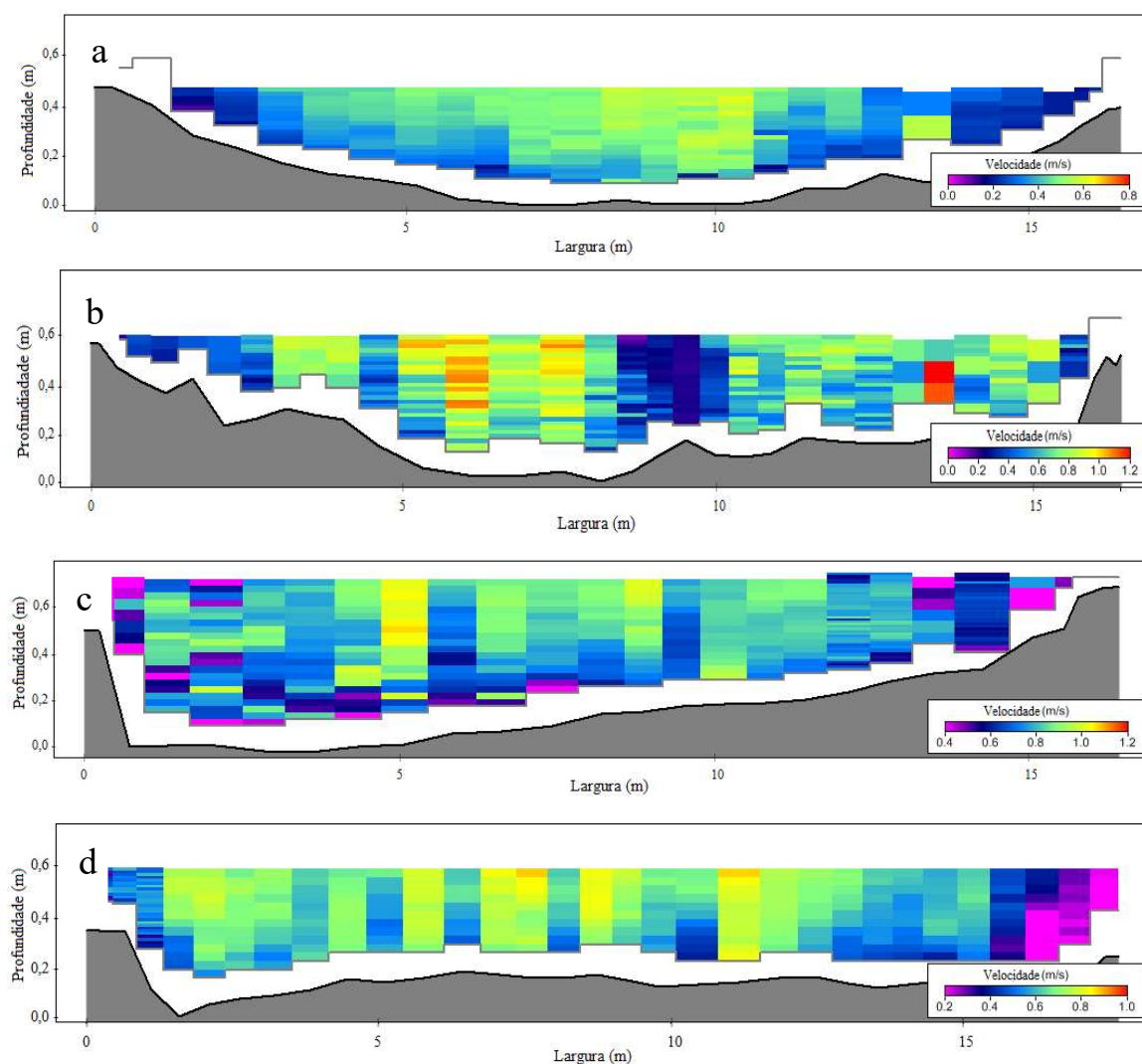
Analisando todas as Tabelas de dados hidráulicos e geométricos fica evidente a grande variação das características de cada seção estudada. Em todas as estações o período de amostragem teve interferência significativa nos resultados obtidos. Os valores de vazão no rio aumentaram significativamente na época de precipitações acentuadas, o que já era esperado. No período seco as vazões determinadas nas diferentes estações ficaram na faixa de 0,39 a 5,17 m³/s, já nos meses chuvosos a vazões foram de 2,16 a 16,11 m³/s. Além da vazão, os dados de largura, profundidade, raio hidráulico, declividade e velocidade foram utilizados para o cálculo da descarga de sedimento.

Com relação à profundidade média, os menores valores foram identificados na seção 1, com valor médio de 0,4 m. Os maiores valores de profundidade foram obtidos na seção 3, com média igual a 0,8 m. No período chuvoso as profundidades foram significativamente maiores, principalmente na estação 4, que houve uma variação de até 70 cm.

Os maiores valores de velocidade média de escoamento foram obtidos nas seções 2 e 4, com valor médio de 0,5 m/s. A seção 3 apresentou as menores velocidades de escoamento com média de 0,3 m/s. No período chuvoso as velocidades aumentaram em todas as estações, porém a seção 2 foi a que apresentou diferença mais significativa.

Com relação à declividade, a estação 3 apresentou os menores valores com média de 0,00003 m/m. Já os maiores valores ficaram com a seção 2. Esse parâmetro é muito importante, pois influencia diretamente o transporte de sedimentos no rio e aparece em diversos métodos de estimativa de descarga sólida. Na sequência, o perfil transversal obtido pelo ADCP de cada seção estudada está representado na Figura 27.

Figura 27: Perfil e módulo da velocidade de escoamento da água nas estações em janeiro de 2018: a) Estação 1; b) Estação 2; c) Estação 3; d) Estação 4.

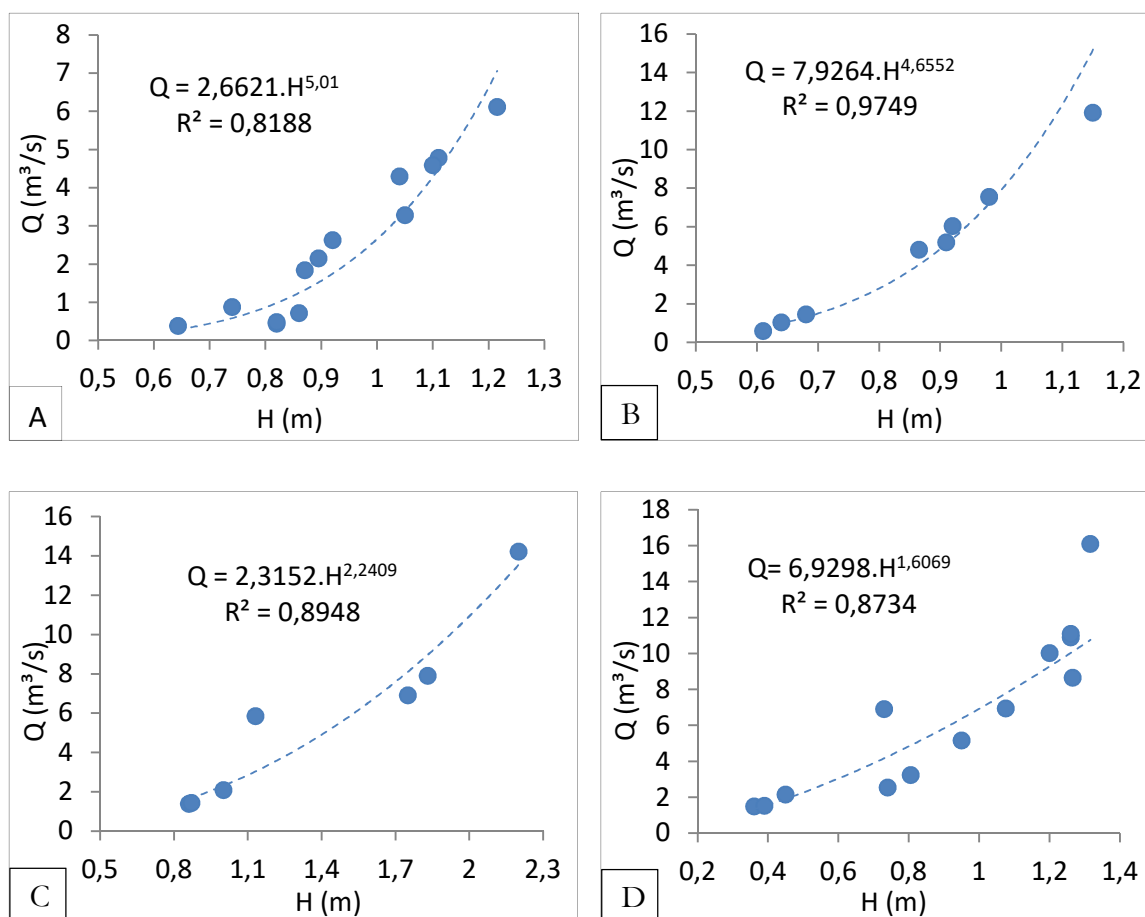


Fonte: Autor

O perfil transversal de cada estação apresentou essas características na maioria das coletas realizadas, porém apesar de não ilustrado na Figura 27, vale ressaltar que as estações 3 e 4 obtiveram maiores variações do perfil de fundo ao longo das coletas.

A partir dos dados de vazão e cota da régua nas seções, obtidos pelas coletas de campo ao longo do trabalho, foi possível construir as curvas-chave de melhor ajuste dos pontos experimentais, como ilustrado na Figura 28.

Figura 28: Curvas-chave das estações obtidas entre cota da régua e vazão: A) seção 1; B) Seção 2; C) Seção 3; D) Seção 4.

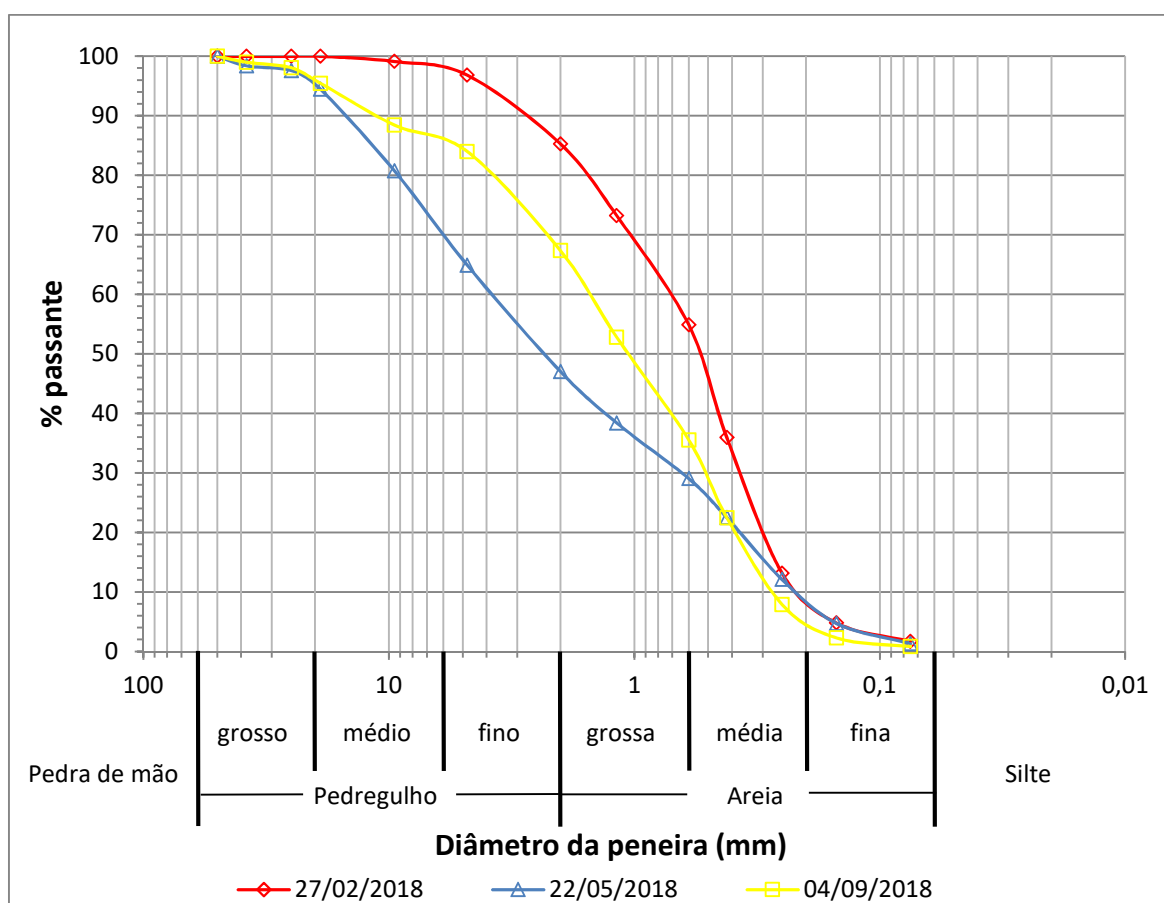


As curvas-chave das estações determinadas a partir dos dados experimentais apresentaram bons ajustes, podendo representar de maneira significativa a realidade. A estação 1 foi a que apresentou a pior correlação entre as estações, com coeficiente de determinação de 0,8188. Os dados que apresentaram melhor correlação foram da estação 2, com R^2 de 0,9749. Alguns autores também obtiveram bons ajustes de dados em diferentes cursos hídricos estudados.

4.2 CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS SEDIMENTOS

As análises granulométricas foram realizadas para cada seção de amostragem do rio, desta forma foi construído um gráfico para cada estação a partir das curvas granulométricas obtidas pelas análises de peneiramento de cada amostra coletada. A caracterização da granulometria dos sedimentos de leito foi essencial, pois os diferentes métodos de estimativa de descarga sólida utilizam esses dados no equacionamento, além disso, o entendimento da distribuição granulométrica das partículas é importante para o entendimento do transporte de sedimentos e da movimentação do leito. Na Figura 29 é apresentada as curvas granulométricas da estação 1.

Figura 29: Curvas granulométricas do material de leito da Estação 1.



Analisando as curvas granulométricas da seção 1, fica evidente que as partículas de leito são compostas por areia e pedregulho. Os sedimentos coletados no mês de fevereiro de 2018, no período chuvoso, apresentaram aproximadamente 85% de areia e 15% de pedregulho na sua

composição. As curvas granulométricas do mês de maio e setembro, período de estiagem, apresentaram um aumento na quantidade de pedregulho quando comparado à curva do mês de fevereiro. Somente a curva granulométrica do mês de maio apresentou mais pedregulho do que areia na composição da amostra de sedimentos, com cerca de 52% de pedregulho. A maior quantidade de partículas finas nas amostras em épocas de maiores precipitações pode estar relacionada com o aumento dos processos erosivos e consequentemente carregamento de sedimentos para o corpo hídrico.

Os diâmetros característicos do material de leito da seção 1 obtidos nas curvas granulométricas estão apresentados na Tabela 10.

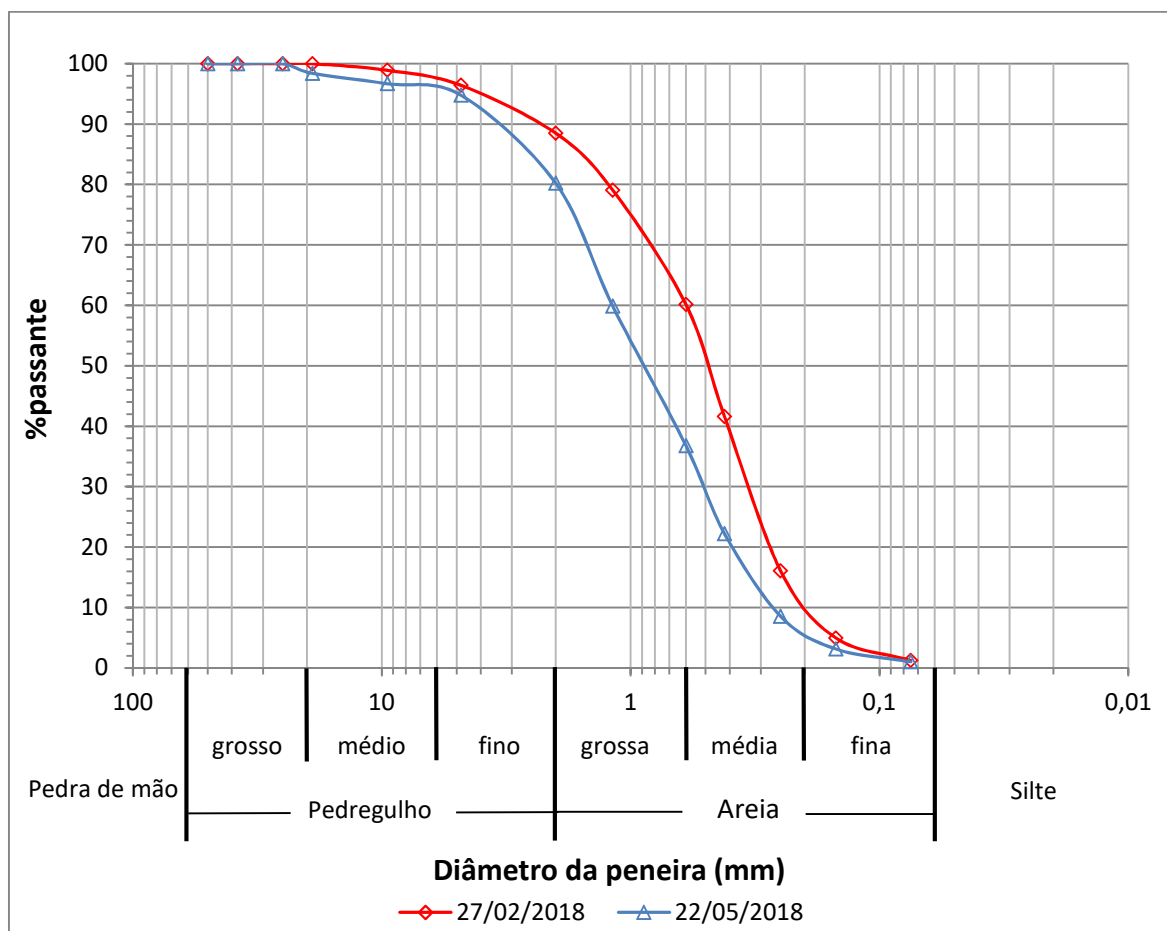
Tabela 10: Diâmetros característicos do material do leito da seção 1 do rio Jordão.

Data	Estação 1		
	27/02/2018	22/05/2018	04/09/2018
D ₉₀ (mm)	2,8	10,5	3,8
D ₆₅ (mm)	0,85	4,9	1,6
D ₅₀ (mm)	0,53	2,4	1,1
D ₃₅ (mm)	0,4	0,95	0,6

D₉₀ - Diâmetro do grão para o qual 90% do material do leito são mais finos; D₆₅ - Diâmetro do grão para o qual 65% do material do leito são mais finos; D₅₀ - Diâmetro do grão para o qual 50% do material do leito são mais finos; D₃₅ - Diâmetro do grão para o qual 35% do material do leito são mais finos.

As curvas granulométricas da seção 2 estão ilustradas na Figura 30. Nessa estação foram realizadas somente duas análises de granulometria, pois na terceira análise realizada no mês de setembro, as coletas na seção haviam sido encerradas.

Figura 30: Curvas granulométricas do material de leito da Estação 2.



Na seção 2 o sedimento de leito é composto por pedregulho e areia, como ilustrado na Figura 30. As duas curvas granulométricas, geradas nos meses de fevereiro e maio, apresentam tendência semelhante. No mês de fevereiro, período de maiores precipitações, os sedimentos de fundo analisados apresentam mais de 85% de areia e uma pequena parte de pedregulho. Já no mês de maio, a quantidade de pedregulho aumentou, mas os sedimentos ainda apresentam 80% de areia e 20% de pedregulho na sua composição.

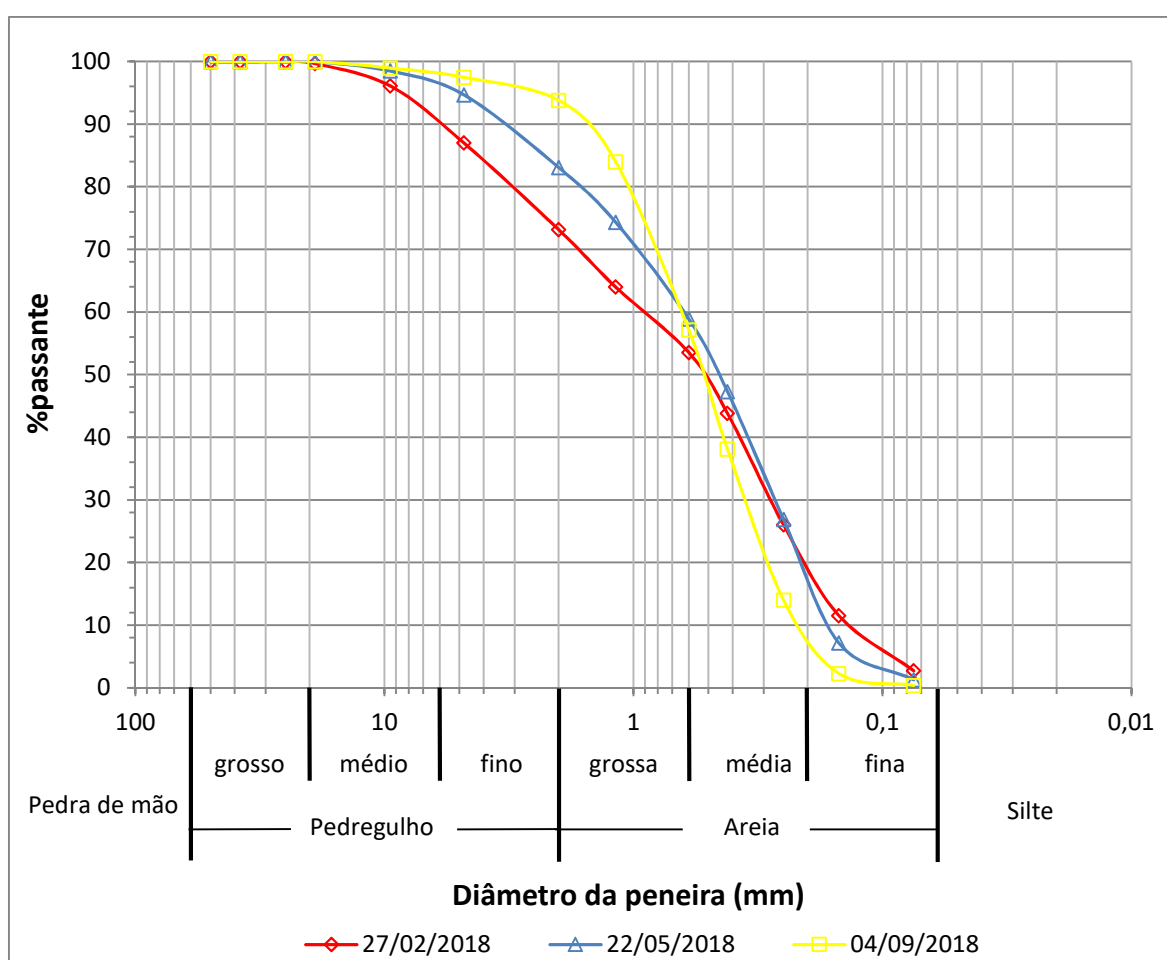
Os diâmetros característicos do material de leito da seção 2, obtidos nas curvas granulométricas, estão apresentados na Tabela 11. E na Figura 31 é ilustrada a curva granulométrica dos sedimentos de leito da estação 3.

Tabela 11: Diâmetros característicos do material de leito da seção 2 do rio Jordão.

Data	Estação 2	
	27/02/2018	22/05/2018
D ₉₀ (mm)	2,4	3,4
D ₆₅ (mm)	0,7	1,4
D ₅₀ (mm)	0,5	0,9
D ₃₅ (mm)	0,38	0,58

D₉₀ - Diâmetro do grão para o qual 90% do material do leito são mais finos; D₆₅ - Diâmetro do grão para o qual 65% do material do leito são mais finos; D₅₀ - Diâmetro do grão para o qual 50% do material do leito são mais finos; D₃₅ - Diâmetro do grão para o qual 35% do material do leito são mais finos.

Figura 31: Curvas granulométricas do material de leito da Estação 3.



O material de leito da seção 3 também é composto por partículas de areia e pedregulho. As amostragens realizadas no mês de fevereiro mostraram que aproximadamente 74% do material era composto por areia. Nos meses seguintes, período seco, ocorreu aumento na porcentagem de areia e consequentemente diminuição na porcentagem de pedregulho. No mês de maio a porcentagem de areia na amostra foi de aproximadamente 83% e no mês de setembro essa porcentagem aumentou para mais de 90%. O aumento da quantidade de areia

na composição do leito em épocas de menores precipitações, principalmente entre os meses de maio e setembro, pode estar relacionado ao depósito de partículas menores devido à diminuição da velocidade do escoamento e também da baixa declividade local.

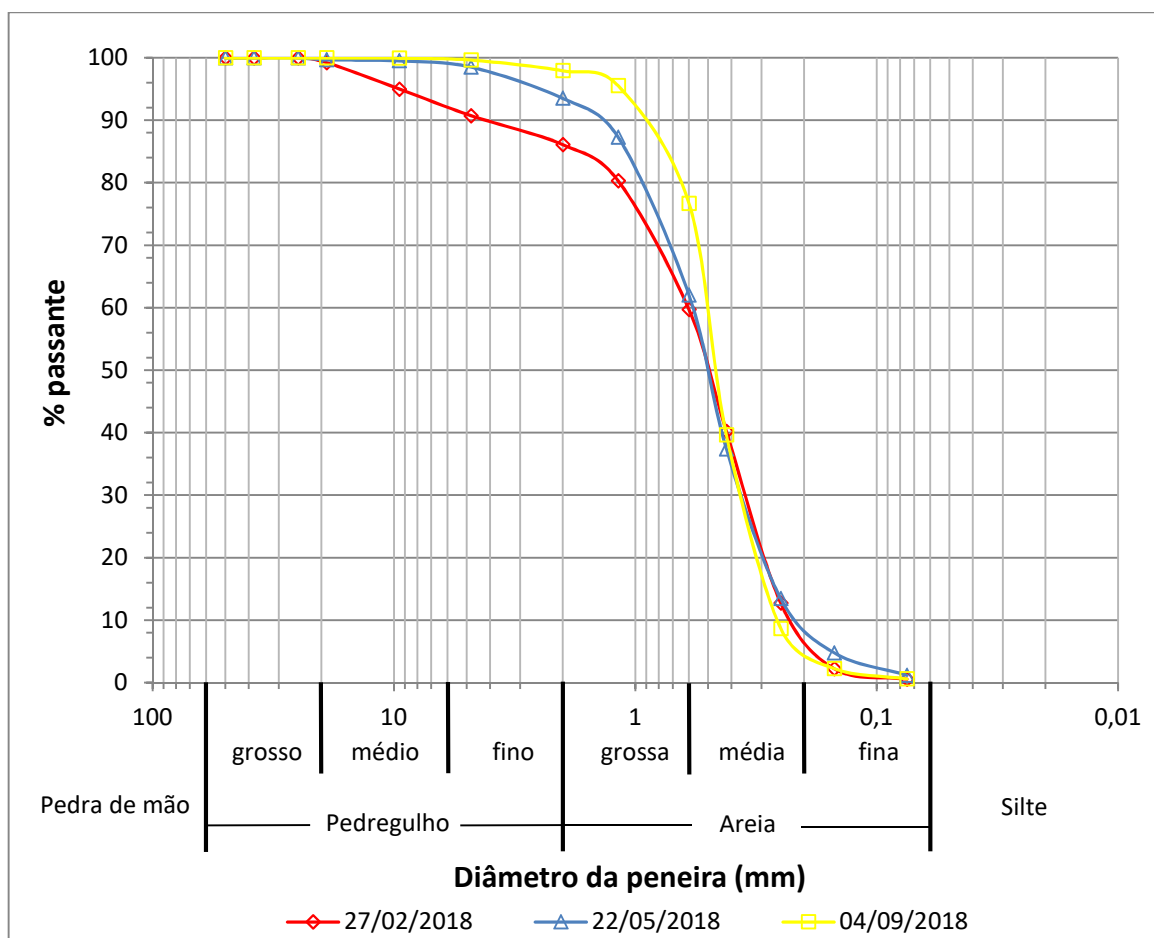
Os diâmetros característicos do material de leito da seção 3, obtidos nas curvas granulométricas, estão apresentados na Tabela 12. Para a estação 4, a curva granulométrica do material de leito é exposta na Figura 32.

Tabela 12: Diâmetros característicos do material de leito da seção 3 do rio Jordão.

Data	Estação 3		
	27/02/2018	22/05/2018	04/09/2018
D ₉₀ (mm)	6,0	3,3	1,55
D ₆₅ (mm)	1,4	0,8	0,71
D ₅₀ (mm)	0,51	0,46	0,52
D ₃₅ (mm)	0,33	0,31	0,4

D₉₀ - Diâmetro do grão para o qual 90% do material do leito são mais finos; D₆₅ - Diâmetro do grão para o qual 65% do material do leito são mais finos; D₅₀ - Diâmetro do grão para o qual 50% do material do leito são mais finos; D₃₅ - Diâmetro do grão para o qual 35% do material do leito são mais finos.

Figura 32: Curva granulométrica do material de leito da Estação 4.



Semelhante a todas as seções, o material de leito da seção 4 é composto por areia e pedregulho. As amostras de sedimentos coletadas no mês de fevereiro de 2018, período chuvoso, apresentaram aproximadamente 86% de areia e 14% de pedregulho. Como ocorreu na seção 3, a porcentagem de areia nos meses seguintes aumentou. No mês de maio os sedimentos de fundo apresentaram 94% de areia e 6% de pedregulho na sua composição. No mês de setembro a quantidade de areia passou para 98% e apenas 2% de pedregulho. Essa seção é caracterizada pelo acúmulo de sedimentos no fundo, talvez devido a sua proximidade com a foz no Rio Paranaíba, e assim em boa parte do ano estar sob influência do remanso formado devido aos níveis elevados de água do rio que dá nome a esta unidade de planejamento. Ressalta-se que esta seção foi mantida devido à boa correlação encontrada em sua curva-chave.

Os diâmetros característicos do material de leito da seção 4 obtidos nas curvas granulométricas estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Diâmetros característicos do material de leito da seção 4 do rio Jordão.

Estação 4			
Data	27/02/2018	22/05/2018	4/9/2018
D ₉₀ (mm)	4,2	1,4	0,9
D ₆₅ (mm)	0,7	0,65	0,51
D ₅₀ (mm)	0,5	0,5	0,48
D ₃₅ (mm)	0,39	0,41	0,4

D₉₀ - Diâmetro do grão para o qual 90% do material do leito são mais finos; D₆₅ - Diâmetro do grão para o qual 65% do material do leito são mais finos; D₅₀ - Diâmetro do grão para o qual 50% do material do leito são mais finos; D₃₅ - Diâmetro do grão para o qual 35% do material do leito são mais finos.

Quando comparado todos os gráficos das estações e as Tabelas dos diâmetros característicos, fica evidente que existe uma tendência de diminuição no tamanho das partículas do material de leito nas seções a jusante do rio. Isso deve ocorrer devido ao transporte das partículas finas do alto curso para o baixo curso do rio. Christofolletti (1981) e Brigante e Espíndola (2003) também confirmaram tal fato nos trabalhos realizados.

De acordo Brigante e Espíndola (2003), a turbulência provocada pelo fluxo de água no alto curso dos rios tem velocidade capaz de suspender as frações mais finas do sedimento, transportando-as ao longo do curso do rio em direção a foz. Assim, a tendência é que os locais mais próximos à foz do rio apresentam sedimentos de fundo com partículas menores do que os locais a montante. Esse fato é evidenciado no Rio Jordão, pois quando comparado

a estação 1, mais a montante, e a estação 4, próxima a foz, fica claro que o material de fundo da seção 4 é composto por partículas mais finas.

Na Figura 60 do apêndice A, encontram-se as curvas granulométricas do material em suspensão coletado nas seções de amostragem do Rio Jordão, obtidos a partir do ensaio de pipetagem.

4.3 DESCARGA DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO E TOTAL

Os resultados de concentração de sedimento em suspensão (Css), descarga de sedimento em suspensão (Qss), descarga de sedimento não medida (Qnm) e descarga de sedimento total (Qst), são apresentados nas Tabelas 14 e 15. A descarga sólida em suspensão foi determinada a partir da equação 8 e a Qnm e Qst foram estimadas a partir do método de Colby (1957). Na Tabela 14, estão os resultados das estações um e dois.

Tabela 14: Resultados da concentração de sedimentos, descarga sólida em suspensão e descarga sólida estimada pelo método de Coby (1957) nas estações 1 e 2.

Data	Período	Estação 1					Estação 2				
		Css (mg/L)	Q (m³/s)	Qss (T/d)	Qnm (T/d)	Qst (T/d)	Css (mg/L)	Q (m³/s)	Qss (T/d)	Qnm (T/d)	Qst (T/d)
02/08/2017	Seco	10,67	0,725	0,668	1,595	2,263	6,89	1,461	0,870	0,947	1,816
12/09/2017		32,44	0,450	1,261	1,748	3,009	37,78	1,053	3,437	1,009	4,446
18/10/2017		18,67	0,491	0,792	1,218	2,010	23,11	0,600	1,198	1,091	2,289
07/11/2017	Chuvoso	87,33	3,289	24,817	26,987	51,805	102,67	5,204	46,162	73,373	119,535
12/12/2017		113,00	6,118	59,731	67,815	127,546	92,22	11,927	95,034	192,907	287,941
23/01/2018		105,56	2,637	24,049	21,474	45,524	73,33	6,046	38,307	78,697	117,005
27/02/2018		73,00	4,300	27,121	31,845	58,966	87,26	7,560	56,995	109,805	166,800
20/03/2018		63,11	2,159	11,772	13,669	25,442	102,67	4,814	42,703	63,162	105,866
22/05/2018	Seco	35,00	1,850	5,594	9,181	14,776	-	-	-	-	-
17/07/2018		21,60	0,879	1,640	3,072	4,713	-	-	-	-	-
04/09/2018		7,83	0,392	0,265	0,627	0,893	-	-	-	-	-
16/10/2018		8,47	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20/11/2018	Chuvoso	23,13	4,786	9,566	22,728	32,295	-	-	-	-	-
11/12/2018		53,25	4,598	21,154	34,332	55,486	-	-	-	-	-
máximo		113,00	6,12	59,73	67,82	127,55	102,67	11,93	95,03	192,91	287,94
mínimo		7,83	0,39	0,27	0,63	0,89	6,89	0,60	0,87	0,95	1,82
Média		46,65	2,51	14,49	18,18	32,67	65,74	4,83	35,59	65,12	100,71
Desvio padrão		36,26	1,95	17,03	19,35	36,12	37,82	3,83	32,91	66,45	99,14

Css: Concentração de sedimentos em suspensão; Q: vazão; Qss: descarga em suspensão medida; Qnm: descarga sólida não medida; Qst: descarga sólida total.

Na estação 1, os valores de Css foram de 10,67 a 113 mg/L, com valor médio de 46,65 mg/L e desvio padrão de 36,26 mg/L. Na mesma seção, os valores de vazões (Q) foram de 0,45

a 6,12 m³/s, e média de 2,45 m³/s. Na estação 2, a concentração de sedimentos em suspensão teve valor médio de 65,74 mg/L, com mínimo de 6,89 e máximo de 102,67 mg/L, sendo o desvio padrão de 37,82 mg/L, para vazão média de 4,83 m³/s. O desvio padrão de C_{ss} nas duas estações foram semelhantes, porém os valores médios de C_{ss} e Q foram maiores na seção 2. Os dados das descargas de sedimentos e descargas líquidas serão utilizados para a construção das curvas-chaves. Os resultados das estações três e quatro estão exibidos na tabela 15.

Tabela 15: Resultados da concentração de sedimentos, descarga sólida em suspensão e descarga sólida estimada pelo método de Coby (1957) nas estações 3 e 4.

Data	Período	Estação 3					Estação 4				
		C _{ss} (mg/L)	Q (m ³ /s)	Q _{ss} (T/d)	Q _{nm} (T/d)	Q _{st} (T/d)	C _{ss} (mg/L)	Q (m ³ /s)	Q _{ss} (T/d)	Q _{nm} (T/d)	Q _{st} (T/d)
02/08/2017	Seco	10,68	2,100	1,935	2,474	4,409	11,33	2,164	2,119	7,123	9,242
12/09/2017		46,49	1,400	5,623	2,402	8,025	47,67	1,506	6,204	12,655	18,858
18/10/2017		40,33	1,450	5,053	2,180	7,233	19,33	1,535	2,564	7,461	10,025
07/11/2017	Chuvoso	151,56	5,858	76,707	17,931	94,638	132,44	6,921	79,198	42,152	121,350
12/12/2017		206,33	14,223	253,556	89,019	342,576	104,33	16,111	145,231	130,574	275,805
23/01/2018		111,67	7,913	76,345	26,678	103,022	141,33	8,655	105,682	62,165	167,847
27/02/2018		120,24	8,663	90,000	25,833	115,834	115,29	10,905	108,625	82,745	191,370
20/03/2018	Seco	83,56	6,918	49,945	18,102	68,047	125,78	6,948	75,507	58,280	133,787
22/05/2018		139,56	4,778	57,613	17,147	74,760	126,67	5,174	56,626	45,235	101,861
17/07/2018		30,41	2,561	6,729	6,035	12,764	22,61	3,248	6,346	16,220	22,566
04/09/2018		46,75	1,834	7,408	4,212	11,620	45,38	2,543	9,971	19,674	29,645
16/10/2018	Chuvoso	56,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20/11/2018		60,50	9,256	48,382	24,640	73,022	81,11	10,030	70,290	69,608	139,898
11/12/2018		81,04	9,142	64,012	29,433	93,445	91,43	11,096	87,651	83,226	170,876
máximo		206,33	14,22	253,56	89,02	342,58	141,33	16,11	145,23	130,57	275,81
mínimo		10,68	1,40	1,94	2,18	4,41	11,33	1,51	2,12	7,12	9,24
Média		86,86	5,85	57,18	20,47	77,65	81,90	6,68	58,15	49,01	107,16
Desvio Padrão		56,35	3,95	67,09	22,99	89,76	47,12	4,53	48,38	37,02	84,30

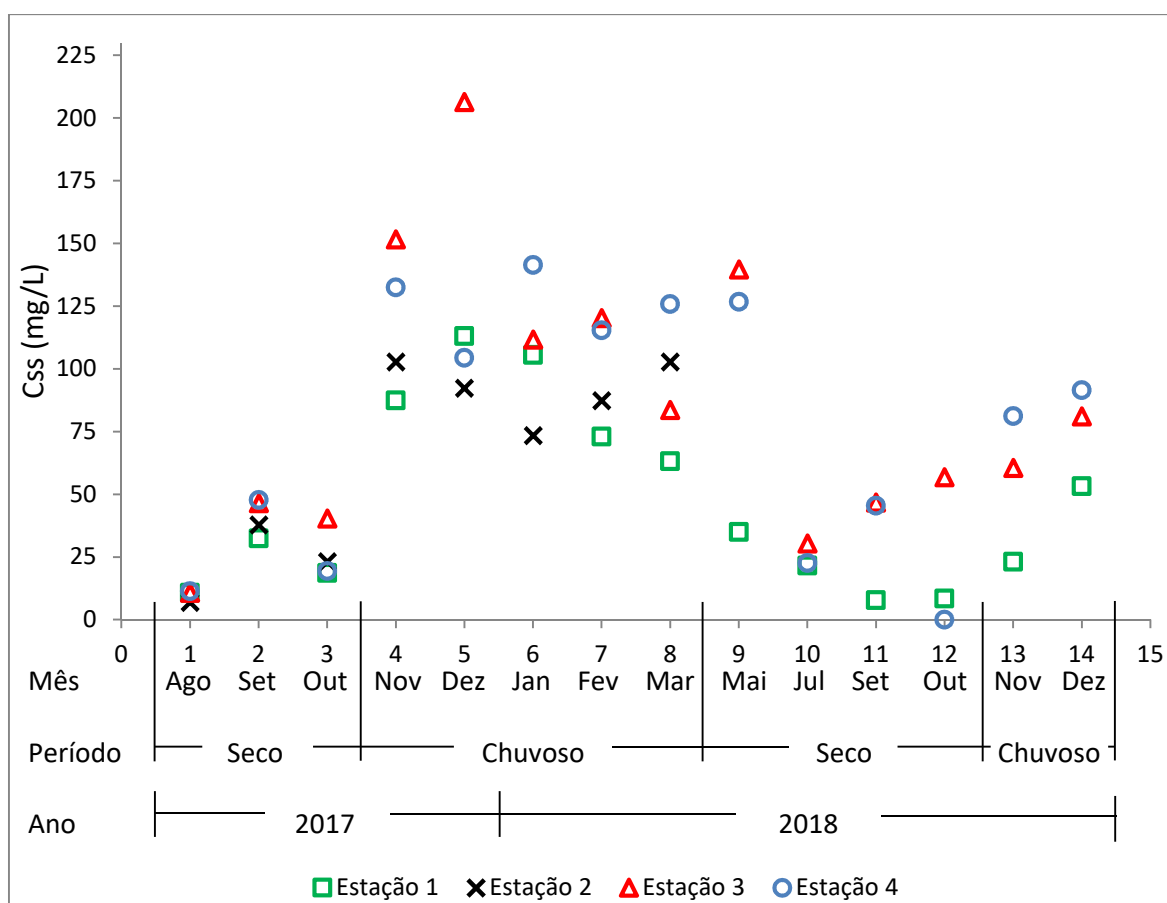
C_{ss}: Concentração de sedimentos em suspensão; Q: vazão; Q_{ss}: descarga em suspensão medida; Q_{nm}: descarga sólida não medida; Q_{st}: descarga sólida total.

A estação 3 apresentou os maiores valores de C_{ss}, com máximo de 206,33 mg/L e mínimo de 10,68 mg/L, sendo valor médio e desvio padrão de 86,86 e 56,35 mg/L respectivamente, para vazão média de 5,85 m³/s. Já a estação 4 apresentou maiores valores de vazões com média de 6,68 m³/s, como era esperado devido a presença de afluentes e a distância entre as duas seções. Nessa seção, a C_{ss} média foi de 81,90 mg/L, com valores na faixa de 11,33 a 141,33 mg/L.

Analisando todas as seções em conjunto, fica evidente que a concentração de sedimento aumenta no período chuvoso, conforme apresentado na Figura 33. O valor médio das quatro

estações é de aproximadamente 100 mg/L na época chuvosa, enquanto no período de estiagem a média não passou de 36 mg/L. O aumento da concentração em períodos de maiores precipitações também foi identificado por Silva Junior et al. (2011), Grove et al. (2015), Mohammad et al. (2016) e Garrido et al. (2018). Fatores como cobertura vegetal e aumento da velocidade de escoamento podem estar influenciando a maior concentração nas épocas de precipitações acentuadas. Os valores mais elevados de velocidade com consequente aumento da turbulência indicam processos de ressuspensão das partículas, afetando diretamente o aumento da concentração de sedimentos no corpo hídrico.

Figura 33: Concentração de sedimentos em suspensão nas estações nos diferentes períodos de amostragem.



A partir dos resultados de descarga de sedimentos em suspensão e total, apresentadas nas Tabelas 14 e 15, foi possível obter as curvas-chaves de sedimentos, mostrando a correlação entre da descarga sólida e líquida do Rio Jordão. As Figuras 34, 35, 36 e 37 apresentadas na sequência, representam as curvas-chaves de sedimentos suspensos e total, a equação e o Coeficiente de determinação (R^2) de cada estação considerada nesse estudo.

Figura 34: Curva-chave de sedimentos da Estação 1.

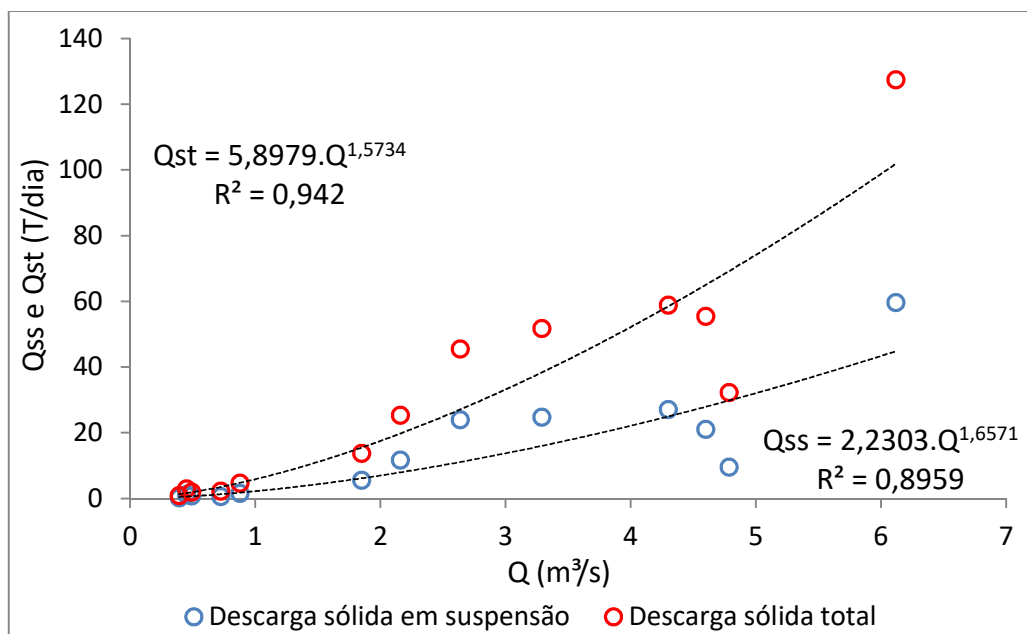


Figura 35: Curva-chave de sedimentos da Estação 2.

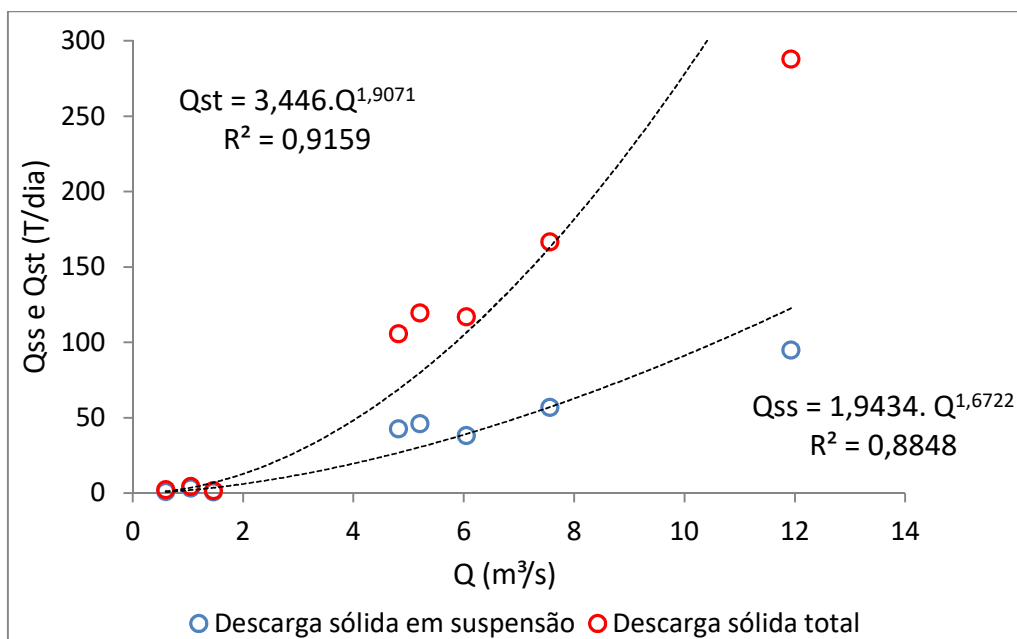


Figura 36: Curva-chave de sedimentos da Estação 3.

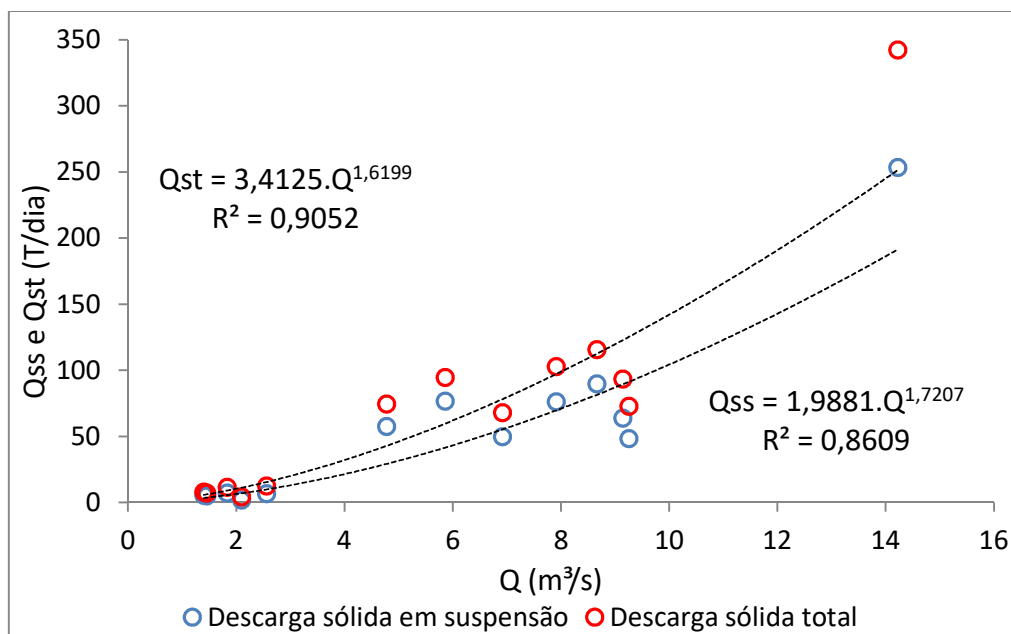
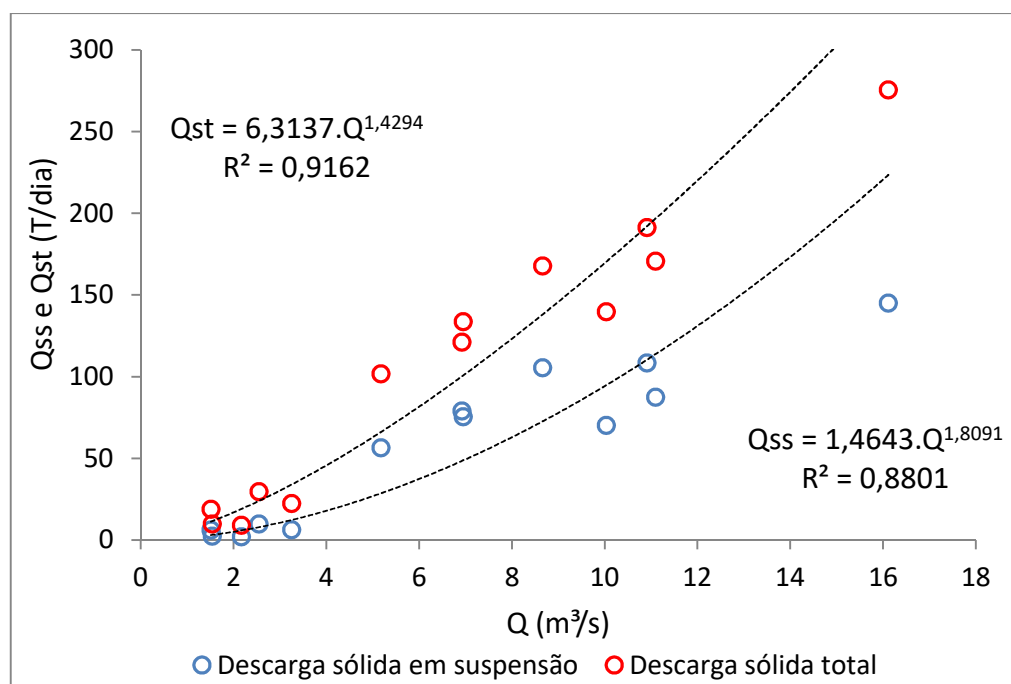


Figura 37: Curva-chave de sedimentos da Estação 4.



Todas as estações de amostragem apresentaram boas correlações com valores de coeficientes de determinação maiores que 0,86. As correlações entre a descarga de sedimento em suspensão (Qss) e descarga líquida (Q) obtiveram R^2 menores quando comparados aos valores obtidos da correlação entre a descarga de sedimento total (Qst) e (Q). Morais (2015),

Silva Junior et al. (2011), Garrido et al. (2018), também apresentaram bons ajustes das curvas-chave com valores de coeficientes de determinação próximos a 1.

Os dados de todas as estações foram unidos para avaliar a distribuição geral dos resultados de descarga de sedimentos em suspensão e total em função da vazão. Foi obtida uma distribuição bastante semelhante quando analisado cada estação separadamente. Assim, as curvas-chave das descargas sólida em suspensão e total do Rio Jordão foram ajustadas, conforme apresentado nas Figuras 38, 39, 40 e 41.

Figura 38: Relação entre a descarga sólida em suspensão e a vazão das quatro estações de amostragem do Rio Jordão.

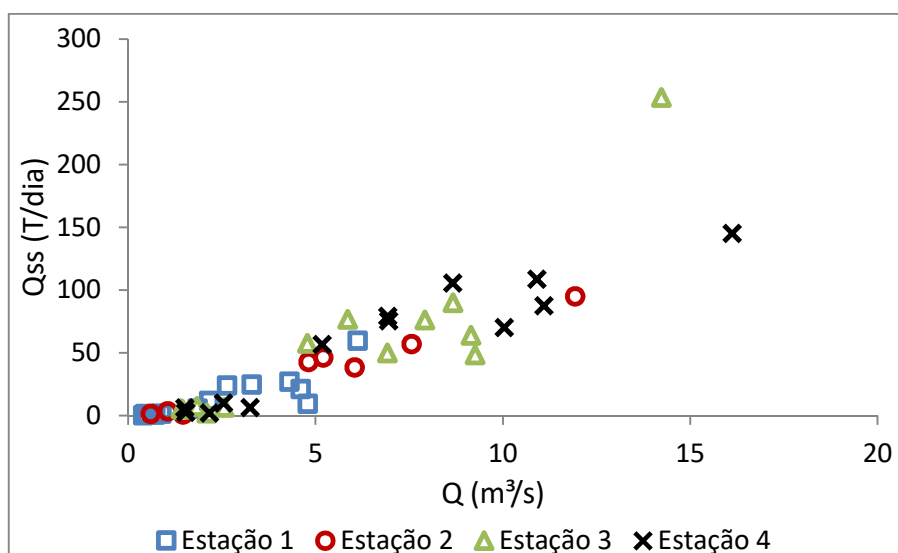


Figura 39: Curva-chave de sedimentos suspensos do Rio Jordão.

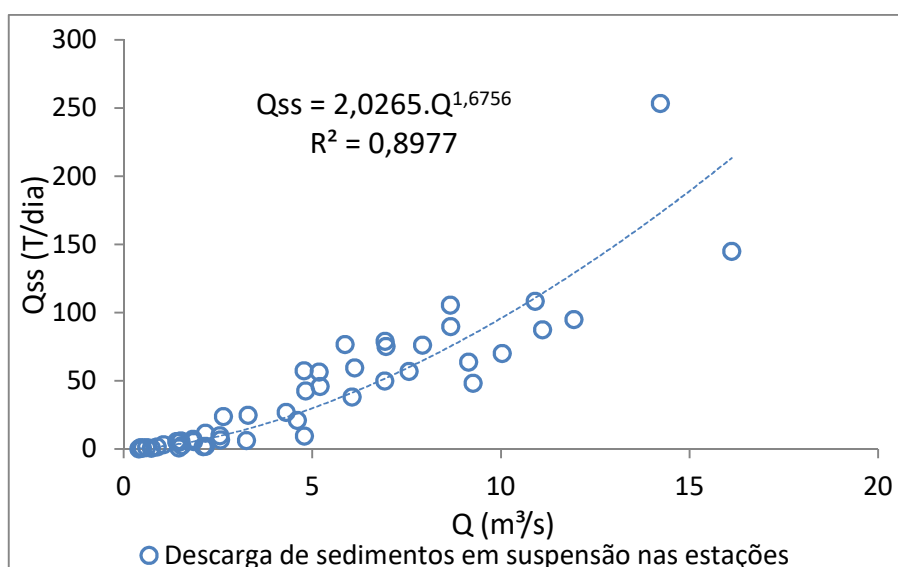


Figura 40: Relação entre a descarga sólida total e a vazão das quatro estações de amostragem do Rio Jordão.

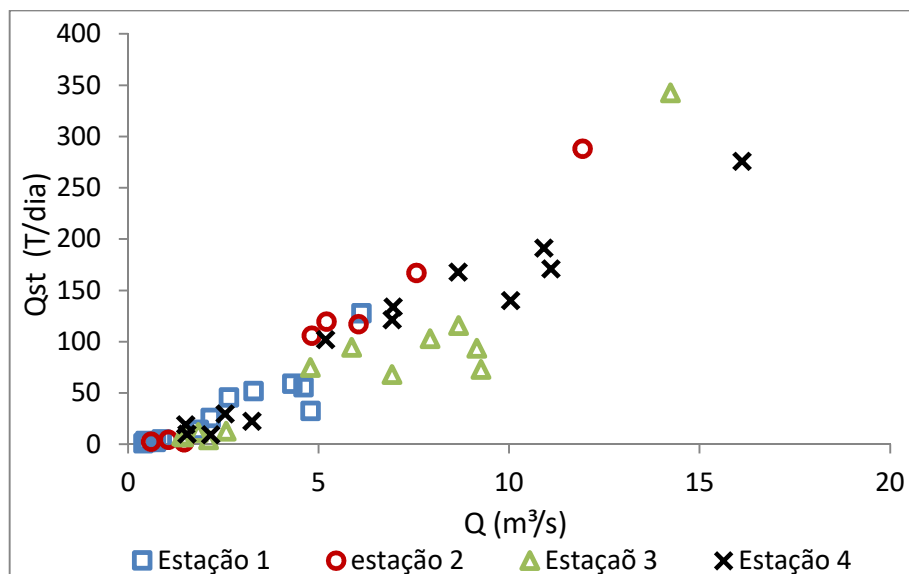
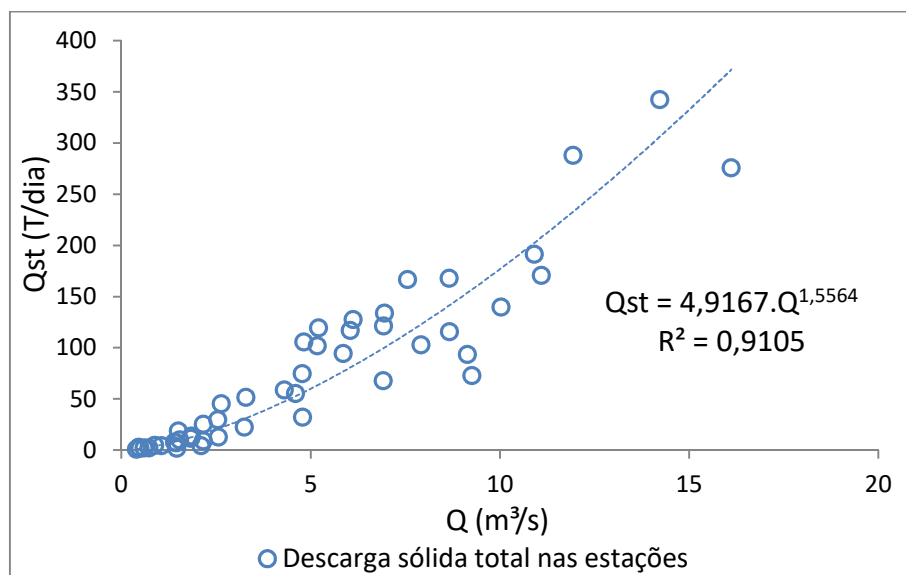


Figura 41: Curva-chave de sedimentos do Rio Jordão.



O ajuste da curva-chave de sedimentos em suspensão apresentou boa correlação com coeficiente de determinação de 0,8977 com parâmetros de ajuste iguais a 2,0265 e 1,6756. Outros autores alcançaram melhores coeficientes de determinação, como é o caso de Poletto et al. (2011), que obtiveram R^2 de 0,9882 no Rio São Francisco Falso no estado do Paraná. Já Nakato (1990) obteve coeficiente de determinação de 0,864 no rio Sacramento, na Califórnia. Para descarga sólida total o ajuste da curva-chave também apresentou boa correlação com coeficiente de determinação de 0,9105, um pouco melhor do que a curva de

sedimentos suspensos. Os parâmetros de ajuste foram iguais a 4,9167 e 1,5564. Garrido et al. (2018) em uma única seção do Rio Piranhas, plotaram curvas-chaves de descargas sólida total em período de estiagem e chuvoso, e obtiveram bons ajustes das curvas com coeficientes de determinação maiores que 0,81.

Outra correlação bastante conhecida e muito utilizada, que também pode ser denominada curva-chave de sedimentos, é aquela traçada usando a concentração de sedimentos suspensos em função da descarga líquida. Assim, a partir dos dados obtidos em campo e pelas análises em laboratório foi possível obter a correlação entre essas variáveis, como apresentado nas Figuras 42, 43, 44 e 45.

Figura 42: Correlação entre concentração de sedimentos e vazão na estação 1.

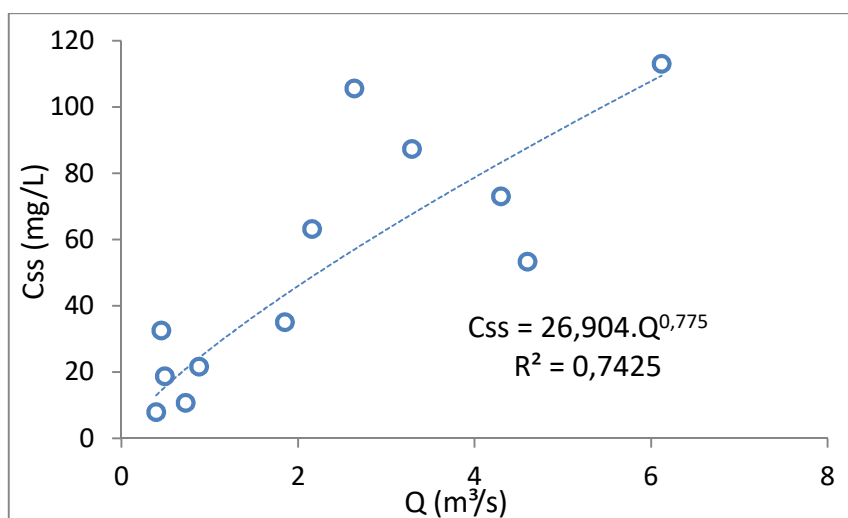


Figura 43: Correlação entre concentração de sedimentos e vazão na estação 2.

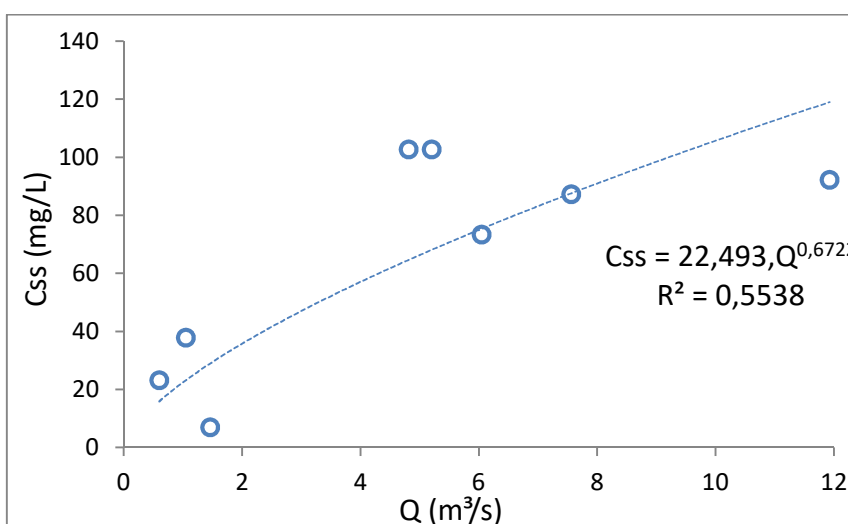


Figura 44: Correlação entre concentração de sedimentos e vazão na estação 3.

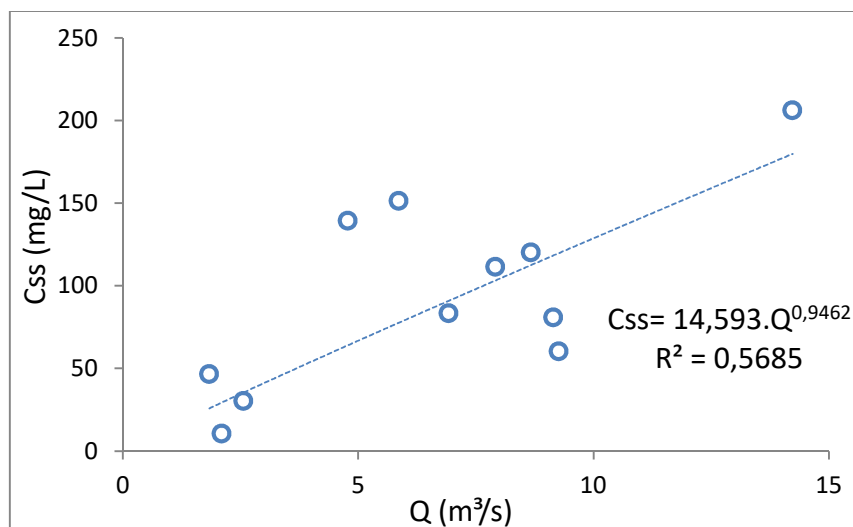
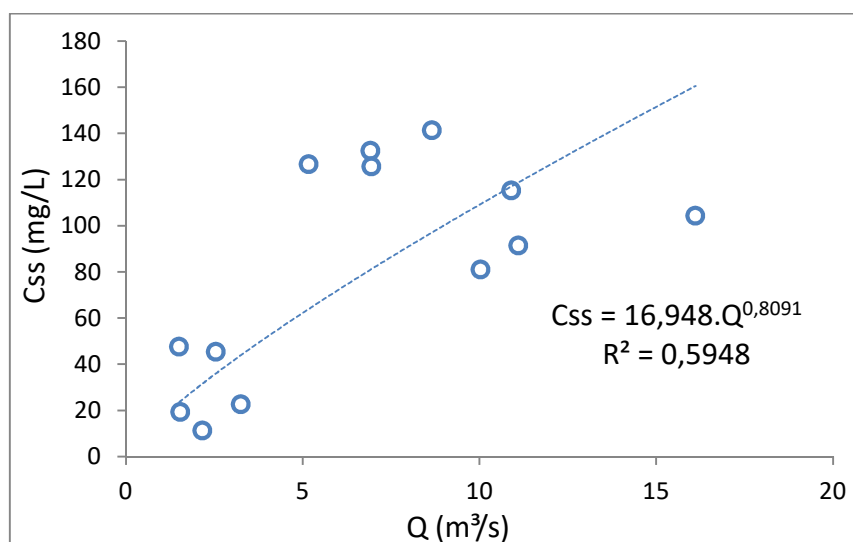


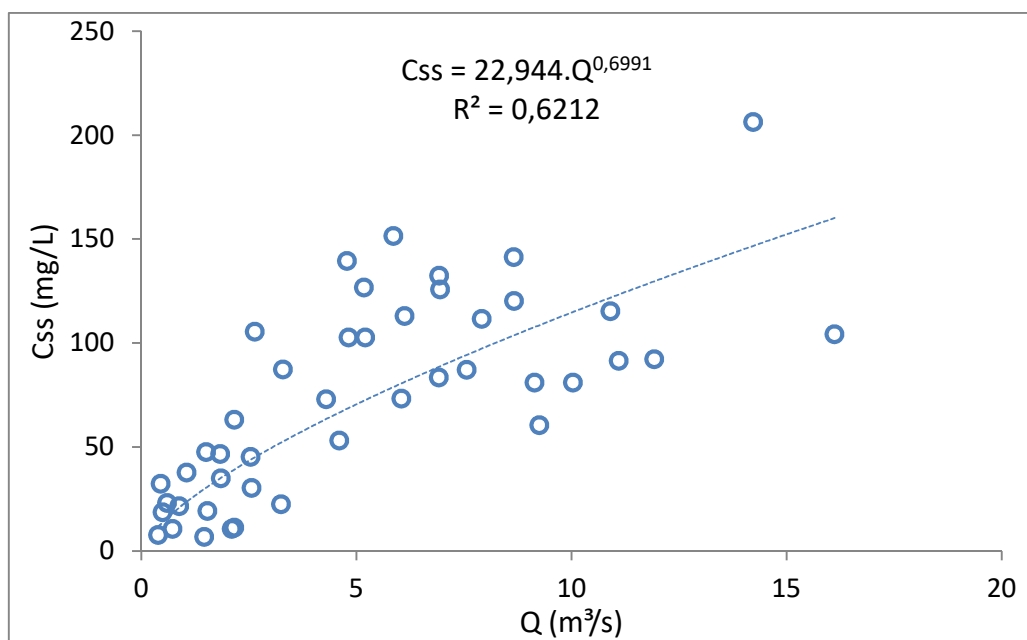
Figura 45: Correlação entre concentração de sedimentos e vazão na estação 4.



Os ajustes das curvas de concentração de cada estação apresentaram R^2 maiores do que 0,55. A melhor correlação entre dados de vazão e de concentração de sedimentos foi obtida na estação 1, com coeficiente de determinação igual a 0,7425, enquanto a pior correlação foi da seção 2, com R^2 de 0,5538. Comparando as curvas-chave de descarga de sedimentos e as de concentração, fica evidente que os dados de descarga de sedimentos em suspensão se ajustam melhor, produzindo equações capazes de explicar melhor os dados experimentais. Contudo, Carvalho (2008), afirma que quando se plota os dados de concentração, a dispersão dos valores é maior, nesse sentido, considerando o menor erro no resultado é conveniente traçar curvas para descarga sólida em suspensão.

Os dados de concentração em todas as seções foram unidos para avaliar a distribuição geral dos resultados. Foi obtida uma distribuição bastante semelhante quando analisado cada estação separadamente. Assim, as curvas-chave das concentrações de sedimentos do Rio Jordão foram ajustadas, conforme apresentado na Figura 46.

Figura 46: Correlação entre concentração de sedimentos e vazão do Rio Jordão.



O ajuste da curva de concentração de sedimentos em suspensão e vazão em todas as seções do rio apresentou coeficiente de determinação de 0,6212 com parâmetros de ajuste iguais a 22,944 e 0,6991. Outros autores obtiveram valores menores de determinação, como Scapin (2005), que obteve R^2 de 0,4817 em um pequeno rio na cidade de Santa Maria-RS.

Segundo Glysson (1987), diversos fatores podem influenciar o traçado das curvas-chave de sedimentos, sendo os principais derivados da variação sazonal, do tempo entre o pico de vazão e concentração ou descarga sólida e dos eventos extremos de enchentes. Em períodos de cheias extremas, a produção de sedimentos pode ser bastante elevada, afetando a curva-chave.

As curvas de descargas e concentração ao longo do tempo estão apresentadas nas Figuras 47, 48, 49 e 50.

Figura 47: Vazão, concentração e descarga sólida ao longo do tempo na estação 1.

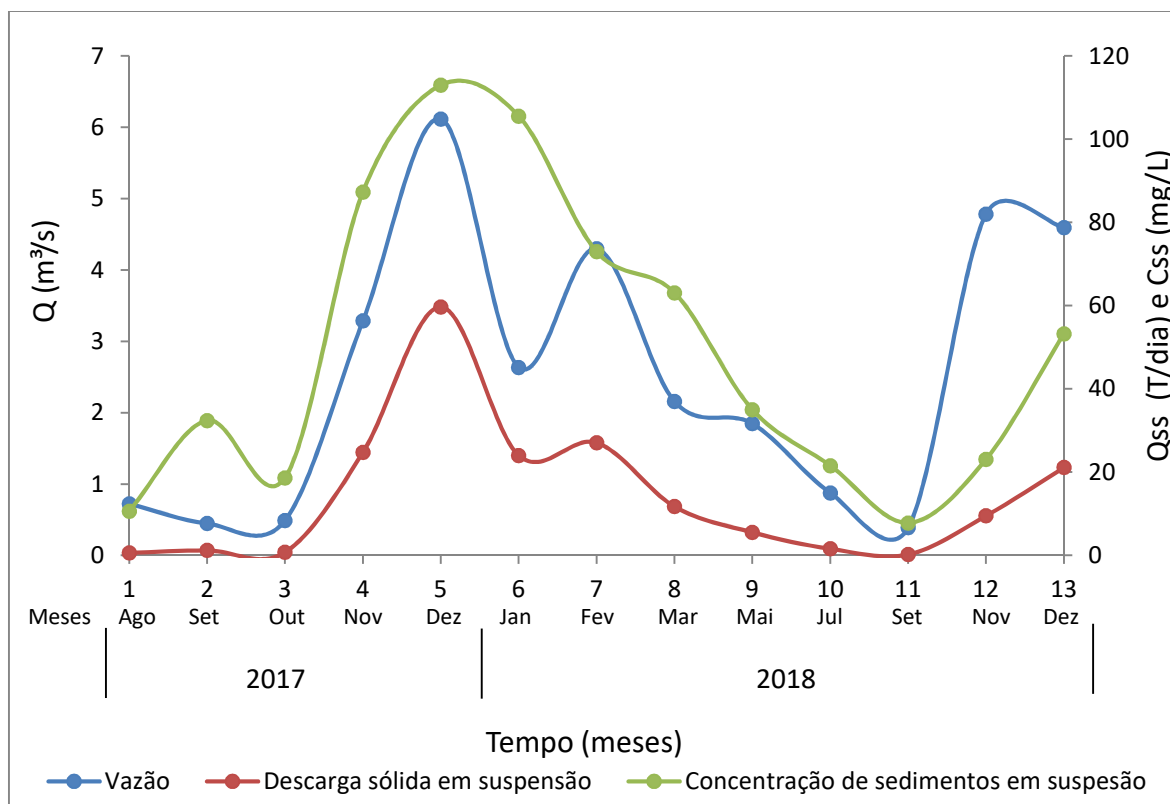


Figura 48: Vazão, concentração e descarga sólida ao longo do tempo na estação 2.

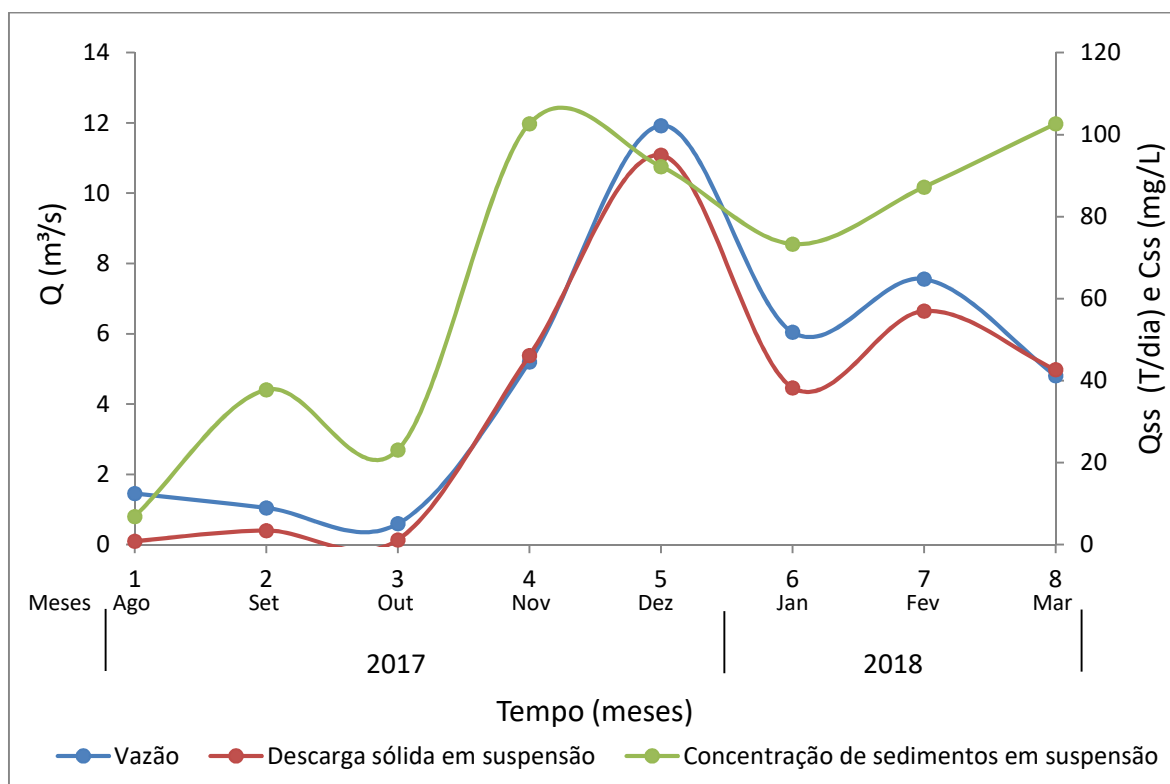


Figura 49: Vazão, concentração e descarga sólida ao longo do tempo na estação 3.

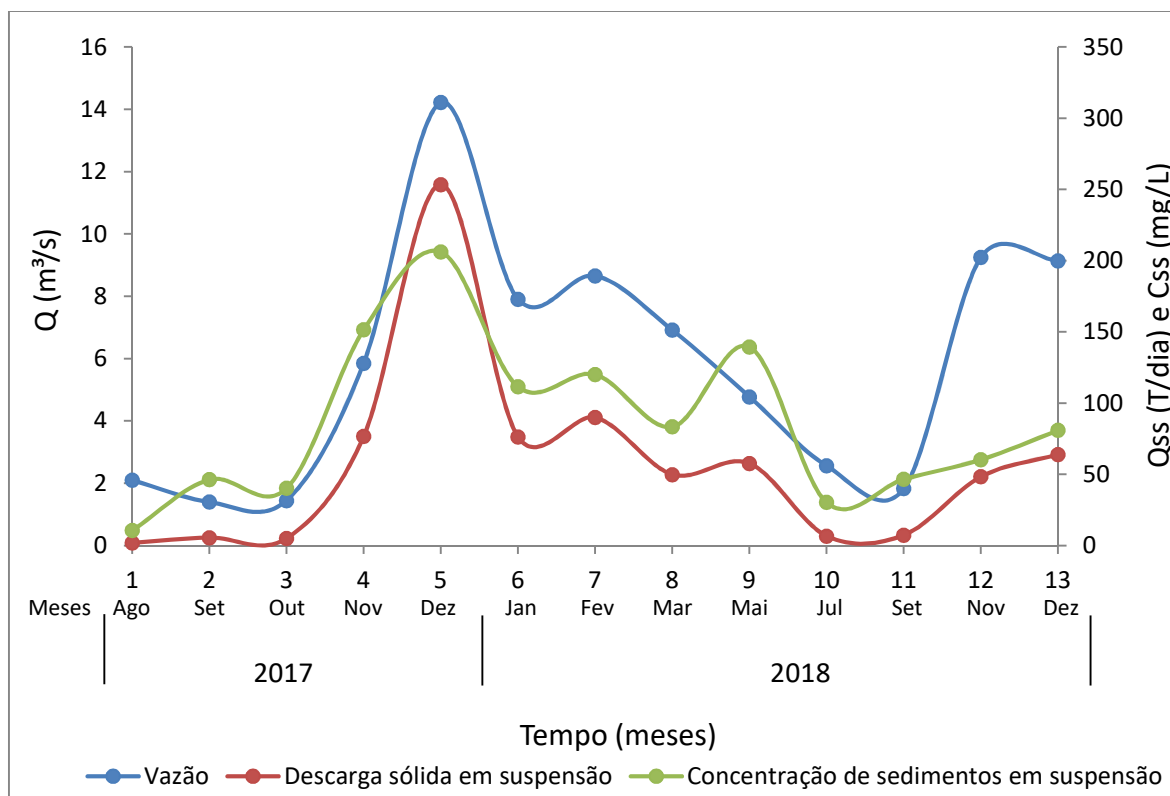
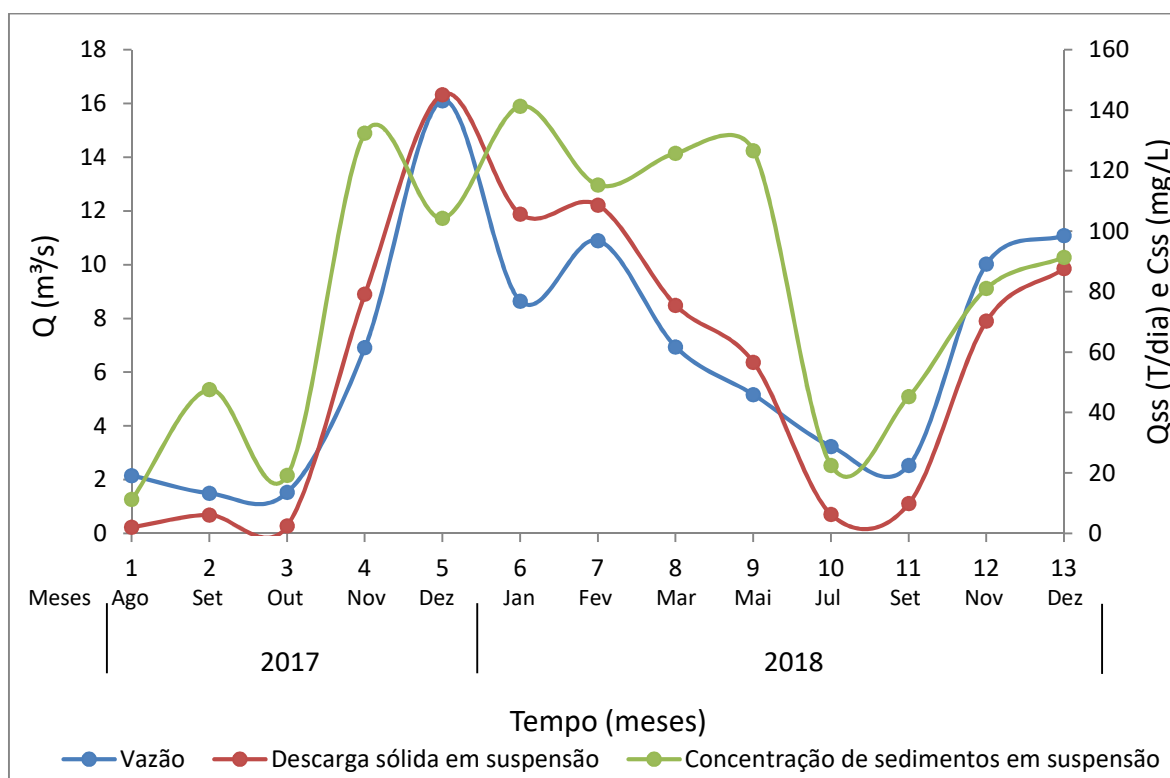


Figura 50: Vazão, concentração e descarga sólida ao longo do tempo na estação 4.



Analisando os gráficos de vazão, concentração e descarga de sedimentos ao longo do tempo, observa-se que os picos de maiores intensidades estão ocorrendo principalmente no período com precipitações mais altas, como é o caso do mês de dezembro. Nos meses de estiagem, como setembro, ocorre a diminuição acentuada de vazão, concentração e descarga sólida suspensa.

As linhas de vazão e descarga de sedimentos em suspensão são semelhantes em todas as estações e os picos dessas variáveis coincidem na maioria dos meses. Com relação a concentrações e vazão não evidencia a mesma característica, uma vez que existe grande variação entre as linhas, e os picos só coincidem em alguns meses. Na seção 4, por exemplo, a linha de concentração apresenta picos com grandes intensidades nos meses de novembro de 2017, janeiro e maio 2018, enquanto o pico de grande intensidade de vazão só aparece no mês de dezembro de 2017.

De acordo com Glysson (1987) e Carvalho (2008), o tempo entre o pico de concentração de sedimentos e o pico de vazão pode afetar drasticamente a curvas de sedimentos devido a grande dispersão dos pontos. Assim, como mostrado nos gráficos dos resultados, a variação nos tempos dos picos afetou diretamente o ajuste das curvas-chave, pois os picos em tempos semelhantes como o caso de vazão e descargas de sedimentos produziram curvas com coeficientes de determinação maiores do que as curvas de vazão e concentração que apresentaram picos em tempo diferentes, comprovando a afirmação dos autores.

4.4 DESCARGA DE SEDIMENTOS PELOS MÉTODOS PROPOSTOS

A estimativa de descarga de sedimentos pelos métodos propostos foi realizada com o auxílio de planilhas eletrônicas e do programa WinTSR, criado por Paiva, Beling e Rosa (2002). A interface do programa é ilustrada no anexo B. Os métodos empíricos utilizados foram selecionados a partir de uma análise sistemática das condições de aplicabilidade de cada equação e dos dados de granulometria, velocidade de escoamento e declividade obtidos pelos trabalhos de campo e laboratório. Assim, para estimar a descarga de sedimentos, foi selecionado o método de Meyer-Peter e Muller (1948) para descarga de arrasto, o de Ackers e White (1973) para descarga de material de leito e os métodos de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955) e de Colby (1957), para descarga sólida total.

Os resultados das estimativas de descarga de sedimentos na seção 1 do Rio Jordão estão expostos na Tabela 16.

Tabela 16: Descargas sólidas da estação 1 estimadas pelos métodos propostos.

Método		Meyer-Peter e Muller (1948)	Ackers e White (1973)	Colby (1957)	Einstein Modificado (1955)
Data	Período	QA (T/dia)	QML (T/dia)	Qst (T/dia)	Qst (T/dia)
02/08/2017	Seco	0	0	2,26	1,50
12/09/2017		0	0	3,01	3,36
18/10/2017		0	0	2,01	1,32
07/11/2017	Chuvoso	0	3,84	51,80	26,11
12/12/2017		0	23,23	127,55	70,52
23/01/2018		0	1,94	45,52	24,80
27/02/2018		0	8,58	58,97	30,28
20/03/2018		0	0,39	25,44	11,86
22/05/2018	Seco	0	0	13,83	6,16
17/07/2018		0	0	4,71	2,19
04/09/2018		0	0	0,89	1,23
16/10/2018		-	-	-	-
20/11/2018	Chuvoso	0	8	32,29	11,79
11/12/2018		0	7,79	55,49	24,27

QA: Descarga de arrasto; QML: Descarga de material de leito; Qst: Descarga sólida total.

A descarga de arrasto na seção 1 em todos os meses de pesquisa teve valor nulo. A descarga de material de leito apresentou valores nulos em épocas de estiagem e na época chuvosa apresentou variação de 0,39 a 23,23 T/dia, com média de 7,68 T/dia. Para a descarga sólida total pelo método de Colby, os valores no período seco tiveram média de 4,45 T/dia enquanto em épocas chuvosas a média aumentou para 56,72 T/dia. Já pelo método modificado de Einstein as médias diminuíram, sendo aproximadamente 2,63 T/dia em períodos secos e 28,52 T/dia nas épocas de elevadas precipitações. Os maiores valores de descargas ocorreram no mês de dezembro de 2017, nesse mês teve grande quantidade de chuva na região.

Com relação à estação 2, os resultados das estimativas de descarga sólida estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17: Descargas sólidas da estação 2 estimadas pelos métodos propostos.

Métodos		Meyer-Peter e Muller (1948)	Ackers e White (1973)	Colby (1957)	Einstein Modificado (1955)
Data	Período	QA (T/dia)	QML (T/dia)	Qst (T/dia)	Qst (T/dia)
02/08/2017	Seco	0	0	1,82	1,49
12/09/2017		0	0	4,45	3,11
18/10/2017		0	0	2,29	1,56
07/11/2017	Chuvoso	3,23	36,2	119,53	66,00
12/12/2017		49,61	202,35	287,94	202,28
23/01/2018		8,36	53,38	117,00	69,03
27/02/2018		16,49	82,19	166,80	100,64
20/03/2018		1,17	28,7	105,87	57,88

QA: Descarga de arrasto; QML: Descarga de material de leito; Qst: Descarga sólida total

Na estação 2 a descarga de arrasto é nula no período seco e apresenta variação na época chuvosa de 1,17 a 49,61 T/dia, com média de 15,77 T/dia. A descarga de material de leito também é nula de agosto a outubro e no período de maiores precipitações tem valor médio de 80,56 T/dia, com variação de 28,7 a 202,35 T/dia. Somente a descarga sólida total não apresenta valores nulos nos primeiros meses de estudo. Para o método de Colby os valores no período seco tiveram média de 2,85 T/dia e na época chuvosas a média é de 159,43 T/dia, já pelo método modificado de Einstein os valores médios diminuíram para 2,05 T/dia em época de estiagem e 99,16 T/dia no período chuvoso.

Para a estação 3 os resultados de descarga de sedimentos estão exibidos na Tabela 18.

Tabela 18: Descargas sólidas da estação 3 estimadas pelos métodos propostos.

Métodos		Meyer-Peter e Muller (1948)	Ackers e White (1973)	Colby (1957)	Einstein Modificado (1955)
Data	Período	QA (T/dia)	QML (T/dia)	Qst (T/dia)	Qst (T/dia)
02/08/2017	Seco	0	0	4,41	1,60
12/09/2017		0	0	8,03	3,10
18/10/2017		0	0	7,23	2,16
07/11/2017	Chuvoso	0	0	94,64	62,75
12/12/2017		0	5,01	342,58	225,29
23/01/2018		0	0,12	103,02	64,24
27/02/2018		0	0,17	115,83	74,67
20/03/2018		0	0,03	68,05	41,40
22/05/2018	Seco	0	0	74,76	47,30
17/07/2018		0	0	12,76	5,64
04/09/2018		0	0	11,62	7,57
16/10/2018		-	-	-	-
20/11/2018	Chuvoso	0	0,35	73,02	51,43
11/12/2018		0	0,39	93,45	58,09

QA: Descarga de arrasto; QML: Descarga de material de leito; Qst: Descarga sólida total

Para a estação 3 a descarga de arrasto estimada por MPM apresenta valores nulos em todos os meses da pesquisa. A descarga de material de leito é nula na época seca e no período chuvoso apresenta variação de 0 a 5,01 T/dia, tendo valor médio de 0,87 T/dia. As descargas sólidas de arrasto e de material de leito nulas e baixas nessa seção pode ser consequência dos valores pequenos de declividade da linha de água e velocidade de escoamento. Para o método de Colby a seção 3 tem média de 19,80 T/dia nas épocas de estiagem e 127,23 T/dia nos períodos chuvosos. Já para o método de Einstein modificado as médias nos períodos diminuem com aproximadamente 11,23 T/dia e 82,51 T/dia.

As descargas estimadas durante o estudo na estação 4 do rio Jordão estão exibidas na Tabela 19.

Tabela 19: Descargas sólidas da estação 4 estimadas pelos métodos propostos.

Métodos		Meyer-Peter e Muller (1948)	Ackers e White (1973)	Colby (1957)	Einstein Modificado (1955)
Data	Período	QA (T/dia)	QML (T/dia)	Qst (T/dia)	Qst (T/dia)
02/08/2017	Seco	0	1,55	9,24	3,60
12/09/2017		0	0,53	18,86	10,01
18/10/2017		0	0,26	10,03	3,72
07/11/2017	Chuvoso	0	10,57	121,35	82,41
12/12/2017		0	89,21	275,81	172,07
23/01/2018		0	16,94	167,85	110,41
27/02/2018		0	30,82	191,37	117,73
20/03/2018		0	12,35	133,79	80,44
22/05/2018	Seco	0	8,46	101,86	53,37
17/07/2018		0	6,58	22,57	7,64
04/09/2018		0	3,85	29,64	-
16/10/2018		-	-	-	-
20/11/2018	Chuvoso	5,4	30,79	139,90	244,03
11/12/2018		7,7	39,72	170,88	218,21

QA: Descarga de arrasto; QML: Descarga de material de leito; Qst: Descarga sólida total

Na estação 4 a descarga de arrasto foi nula na maioria dos meses, somente nos meses de novembro e dezembro de 2018, datas das últimas campanhas, os valores foram de 5,4 T/dia e 7,7 T/dia. A descarga de material de leito não teve valores nulos nessa seção, e as médias foram de 3,54 T/dia e 32,91 T/dia para os períodos secos e chuvosos respectivamente. Para a descarga sólida total pelo método de Colby no período seco, houve valores entre 9,24 e 101,86 T/dia com média de 32,03 T/dia, enquanto em épocas chuvosas a média foi de 171,56 T/dia, já pelo método modificado de Einstein as médias diminuíram.

Como não foram realizadas medições diretas de descargas sólidas de fundo nas seções estudadas devido à falta de equipamentos, não foi possível fazer uma análise da eficiência dos métodos e até mesmo uma avaliação comparativa de qual método tem melhor desempenho. Porém a análise desses resultados é de grande importância na tentativa de entender a dinâmica de sedimentos no Rio Jordão.

As quatro seções não apresentaram grandes quantidades de carreamento de partículas de leito, observado devido aos diversos valores baixos e nulos ao longo dos meses. O transporte dos sedimentos no leito do rio ocorre principalmente em épocas de grandes precipitações. Nakato (1990) obteve resultados similares com diversos valores nulos ao estimar a descarga de arrasto pelo método de MPM para o rio Sacramento.

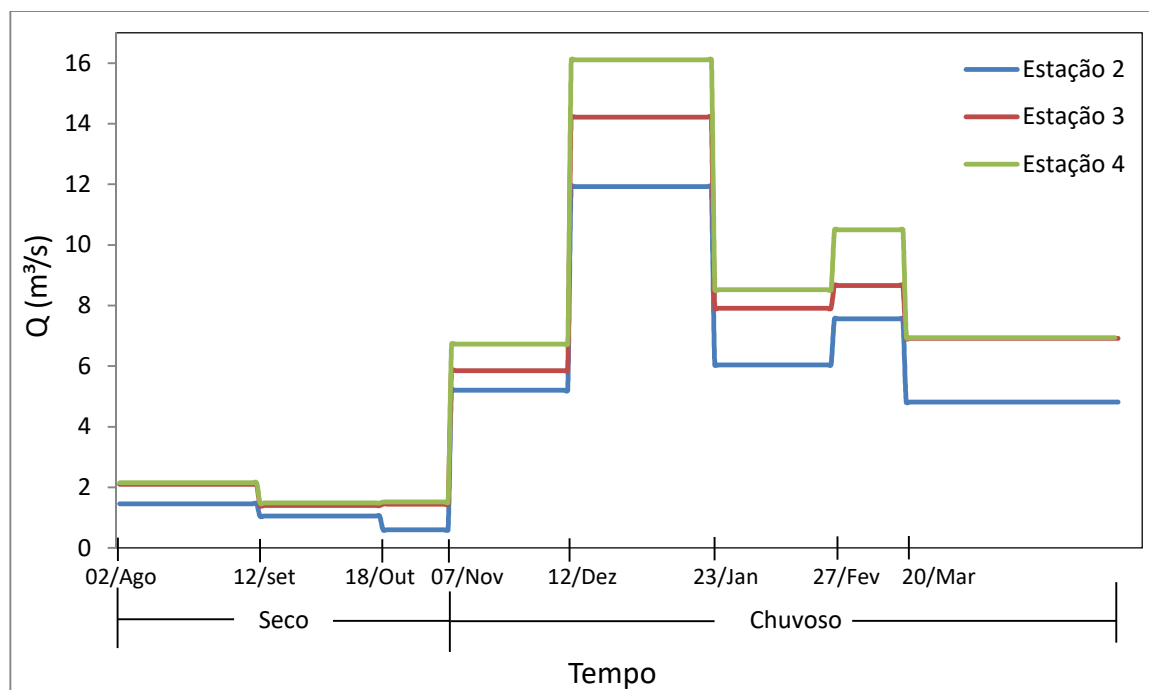
Com relação à descarga sólida total, ocorre variação dos valores estimados em cada método. As descargas pelo método de Colby apresentam valores superestimados quando comparado com os dados obtidos na estimativa por Einstein modificado, o mesmo ocorreu com os resultados de Scapin, Paiva e Beling (2007) no estudo realizado em um rio de Santa Maria. Segundo os mesmos autores os métodos de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955) e Colby (1957), que incorporam dados medidos de concentração de sedimentos em suspensão, obtiveram os melhores resultados com relações entre a descarga calculada e a descarga medida.

4.5 HEC-RAS

No uso do programa HEC-RAS para simulação do transporte de sedimentos, utilizam-se como dados de entrada aqueles obtidos nas campanhas e análises em laboratório. Sabe-se que os métodos aplicados na determinação da vazão sólida são empíricos e muito sensíveis a diversos fatores, e assim, não se tem resultados completamente seguros que representam a realidade integralmente, portanto não é possível fazer uma análise quantitativa dos resultados. Nesse sentido, é fundamental entender que as simulações realizadas serão importantes para mostrar tendências de alterações no leito a partir da erosão e do depósito dos sedimentos na região ao longo do tempo, e com isso propiciar um melhor entendimento do transporte de sedimentos no Rio Jordão, contribuindo para uma gestão mais adequada da bacia hidrográfica. Para a simulação utilizou-se o método de Meyer Peter e Muller.

É importante notar que os cálculos realizados pelo programa são mais precisos quando se tem mais dados experimentais, isso fica claro quando se analisa o hidrograma ilustrado na Figura 51.

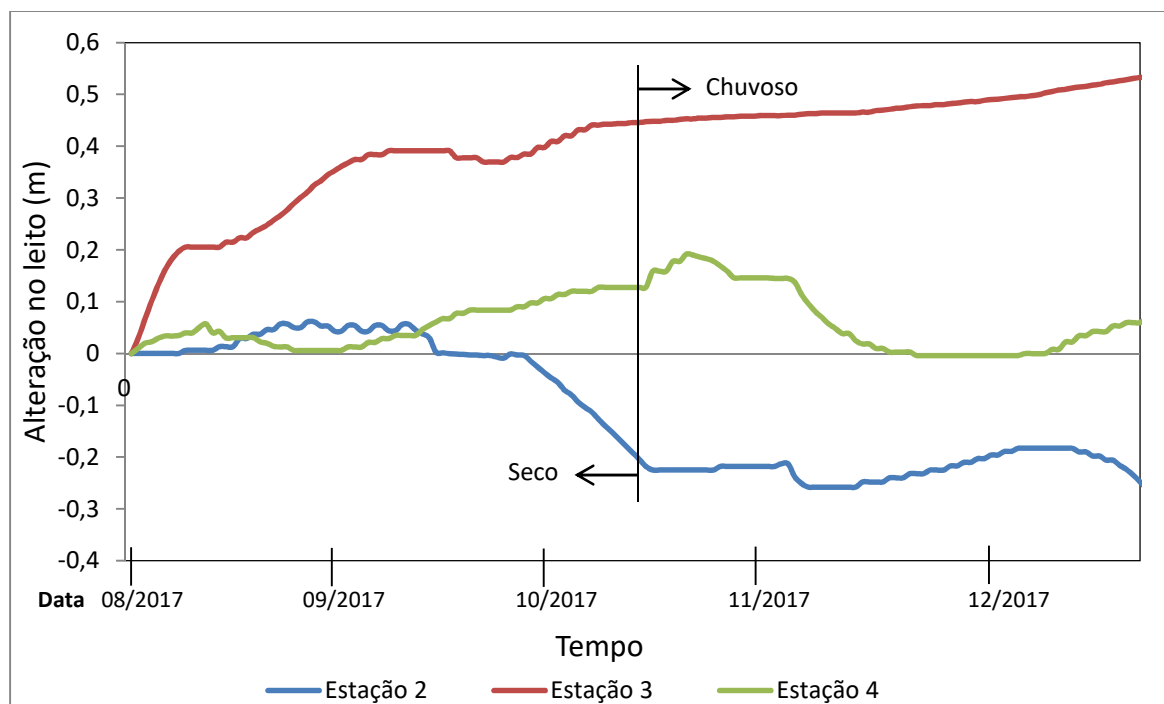
Figura 51: Hidrograma gerado pelo HEC-RAS.



A Figura 51 representa as vazões das três estações ao longo do tempo da simulação. Somente para a seção 2, a montante do trecho, foram inseridos os dados das coletas realizadas, já nas estações 3 e 4, as vazões foram geradas a partir dos escoamentos laterais incrementados no trecho entre as estações. As vazões da simulação são constantes no intervalo entre uma medição e outra, o que demonstra apenas as tendências de descarga líquida de cada seção e a variação das mesmas em períodos distintos. Devido à presença de afluentes e de não se considerar retiradas de água no rio principal, a estação 4, a jusante, apresenta maiores descargas líquidas, além disso, no período chuvoso as vazões têm um aumento considerável quando se compara a época de estiagem.

Segundo USACE (2016), a mudança de seção transversal é uma das características centrais de um modelo de transporte de sedimentos de leitos móveis. Por isso, as análises foram feitas a partir de interpretações de gráficos gerados no HEC-RAS que demonstram alterações temporais e espaciais do leito das seções transversais e do perfil longitudinal do rio. Na Figura 52, é ilustrado as alterações temporais no leito das estações 2, 3 e 4 após a simulação.

Figura 52: Alteração no leito das estações 2, 3 e 4.

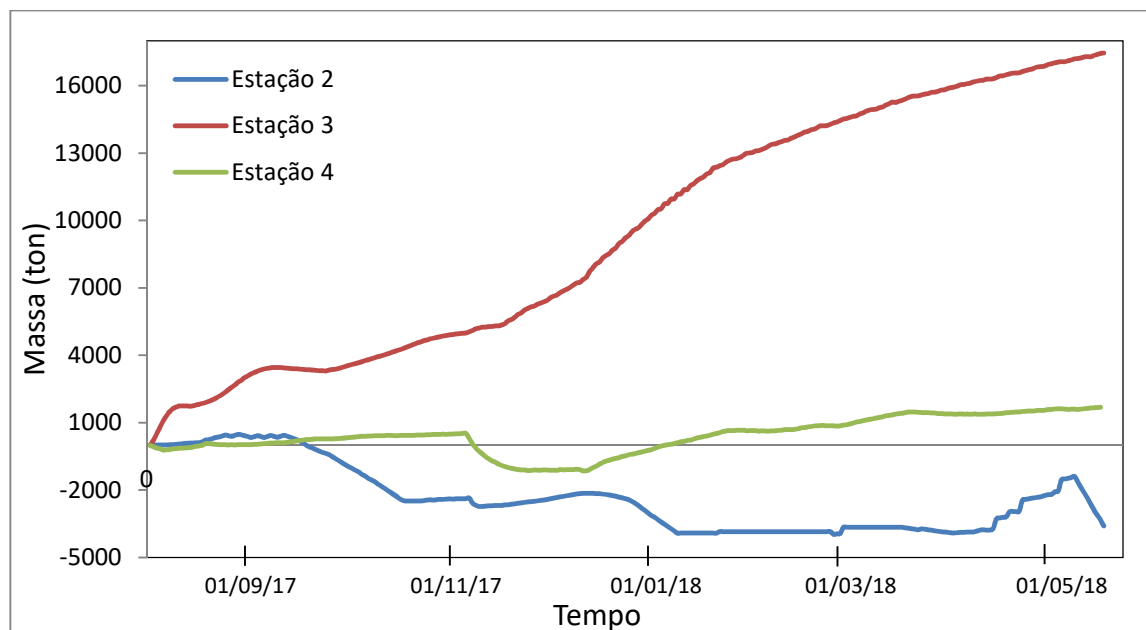


Cada seção apresenta tendências diferentes, na estação 2 percebe-se que no período seco ocorre pequena deposição dos sedimentos, enquanto nas épocas de maiores precipitações as depressões no leito indicam a ocorrência de processos erosivos. Na estação 3 ocorre elevação considerável no leito devido ao depósito de sedimentos, representando um aumento de aproximadamente 45 cm do leito no período seco, já no período chuvoso a elevação abrande, pois, a curva diminui a inclinação devido a menor deposição de partículas no leito. Por fim, na estação 4 também ocorre o depósito de sedimentos no período de estiagem e no início da época chuvosa, mas em seguida esse depósito passa a diminuir com o tempo, indicando períodos que não ocorre variação ou apresenta uma leve depressão do leito.

É importante notar que nas estações 3 e 4, a tendência é que ocorra a deposição de partículas no período seco, isso representa de maneira satisfatória a realidade da região, pois durante os trabalhos de campo, observou-se que na época de estiagem a velocidade do escoamento diminui, influenciando diretamente o depósito das partículas e elevação do leito.

A mudança na geometria do leito de cada estação durante a simulação também pode ser avaliada comparando-se a variação cumulativa temporal em massa de toneladas de sedimento, como exposto na Figura 53.

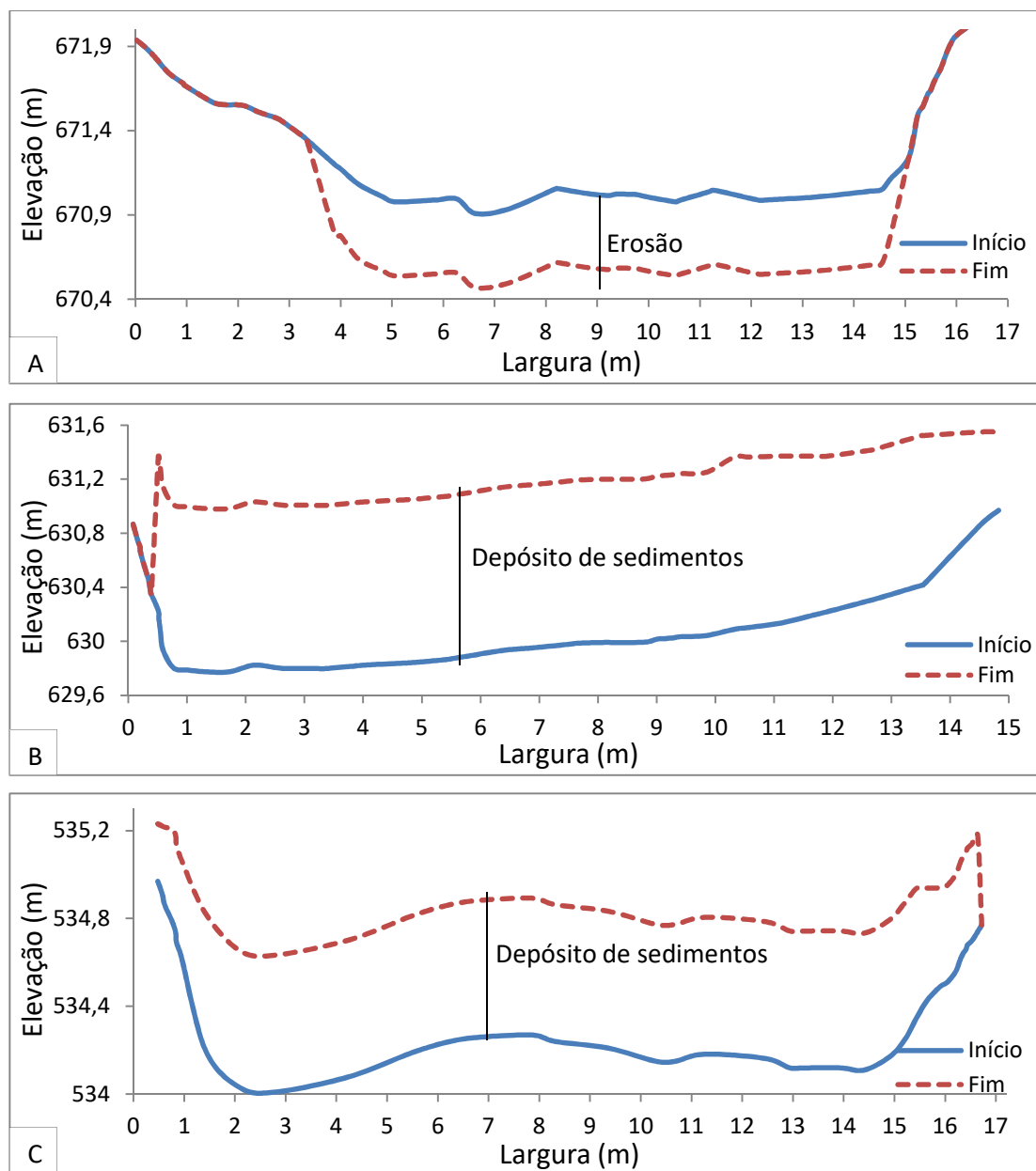
Figura 53: Mudança temporal na geometria do leito em função da massa acumulativa para cada estação.



No início da simulação ocorre um acúmulo positivo de massa na estação 2, porém a partir do mês de outubro observa-se a tendência de perda de massa na seção devido a erosão do leito, confirmando a evidência de que os processos erosivos estão ocorrendo a montante do rio devido as características da região. Com relação à estação 3 o acúmulo de massa sempre foi positivo ao longo do tempo, indicando que está ocorrendo ininterruptamente o depósito de sedimentos na região, isso pode estar acontecendo principalmente devido à baixa declividade e consequentemente as pequenas velocidades de escoamento, como mostrado nos resultados das características hidráulicas e geométricas da estação. A estação 4, a jusante e mais próxima da confluência com o Rio Paranaíba, também apresentou tendência de deposição de sedimentos ao longo do tempo, porém, diferente da seção 3, o depósito em massa foi menor no período que ocorreu mais precipitações, marcado pelo mês de dezembro, a região apresentou processos erosivos devido à perda de sedimentos no leito.

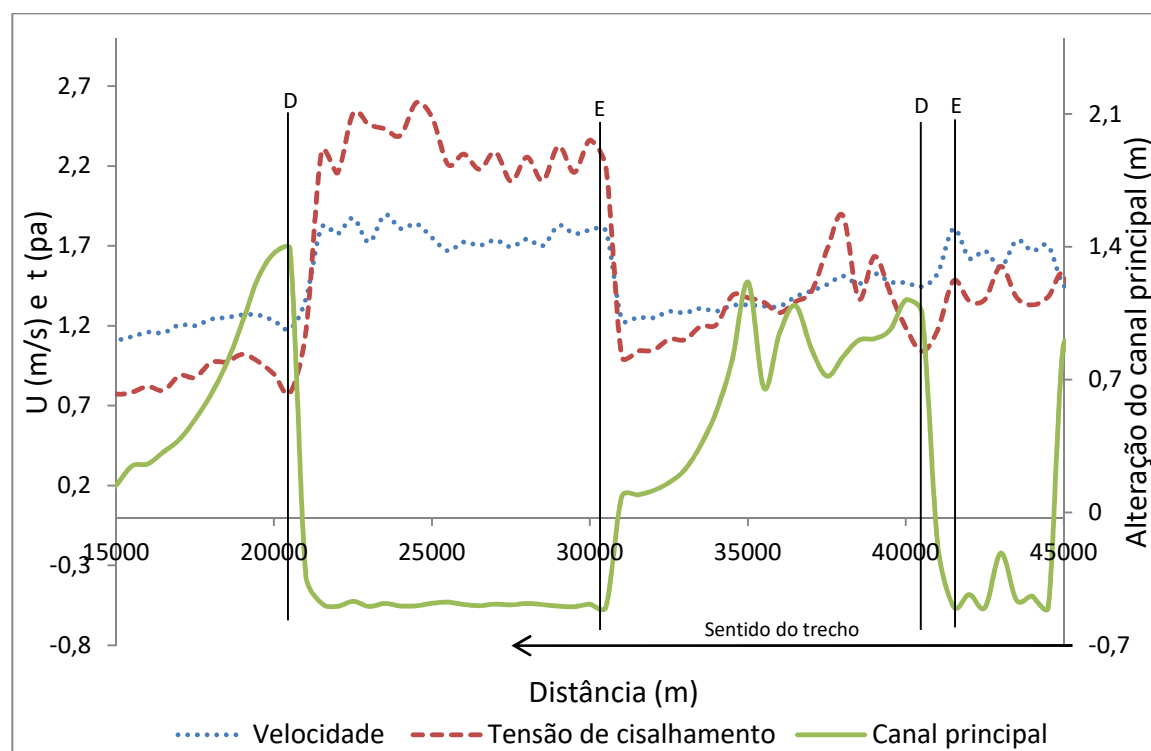
Para deixar mais claro as tendências de erosão ou deposição de sedimentos ao longo do tempo em cada estação estudada, foi exposta a variação transversal do leito de cada estação obtida entre o início e o fim da simulação. Na Figura 54 está ilustrada a variação da morfologia transversal das estações 2, 3 e 4.

Figura 54: Variação da morfologia transversal: A) Estação 2; B) Estação 3; C) Estação 4.



Outros resultados interessantes da simulação correspondem às relações entre velocidade de escoamento, tensão de cisalhamento e os processos de erosão e deposição de sedimentos, que são apresentados na Figura 55.

Figura 55: Velocidade de escoamento, tensão de cisalhamento e alteração do canal principal em um trecho do Rio Jordão.

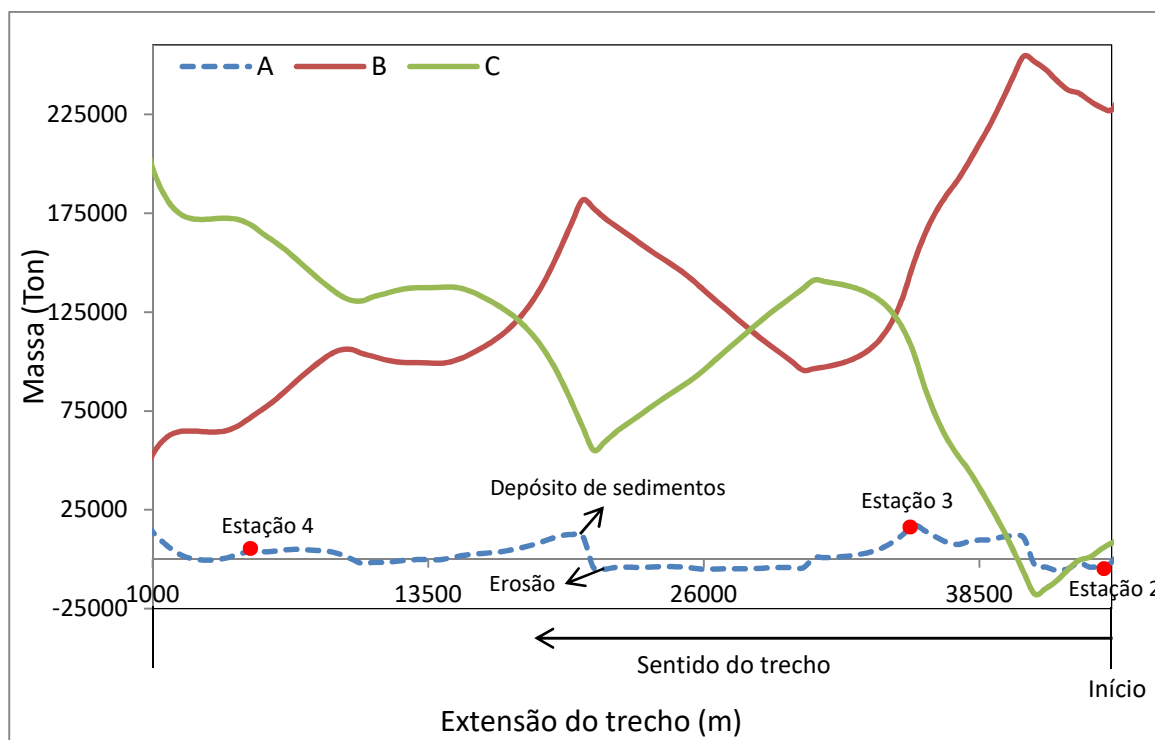


A tensão de cisalhamento e a velocidade de escoamento são fatores que influenciam diretamente o carregamento de sedimentos de leito. Segundo Nazir (2016) a diminuição da tensão de cisalhamento pode ocorrer devido à diminuição de velocidade de escoamento e da inclinação longitudinal. Na Figura 55, fica evidente em alguns trechos a relação entre essas variáveis, pois com o aumento da velocidade a tensão aumentou e com a diminuição da velocidade a tensão de cisalhamento também diminuiu.

Quando ocorre a diminuição da velocidade de escoamento e da tensão de cisalhamento, a tendência observada no gráfico é que ocorra deposição dos sedimentos. Quando essas variáveis aumentam, observa-se a ocorrência de processos erosivos. As linhas E e D indicam claramente essa relação. Na região próxima a 42000 m, os picos de tensão e velocidade são correspondentes à depressão no canal, que indica o efeito dos processos erosivos. Com o declínio da velocidade e da tensão ocorre elevação do leito, indicando a deposição de sedimentos no rio. Autores como Dornelas (2009) e Nazir (2016) mostram em estudos efeitos semelhantes além de confirmarem a grande influência da tensão de cisalhamento no carregamento das partículas de leito.

A mudança na geometria do leito pela variação cumulativa longitudinal em massa de sedimentos, Figura 56, também foi analisada.

Figura 56: A mudança na geometria do leito pela variação cumulativa longitudinal em massa.



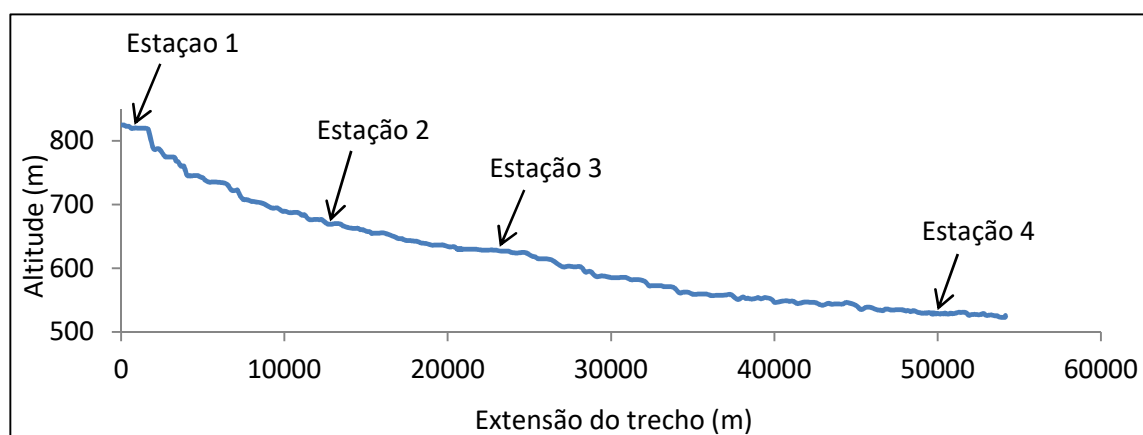
A Figura 56 indica as condições finais da simulação em relação à massa de sedimentos ao longo do trecho. A linha “A” representa a mudança do leito em relação a massa devido a erosão e deposição de partículas sólidas. A linha “B” corresponde a massa acumulada de sedimentos que entra no volume de controle para uma seção específica e a linha “C” representa a mudança de massa total do leito acumulada no espaço e tempo.

No início do trecho ocorre o declínio da linha de mudança de massa total do leito e a ampliação da linha de massa acumulada que entra no volume de controle, isso indica a ocorrência de processos erosivos, como mostrado na linha A. Após o pico da linha de massa acumulada (linha B), observa-se o declínio da mesma e consequentemente o aumento da linha de mudança de massa no leito (linha C), nessa região indicada pela seção 3, ocorre o depósito de sedimentos. O mesmo ocorre na seção 4 de forma mais branda, onde a tendência é que os sedimentos se depositem em menores quantidades.

4.6 ANÁLISE DE FATORES QUE INFLUENCIAM O CARREAMENTO DE SEDIMENTOS NO RIO JORDÃO

O perfil longitudinal do trecho de amostragem, apresentado na Figura 57, é um fator que pode influenciar a variação espacial do transporte de sedimentos no Rio Jordão. O perfil foi construído a partir de arquivos raster de modelo digital de elevação e com a utilização do plugin Profile tool do QGIS.

Figura 57: Perfil longitudinal do trecho de amostragem do Rio Jordão.



Através do perfil longitudinal, verifica-se que a estação 2 situa-se na parte mais acentuada com maior declividade, já a região de médio curso representado pela estação 3, apresenta menor declividade. Devido a maior declividade no alto curso do rio, as partículas são transportados para regiões mais baixas, promovendo o aumento da carga de sedimentos de fundo nas estações 3 e 4. Isso fica evidente quando se analisa o perfil transversal da estação 1 a montante e da estação 4 a jusante, obtidos em campo pelo ADCP, Figuras 58 e 59.

Figura 58: Perfil e módulo da velocidade de escoamento da água na estação 1: A) Período seco; B) Período chuvoso.

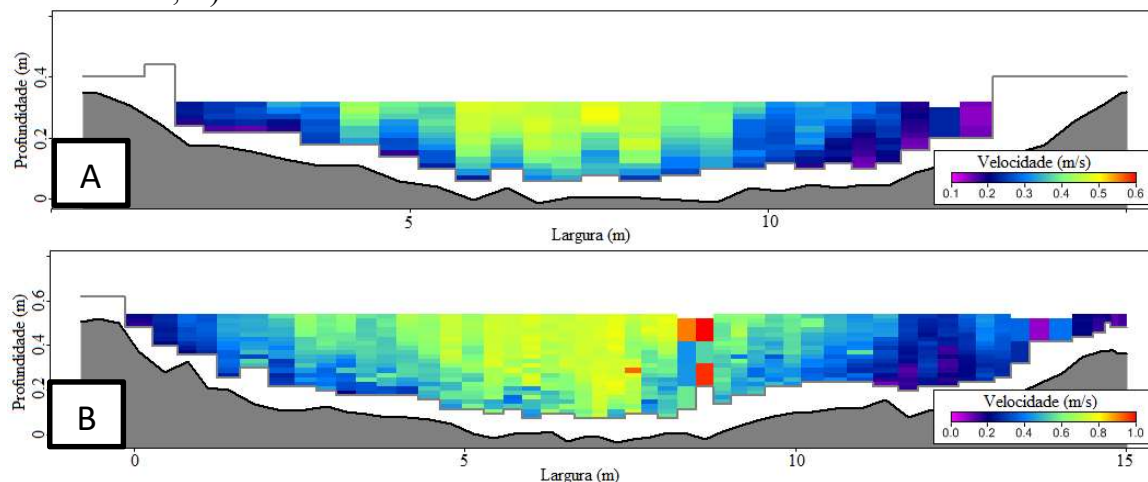
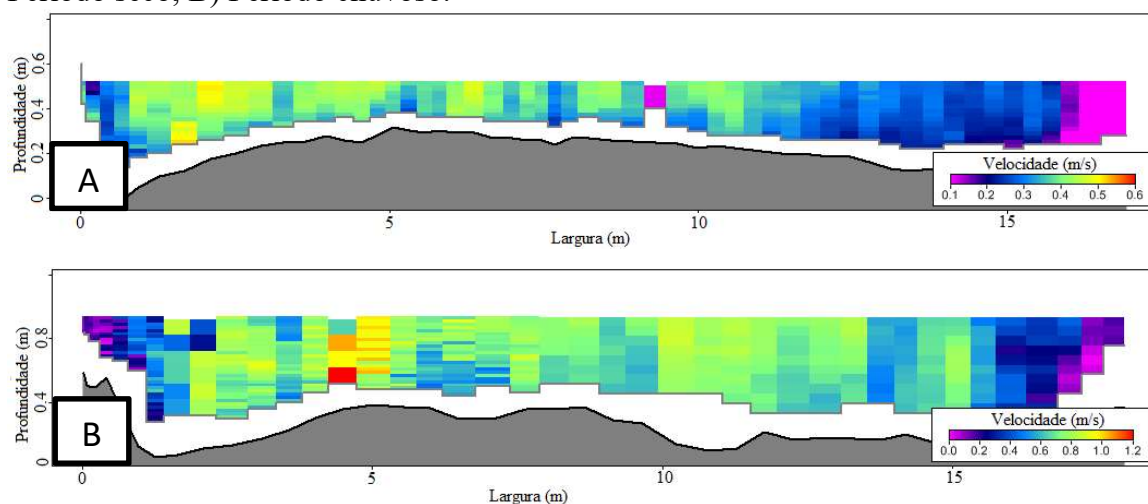


Figura 59: Perfil e módulo da velocidade de escoamento da água na estação 4: A) Período seco; B) Período chuvoso.



A Figura 58, indica o perfil transversal da estação 1 no período seco e chuvoso. Nessa seção, o nível líquido e a largura do rio estão variando devido ao aumento do escoamento na época de maiores precipitações, já com relação ao leito do rio, observar-se que não houve variação entre um período e outro.

O perfil transversal da seção 4, ilustrado na Figura 59, apresenta variação do leito. No período de estiagem ocorre grande elevação do leito devido ao depósito de sedimentos pela diminuição da velocidade do escoamento e pelo aporte de partículas que vem de regiões a montante. Na época chuvosa a diminuição da deposição de partículas fica evidenciada, pois, ocorre o aumento da velocidade do escoamento que influencia o carregamento dos sedimentos para a foz do rio.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

As características hidráulicas e geométricas obtidas entre agosto de 2017 e dezembro de 2018 no Rio Jordão, apresentaram variações entre as estações e os períodos de amostragem. A vazão no rio aumentou significativamente na época de altas precipitações. As estações 2 e 4 tiveram as maiores velocidades de escoamento, enquanto a estação 3 apresentou os menores valores de velocidade e declividade média.

A caracterização granulométrica dos sedimentos de leito foi essencial para aplicação dos métodos de estimativa de transporte sólido. As curvas granulométricas indicaram que o material de leito das seções estudadas é composto basicamente por areia e pedregulho.

As concentrações e descargas de sedimentos em suspensão também apresentaram variações entre as estações e os períodos de amostragem. Na época chuvosa a carga de sedimentos foi maior do que no período de estiagem, evidenciando a grande influência da precipitação na quantidade de sedimentos no rio. Entre as estações, a maior concentração média foi obtida na seção 3 e a menor na seção 1. Com relação à descarga de sedimentos suspensos, o maior valor médio ocorreu na estação 4 e a menor na estação 1.

A declividade acentuada nas regiões de alto curso do trecho estudado está promovendo o carreamento de sedimentos para as estações 3 e 4 que apresentam maiores cargas de sedimentos.

As curvas-chave de sedimentos que relacionam descarga sólida suspensa medida e vazão apresentaram bons ajustes para cada seção e para os dados unidos de todas as estações, com coeficientes de determinação maiores que 0,86. O mesmo não ocorre para as curvas de concentração de sedimentos suspensos e vazão. Para essa correlação a dispersão dos valores foi maior e o ajuste das curvas indicam coeficientes de determinação entre 0,55 e 0,74.

O bom ajuste dos parâmetros e a obtenção de coeficientes de determinação próximos a 1 é essencial para viabilizar a utilização das curvas-chave de sedimentos. Além disso, é importante ressaltar que apesar da importância das curvas de transporte de sedimentos para a obtenção de resultados médios representativos, as curvas-chave não podem substituir valores reais confiáveis.

Apesar da análise realizada para utilização dos melhores métodos de estimativa, não foi utilizado o equipamento para medir a descarga de sedimentos de fundo em campo, por isso não foi possível comparar os métodos para avaliar qual é o mais eficiente para as condições locais do curso d'água. Com isso, os métodos de estimativa de descarga sólida aplicados na pesquisa apresentaram resultados satisfatórios para indicar tendências de transporte de partículas nas seções estudadas. Assim, pode-se concluir pelos métodos, que as partículas sólidas são transportadas principalmente no período de elevadas precipitações, que o carreamento dos sedimentos transportados no leito é pequeno.

Os resultados obtidos no HEC-RAS foram importantes para mostrar as tendências de alterações no leito a partir da erosão e depósito dos sedimentos no trecho simulado ao longo do tempo. A seção 2, a montante do trecho, apresentou perda de massa e depressão no leito devido à ocorrência de processos erosivos. Na seção 3 o acúmulo de massa sempre foi positivo ao longo do tempo, indicando que está havendo depósito de sedimentos na região. Para essa estação, fatores como, baixa declividade e velocidade de escoamento estão influenciando diretamente o carreamento de partículas no leito. A estação 4, a jusante e mais próxima da confluência com o Rio Paranaíba, também apresentou tendência de deposição de sedimentos ao longo do tempo.

O melhor entendimento da dinâmica do transporte de sedimentos no Rio Jordão foi muito importante para contribuir com os estudos relacionados ao assoreamento de reservatórios e por fornecer subsídios para tomada de decisão dos setores competentes, no sentido de melhorar a gestão dos recursos hídricos da bacia hidrográfica.

Por fim, destacam-se as grandes dificuldades no desenvolvimento de trabalhos relacionados à sedimentologia, pois na pesquisa foi necessário o desenvolvimento de trabalho de campo e laboratorial árduo para alcançar os objetivos. Além disso, é necessário que os trabalhos na bacia hidrográfica do Rio Jordão continuem. Nesse sentido, recomenda-se:

- O estudo relacionado a influência do uso e ocupação do solo na produção e transporte de sedimentos;
- Trabalhos de avaliação do desempenho de métodos empíricos a partir de medições em campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKSOY, H.; KAVVAS, M. L. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. **Catena**, v. 64, n. 2-3, p.247-271, dez. 2005.

ALAMY FILHO, José Eduardo. **Modelação numérica dos processos de sedimentação em escoamentos turbulentos e análise da ressuspensão em canais**. 2006. 233 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

ALAMY FILHO, José Eduardo; SCHULZ, Harry Edmar. **Modelação do transporte de sedimentos sobre leitos deformáveis com uso da equação de advecção-difusão e do método de fronteira imersa**. in: vii Encontro nacional de engenharia de sedimentos, 2006, Porto Alegre - Rs. 2006. v. 1, p. 1 - 21.

ALEXANDRIDIS, T. K.; SOTIROPOULOU, A. M.; BILAS, G.; KARAPETSAS, N.; SILLEOS, N. G. The Effects of Seasonality in Estimating the C-Factor of Soil Erosion Studies. **Land Degradation & Development**, v. 26, n. 6, p.596-603, 14 maio 2013.

ALVARENGA, L. A.; MARTINS, M. P. P.; CUARTAS, L. A.; PENTEADO, V. A.; ANDRADE, A. Estudo da qualidade e quantidade da água em microbacia, afluente do rio Paraíba do Sul – São Paulo, após ações de preservação ambiental. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 7, n. 3, p. 228-240, 2012

ANEEL – *Agência Nacional de Energia Elétrica* – Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/scg/Doc/Carteira.xlsx>>. Acesso em: 25 de julho de 2018.

ARCOVA, F.C.S.; CICCIO, V. Características do deflúvio de duas microbacias hidrográficas no laboratório de hidrologia florestal Walter Emmench, Cunha - SP. **Revista do Instituto Florestal de São Paulo**, São Paulo, v.9, n.2, p.153-70, 1997.

APARECIDO, C. F. F.; VANZELA, L. S.; VAZQUEZ, G. H.; LIMA, R. C. Manejo de bacias hidrográficas e sua influência sobre os recursos hídricos. **Brazilian Journal Of Irrigation And Drainage**, Botucatu, v. 21, n. 2, p.239-256, jun. 2016.

ARROIO JUNIOR, P. P. **Avaliação da produção e Transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Itaqueri, municípios de Itirapina e Brotas – SP**. 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo - Análise Granulométrica - Análise de Ensaio: **NBR 7181**. Rio de Janeiro, 2016. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Amostra de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: **NBR 6457**. Rio de Janeiro, 2016. 14p.

ATUCHA, A.; MERWIN, I. A.; BROWN, M. G.; GARDIAZABAL, F.; MENA, F. ADRIAZOLA, C. Soil erosion, runoff and nutrient losses in an avocado (*Persea americana* Mill) hillside orchard under different groundcover management systems. **Plant And Soil**, v. 368, n. 1-2, p.393-406, 17 nov. 2012.

BERGHOUT, A.; MEDDI, M. Sediment transport modelling in wadi Chemora during flood flow events. **Journal of Water and Land Development**. v. 31, p. 23–31, mai. 2016.

BHOWMIK, N. G.; BONINI, A. P.; BOGNER, W. C.; BYRNE, R. P. **Hydraulics of Flow and Sediment Transport in the Kankakee River in Illinois**. Illinois State Water Survey, Champaign, Report of Investigation 98, 1980.

BHUYAN, S. J.; KALITA, P. K.; JANSSEN, K. A.; BARNES, P. L. Soil loss predictions with three erosion simulation models. **Environmental Modelling & Software**, v. 17, n. 2, p.137-146, jan. 2002.

BISSONNAIS, Y. L.; SINGER, M. J. Seal Formation, Runoff, and Interrill Erosion from Seventeen California Soils. **Soil Science Society Of America Journal**, v. 57, n. 1, p.224-229, 1993.

BORINELLI, B. As Características dos problemas ambientais e suas implicações para a política ambiental. **Serviço Social em Revista**, v. 13, n. 2, p.63-84, 15 dez. 2011.

BRAGA, C. C. Distribuição espacial e temporal de sólidos em suspensão nos afluentes do reservatório da usina hidrelétrica Barra dos Coqueiros, GO. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 33, n. 2, p. 121-134, 2013.

BRIGANTE, Janete; ESPÍNDOLA, Evaldo Luiz Gaeta. Limnologia fluvial: um estudo no rio Mogi-Guaçu. São Carlos: Rima, 2003. 255 p.

BRITO, R. N. R.; ASP, N. E.; BEASLEY, C. R.; SANTOS, H. S. S. Características Sedimentares Fluviais Associadas ao Grau de Preservação da Mata Ciliar - Rio Urumajó, Nordeste Paraense. **Acta Amazônica**, v. 1, n. 39, p.173-180, 2009.

BRITO, A. O. **Estudo da erosão em ambiente urbano, visando planejamento e controle ambiental no distrito federal**. 2012. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

BRUNE, R. A. **Métodos de estimativa de descarga sólida em rios - análise comparativa**. 2014. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Ambienta, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

BUENO, C. R. P.; ARRAES, C. L.; PEREIRA, G. T.; CORA, J. E.; CAMPOS, S. Análise multivariada na determinação do risco de erosão em solos sob irrigação. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 1, p. 23-35, 2010.

CABRAL, S. L.; REIS, R. S. Influência do uso e ocupação do solo na produção de sedimentos na bacia do rio jacarecica. **Revista de Geografia (UFPE)**, Pernambuco, v. 32, n. 2, p.147-157, 11 jul. 2015.

CARVALHO, Newton de Oliveira. **Hidrossedimentologia Prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 599 p.

CARVALHO, N.O.; FILIZOLA JÚNIOR, N.P.; SANTOS, P.M.C.; LIMA, J.E.F.W. **Guia de práticas sedimentométricas**. Brasília: ANEEL, 2000, 154 p. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/Guia_prat_port.pdf>. Acesso em: 17 Maio. 2018.

CARVALHO, N. O.; SALGADO, J. C. M.; ROSS, J.; RUIZ, N. C. P.; SILVA, L. F. A.; MESQUITA, J. B.; GOULART NETTO, A. A.; SILVA, L. P. **Revisão dos estudos sedimentológicos do Rio Madeira e Mamoré**, RO. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Novembro, 2005, João Pessoa, PB.

CARVALHO, A.P.V; BRUMATTI, D.V.; DIAS, H.C.T. Importância do manejo da bacia hidrográfica e da determinação de processos hidrológicos. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v.2, n.2, p.148-156, 2012.

CASTILHO, Alice Silva de. **Avaliação da aplicabilidade do método simplificado de Colby na estimativa da descarga sólida total em cursos d'água: Estudo de Caso: Sub-bacia 40 - Região do Alto São Francisco**. 1998. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Saneamento e Meio Ambiente, Departamento de Engenharia Hidráulica e de Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1998.

CHENG, N. S. Exponential Formula for Bedload Transport. **Journal Of Hydraulic Engineering**, v. 128, n. 10, p.942-946, out. 2002.

COBANER, M.; UNAL, B.; KISI, O. Suspended sediment concentration estimation by an adaptive neuro-fuzzy and neural network approaches using hydro-meteorological data. **Journal of Hydrology**, v. 367, n. 1-2, p.52-61, mar. 2009.

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

CORNELLI, R.; SCHNEIDER, V. E.; BORTOLIN, T. A.; CEMIN, G.; SANTOS, G. M. Análise da Influência do Uso e Ocupação do Solo na Qualidade da Água de Duas Sub-Bacias Hidrográficas do Município de Caxias do Sul. **Scientia Cum Industria**, v. 4, n. 1, p.1-14, 2 abr. 2016.

COSTA, L. F. **Análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados na determinação de taxas de assoreamento de reservatórios**. 2012. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

COSTA, R. A.; ROSOLEN, V. Concentração de metais pesados em sedimentos de córregos urbanos como indicador da qualidade ambiental e riscos a saúde humana. **Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, Uberlândia, v. 15, n. 8, p.222-231, dez. 2012.

CRISPIM, D. L.; ISMAEL, L. L.; SOUSA, T. M. I.; GARRIDO, J. W. A.; QUEIROZ, M. M. F. Transporte e caracterização de sedimentos de fundo no rio piranhas em uma seção de controle próximo à sede do município de pombal-pb. **Holos**, v. 3, p.93-101, 24 jul. 2015.

CUNICO, C. **Zoneamento ambiental da bacia hidrográfica do rio Marumbi-PR: perspectivas para a análise e avaliação das condições sócio-ambientais**. 2007. 193 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2007.

DAVIDE, A.C.; PINTO, L. V. A.; MONNERAT, P. F.; BOTELHO, S. A. Nascente: O verdadeiro tesouro da propriedade rural. 1ª ed. Lavras. Editora UFLA, 2002. 18p.

DOLVITSCH, Juliane Natália. **Simulação do Transporte de sedimentos em rios e canais: Estudo sobre o softwares disponíveis**. 2013. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

DORNELAS, Breno Almeida. **Análise experimental da tensão de cisalhamento mínima para suspensão de partículas em um leito horizontal**. 2009. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.

EDWARD, T. K.; GLYSSON, G. D. **Field Methods for measurement of fluvial sediment**. U. S. Geological Survey, Open- File Report 86-531, Reston, Virginia. 1988

FARBER, S. C.; COSTANZA, R.; WILSON, M. A. Economic and ecological concepts for valuing ecosystem services. **Ecological Economics**, v. 41, n. 3, p.375–392, jun. 2002.

FLOTEMERSCH, J. E.; LEIBOWITZ, S. G.; HILL, R. A.; STODDARD, J. L.; THOMS, M. C.; THARME, R. E. A Watershed Integrity Definition and Assessment Approach to Support Strategic Management of Watersheds. **River Research And Applications**, v. 32, n. 7, p.1654-1671, 23 out. 2015.

FORTIN, G.; LEBLANC, M.; SCHIAVONE, S.; CHOUINARD, O.; UTZSCHNEIDER, A. Local Perceptions, Ruslefac Mapping, and Field Results: The Sediment Budget of Cocagne River, New Brunswick, Canada. **Environmental Management**, v. 55, n. 1, p.113-127, 13 nov. 2014.

GARRIDO, J. W. A.; SOUSA, T. M. I.; ISMAEL, L. L.; CRISPIM, D. L.; FERREIRA, P. M. L.; QUEIROZ, M. M. F. Determinação das curvas-chave de descargas de sedimentos em suspensão na bacia hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 1, p.69-75, fev. 2018.

GLYSSON, G. D. Sediment-transport curves. USGS, Open-file Report 87-218. Reston, Virginia. 1987.

GROVE, M. K.; BILOTTA, G. S.; WOOCKMAN, R. R.; SCHWARTZ, J. S. Suspended sediment regimes in contrasting reference-condition freshwater ecosystems: Implications for water quality guidelines and management. **Science of the Total Environment**, v. 502, p.481-492, jan. 2015.

- HAGHIABI, A. H.; ZAREDEHDASHT, E. Evaluation of HEC-RAS Ability in Erosion and Sediment Transport Forecasting. **World Applied Sciences Journal**, v. 11, n. 17, p.1490-1497, 2012.
- HUANG, H. Q. Reformulation of the bed load equation of Meyer-Peter and Müller in light of the linearity theory for alluvial channel flow. **Water Resources Research**, v. 46, n. 9, p.1-11, set. 2010.
- KARIM, F. Bed Material Discharge Prediction for Nonuniform Bed Sediments. **Journal of Hydraulic Engineering**, vol. 124, n. 6, p.597-604, jun. 1998.
- LEFF, E. **Epistemologia ambiental**. Tradução: Sandra Valenzuela. Revisão técnica: Paulo Freire Vieira. 5. ed. São Paulo: Cortez, 2010.
- LIMA, J. E. F.W.; LOPES, W. T. A.; CARVALHO, N. O.; VIERA, M. R.; SILVA, E. M. **Suspended sediment fluxes in the large river basins of Brazil**. Sediment Budgets 1 (Proceedings of symposium S1 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil, April 2005). IAHS Publ. 291, 2005
- LOPES, M. A. G. **Reconstituição da rotura da barragem das minas da Fonte Santa: análise do transporte sólido no vale a jusante**. 2012. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia e A Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.
- MAIA, A.G.; VILLELA, S.M. A necessidade da consideração do processo de assoreamento no planejamento e operação de reservatórios. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 2, p. 187-193, jun. 2006.
- MARTINS, S. V. Recuperação de matas ciliares. Viçosa: Aprenda fácil, 2001. 143p.
- MEYER-PETER, E. MULLER, R. Formulas for Bed Load Transport. **Proceedings of 2nd meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research**. Zurich , p. 39-64, 1948.
- MOHAMMAD, M. E.; AL-ANSARI, N.; ISSA, I. E.; KNUTSSON, S. Sediment in Mosul Dam reservoir using the HEC-RAS model. **Lakes & Reservoirs: Research & Management**, v. 21, n. 3, p.235-244, set. 2016.
- MORAIS, R. C. S. Estimativa de produção e transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Parnaíba, nordeste do Brasil. **Revista Equador**, Piauí, v. 4, n. 4, p.81-97, dez. 2015.
- NAGLE, G. N.; FAHEY, T. J.; LASSOIE, J. P. Management of Sedimentation in Tropical Watersheds. **Environmental Management**, New York, v. 23, n. 4, p.441-452, 1999.
- NAGY, H. M.; WATANABE, K.; HIRANO, M. Prediction of Sediment Load Concentration in Rivers using Artificial Neural Network Model. **Journal Of Hydraulic Engineering**, v. 128, n. 6, p.588-595, jun. 2002.
- NAKATO, Tatsuaki. Tests of selected sediment-transport formulas. **Journal Of Hydraulic Engineering**, Iowa, v. 116, n. 3, p.362-379, mar. 1990.

- NAZIR, M. H. M.; AWANG, S.; SHAABAN, A. J.; YAHAYA, N. K. E. M.; JUSOH, A. M.; ARUMUGAM, R. M. A.; GHAN, A. A. Sediment Transport Dynamic in a Meandering Fluvial System: Case Study of Chini River. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 136, n. 1, p.1-11, jul. 2016.
- NEVES, Fernando Frachone. **Avaliação da influência de sedimentos em suspensão em populações de Corbicula fluminea: análise comparativa em duas microbacias hidrográficas do Estado de São Paulo, Brasil**. 2010. 175 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Biologia Comparada, Departamento de Biologia, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2010.
- OUYANG, W.; HAO, F.; SKIDMORE, A. K.; TOXOPEUS, A. G. Soil erosion and sediment yield and their relationships with vegetation cover in upper stream of the Yellow River. **Science Of The Total Environment**, v. 409, n. 2, p.396-403, 15 dez. 2010.
- OLIVEIRA-FILHO, A.T.; ALMEIDA, R.J. de; MELLO, J.M. de; GAVILANES, M.L. Estrutura fitossociológica e variáveis ambientais em um trecho de mata ciliar do córrego Vilas Boas, Reserva Biológica do Poço Bonito, Lavras (MG). **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v.17, n.1, p.67-85, 1994^a.
- OLIVEIRA, L. F. C.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, G. C. Rotina computacional para a determinação da velocidade de sedimentação das partículas do solo em suspensão no escoamento superficial. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 1, p.126-136, abr. 2005.
- PAIVA, J. B. D. Métodos de Cálculo do Transporte de Sedimentos em Rios. **Hidrologia Aplicada a Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre. ABRH, 2001. cap. 12, p. 313-364.
- PAIVA, J.B. D.; BELING, F. A.; ROSA, L.H. WinTSR - Cálculo do Transporte de Sedimentos em Rios./Contato pessoal/ HDS-CT- UFSM. 2002. (Software não publicado).
- PANACHUKI, E.; SOBRINHO, T. A.; VITORINO, A. C. T.; CARVALHO, D. F.; URCHEI, M. A. Parâmetros físicos do solo e erosão hídrica sob chuva simulada, em área de integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p.261-268, 5 jan. 2006.
- PEREIRA, M. A. F. **Processos 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.
- PIRES, J. S.; SANTOS, J. E.; PRETTE, M. E. A Utilização do Conceito de Bacia Hidrográfica para a Conservação dos Recursos Naturais. In: SCHIAVETTI, Alexandre; CAMARGO, Antonio. **Conceitos de Bacias Hidrográficas: Teorias e Aplicações**. Ilhéus: Editus, 2002. Cap. 1. p. 17-35. Disponível em: <http://www.uesc.br/editora/livrosdigitais2015/conceitos_de_bacias.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2018.
- PISSARRA, T. C. T. **Avaliação quantitativa das características geomórficas de microbacias hidrográficas de 1ª ordem de magnitude em quatro posições do sistema**

de drenagem. 1998. 124 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1998.

POLETO, K.; SAMPAIO, S.C.; QUEIROZ, M. M. F.; GOMES, B. M.; SONCELA, R. Turbidimetry as an alternative method to determine the rating curve of suspended sediments. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 3, p.598-606, jun. 2011.

RATHA, D.; AGRAWAL, V. P. A digraph permanent approach to evaluation and analysis of integrated watershed management system. **Journal Of Hydrology**, v. 525, p.188-196, jun. 2015.

REUSSER, L.; BIERMAN, P.; ROOD, D. Quantifying human impacts on rates of erosion and sediment transport at a landscape scale. **Geology**, v. 43, n. 2, p.171-174, fev. 2015.

RICKER, M. C.; ODHAMBO, B. k.; CHURCH, J. M. Spatial Analysis of Soil Erosion and Sediment Fluxes: A Paired Watershed Study of Two Rappahannock River Tributaries, Stafford County. Virginia. **Environmental Management**, Virginia, v. 41, n. 5, p.766-778, 2008.

ROCHA, P. C. Geometria hidráulica e transporte de sedimentos em canais do sistema fluvial do alto rio Paraná, centro-sul do Brasil. **Geosul**, v. 31, n. 61, p 249-269, jun. 2016.

SALLA, M. R.; PEREIRA, C. E.; ALAMY FILHO, J. E.; PAULA, L. M.; PINHEIRO, A. M. Estudo da autodepuração do Rio Jordão, localizado na bacia hidrográfica do Rio Dourados. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p.105-114, 30 abr. 2013.

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R.V.B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. **Hidrometria Aplicada**. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Curitiba-Pr. 2001. 372p.

SCAPIN, J. **Caracterização do transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano na cidade de santa maria – RS.** 2005. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SCAPIN, J.; PAIVA, J. B. D.; BELING, F. A. Avaliação de Métodos de Cálculo do Transporte de Sedimentos em um Pequeno Rio Urbano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Santa Maria, Rs, v. 12, n. 4, p.5-21, dez. 2007.

SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; AMORIM, R. S. S.; PAIVA, K. W. N. Efeito da cobertura nas perdas de solo em um Argissolo Vermelho-Amarelo utilizando simulador de chuva. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.2, p.409-419, 2005.

SILVA JUNIOR, V. P.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, T. P. N.; GUERRA, S. M. S.; SANTOS, E. S. Produção de água e sedimentos em bacia representativa do semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 15, p.1073-1081, 09 ago. 2011.

SINNAKAUDAN, S. K.; GHANI, A. Ab.; AHMAD, M. S. S.; ZAKARIA, N. A. Multiple Linear Regression Model for Total Bed Material Load Prediction. **Journal Of Hydraulic Engineering**, v. 132, n. 5, p.521-528, maio 2006.

SINNAKAUDAN, S. K.; SULAIMAN, M. S.; TEOH, S. H. Total bed material load equation for high gradient rivers. **Journal Of Hydro-environment Research**, v. 4, n. 3, p.243-251, out. 2010.

SOBRINHO, T. A.; SONE, J. S.; ANACHE, J. A. A.; ALMEIDA, I. K.; SOUZA, J. S.; CARVALHO, G. A.; GODOY, M. T. R.; POMPEU, R. M.; COUTO, C. B.; **Avaliação de métodos para a estimativa da descarga sólida total em rios**. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2013.

SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION. **Determination of fluvial sediment discharge** . Inter-Agency Committee on Water Resources. Report nº 14. Washington, D.C. 1963.

STEVENS, H. H.; YANG, C. T. **Summary and use of selected fluvial sediment discharge formulas**. US Geological Survey. Denver, Colorado. 1989

SUN, X.; LI, C.; KUIPER, K. F.; ZHANG, Z.; GAO, J.; WIJBRANS, J. R. Human impact on erosion patterns and sediment transport in the Yangtze River. **Global And Planetary Change**, v. 143, p.88-99, ago. 2016.

TEODORO, V. L. I.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D. J. L.; FULLER, B. B. O Conceito de Bacia Hidrográfica e a Importância da Caracterização Morfométrica para o Entendimento da Dinâmica Ambiental Local. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, v. 11, n. 1, p.137-155, 7 jan. 2007.

TERABE, F. R. **Estudo sobre o uso do perfilador acústico de corrente por efeito Doppler (ADCP) para medição do transporte de sólido em suspensão**. 2003. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

THAPA, B. S. **Hydraulic design of francis turbine to minimize sediment erosion**. 2011. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica , School Of Engineering, Kathmandu University Dhulikhel, Nepal, 2011.

TUCCI, C. E. M. 1997. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1997. 943 p (Col. ABRH de Recursos Hídricos, v.4).

USACE: US Army Corps of Engineers. (2016). HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual.

VALLE JUNIOR, R. F. **Diagnóstico de áreas de risco de erosão e conflito de uso dos solos na bacia do Rio Uberaba**. 2008. 222 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2008.

VANZELA, L. S.; HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. A. M. Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Córrego Três Barras, Marinópolis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 1, p.55-64, jan. 2010.

VAN RIJN, L. C. Sediment transport, part I: bed load transport. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 110, n. 10, p. 1431-1456, 1984a.

ZHANG, G. H.; LIU, G. B.; WANG, G. L.; WANG, Y. X. Effects of Vegetation Cover and Rainfall Intensity on Sediment-Bound Nutrient Loss, Size Composition and Volume Fractal Dimension of Sediment Particles. **Pedosphere**, v. 21, n. 5, p.676-684, 2011.

WAN, Shiming et al. Human impact overwhelms long-term climate control of weathering and erosion in southwest China. **Geology**, v. 43, n. 5, p.439-442, maio 2015.

WANG, X.; HAO, R.; HUO, J.; ZHANG, J. Modeling sediment transport in river networks. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 387, n. 25, p. 6421-6430, nov. 2008.

WILSON JUNIOR, G.; PAIVA, L. E. D. **Estimativa da descarga sólida por arraste a partir do registro das configurações de fundo: aplicação ao córrego Horácio**, Noroeste do Estado do Paraná. In XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, novembro de 2003. Curitiba, PR.

WU, B.; VAN MAREN, D.S.; LI, L. Predictability of sediment transport in the Yellow River using selected transport formulas. **International Journal of Sediment Research**, v. 23, n. 4, p.283-298, dez. 2008.

WU, Y.; CHEN, J. Modeling of soil erosion and sediment transport in the East River Basin in southern China. **Science Of The Total Environment**, v. 441, p.159-168, dez. 2012.

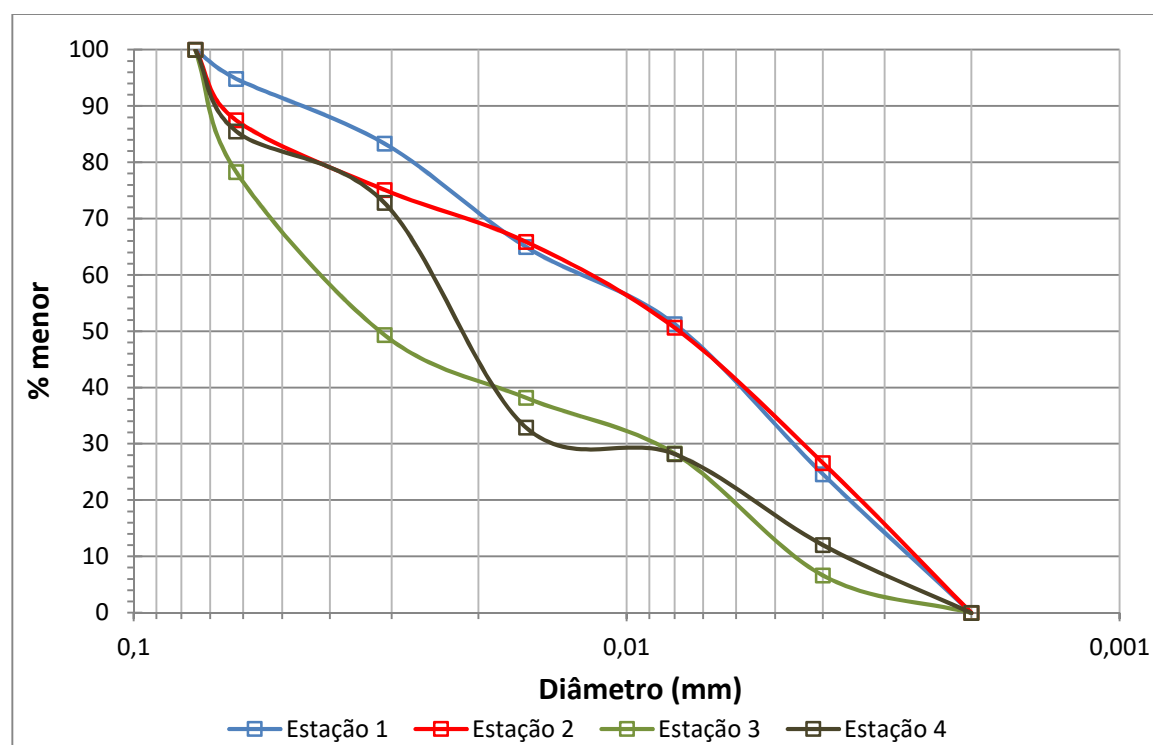
YANG, C. T.; MOLINAS, A. Sediment transport and unit stream power function. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 108, n. 6, p.774-793, 1982.

YANG, C. T.; MARSOOLI, R.; AALAMI, M. T. Evaluation of total load sediment transport formulas using ANN. **International Journal Of Sediment Research**, Colorado, v. 24, n. 3, p.274-286, 2009.

YANG, D.; KANAE, S.; OKI, T.; KOIKE, T.; MUSIAKE, K. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes. **Hydrological Processes**, v. 17, n. 14, p.2913-2928, 2003.

APÊNDICE A

Figura 60: Curva granulométrica dos sedimentos em suspensão.



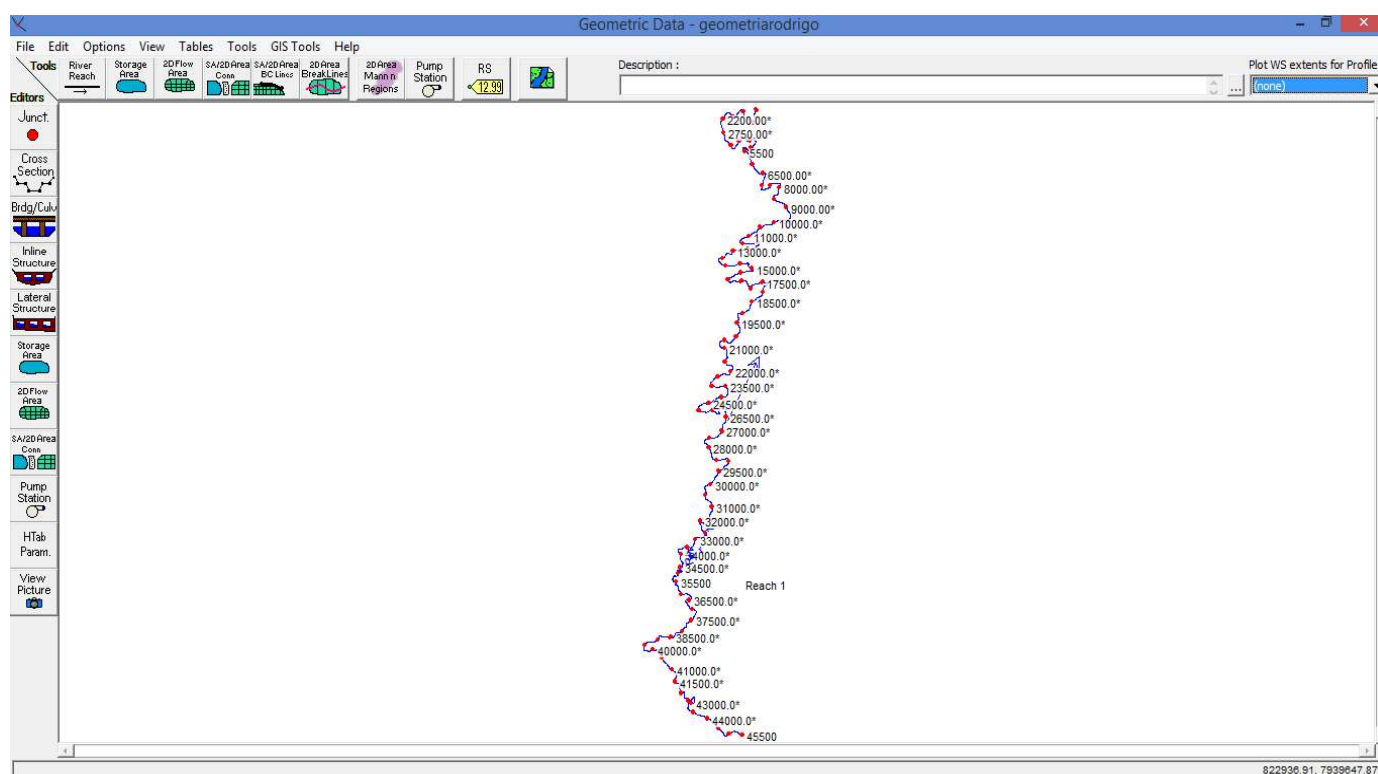
ANEXO A

Figura 61: Janela principal do HEC-RAS.



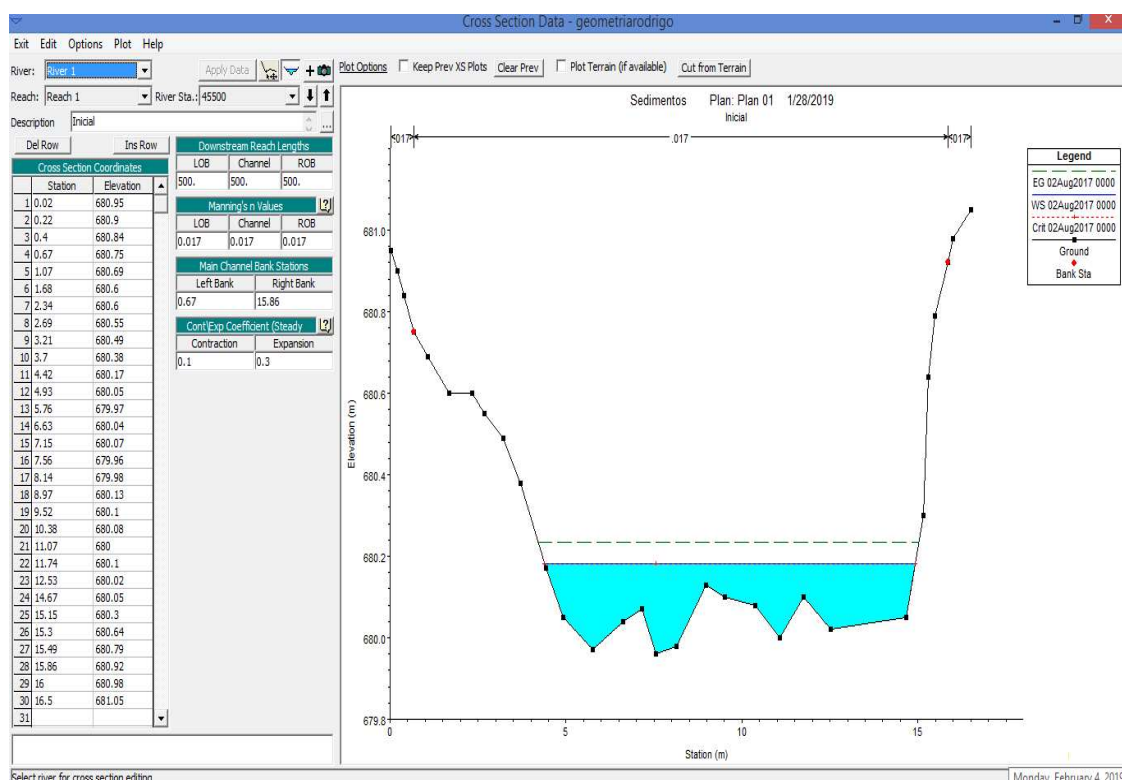
Fonte : Autor

Figura 62: Janela do editor de dados de geometria do rio.



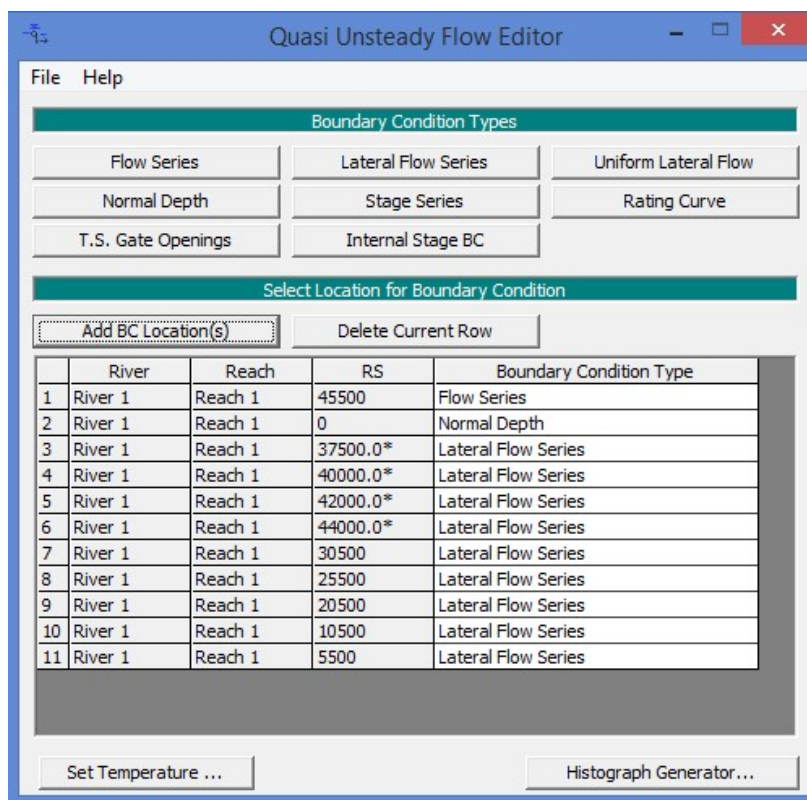
Fonte: Autor.

Figura 63: Editor de dados de seção transversal.



Fonte: Autor.

Figura 64: Janela do editor de fluxo quase-permanente.



Fonte: Autor.

Figura 65: Editor de série de fluxo.

Flow Series for River 1 Reach 1 45500

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

☐ Use Simulation Time: Date: 02aug2017 Time: 0000

☒ Fixed Start Time: Date: 02aug2017 Time: 00:00

Hydrograph Data

No. Ordinates Interpolate Values Del Row Ins Row

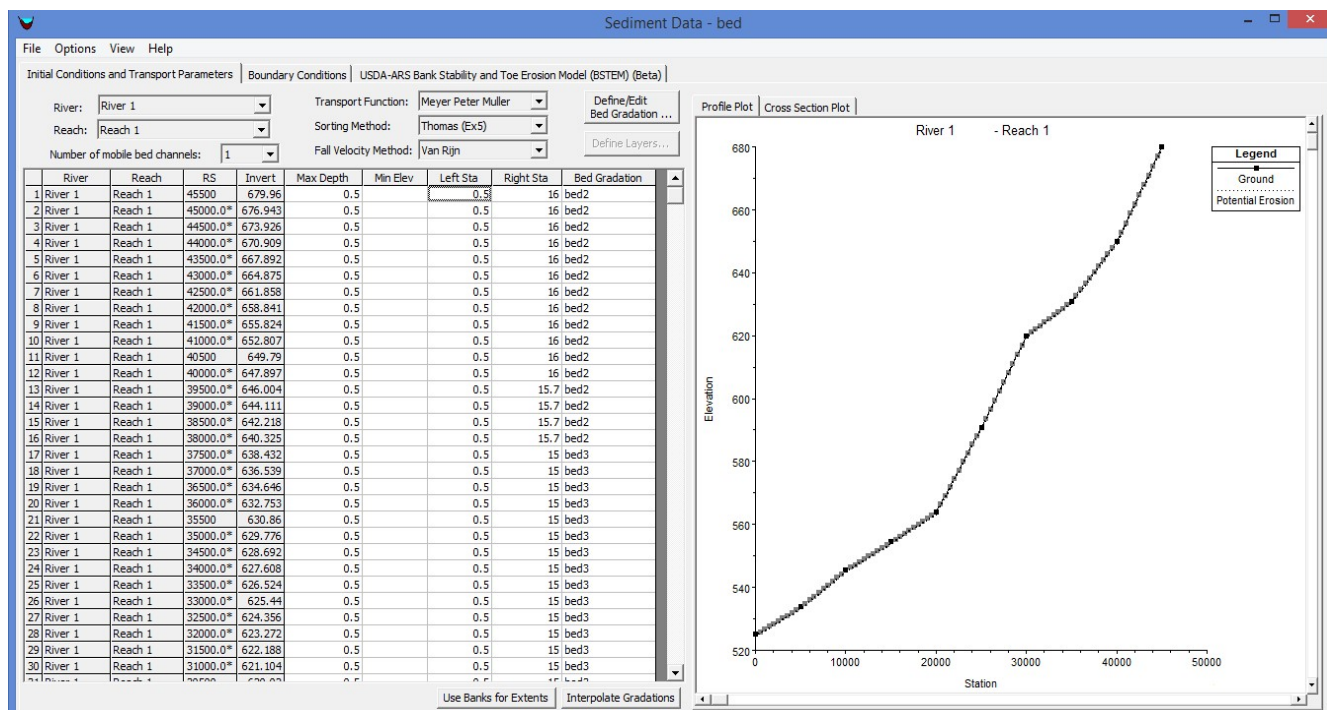
	Simulation Time	Elapsed Time (hours)	Flow Duration (hours)	Computation Increment (hours)	Flow (m3/s)
1	02Aug2017 0000	984	984	24	1.461
2	12Sep2017 0000	1848	864	24	1.053
3	18Oct2017 0000	2328	480	24	0.6
4	07Nov2017 0000	3168	840	24	5.204
5	12Dec2017 0000	4176	1008	24	11.927
6	23Jan2018 0000	5016	840	24	6.046
7	27Feb2018 0000	5520	504	24	7.56
8	20Mar2018 0000	7032	1512	24	4.814
9	22May2018 0000	7752	720	24	3.791
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					

☐ Compute computation increments based on flow

Plot ... OK Cancel

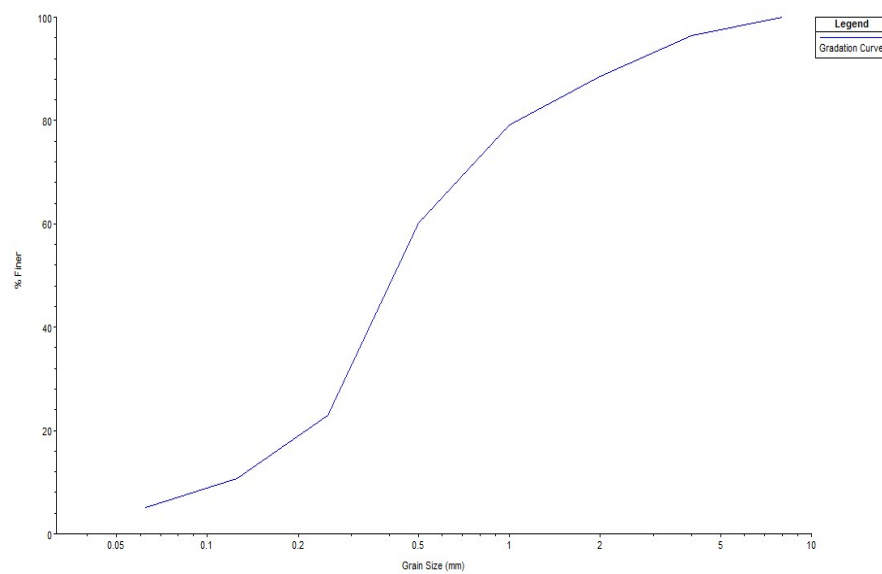
Fonte: Autor

Figura 66: Janela do editor de dados de sedimentos.



Fonte: Autor

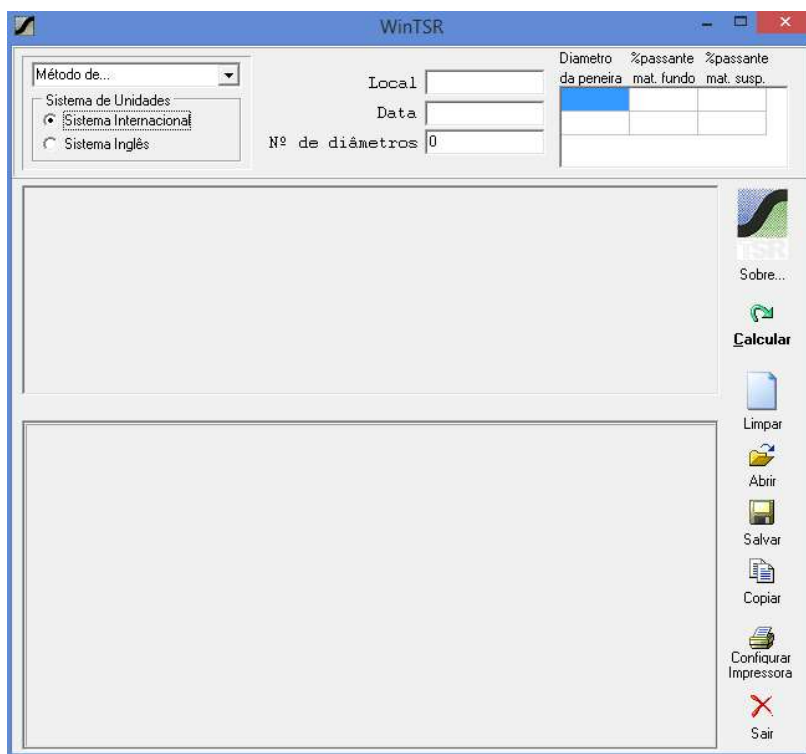
Figura 67: Exemplo da curva granulométrica gerada no editor de granulometria de sedimentos de leito.



Fonte: Autor.

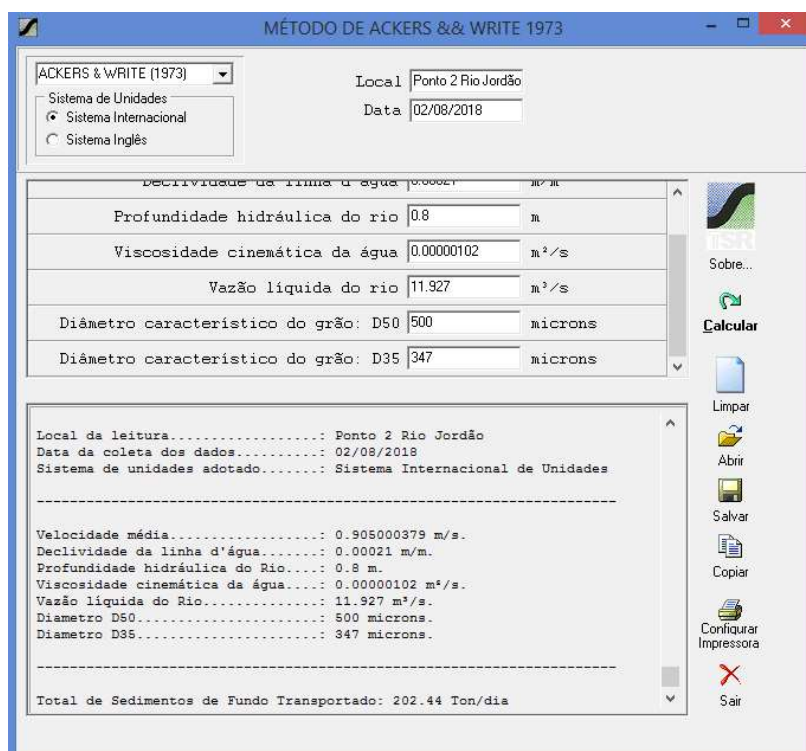
ANEXO B

Figura 68: Interface principal do programa WinTSR.



Fonte: Autor

Figura 69: Janela apresentando alguns dados de entrada e os resultados.



Fonte: Autor