UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS E ESTUDOS AMBIENTAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA ENGENHARIA AMBIENTAL

BRUNO BERNARDO DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL SUPORTE PARA
CÁLCULOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS E ESTATÍSTICOS**

São Carlos

2019

BRUNO BERNARDO DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL SUPORTE PARA
CÁLCULOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS E ESTATÍSTICOS**

Tese de Doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor em Ciências da Engenharia Ambiental.

Área de Concentração: Planejamento e Gerenciamento de Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Assoc. Frederico Fábio Mauad

São Carlos

2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

S898d Santos, Bruno Bernardo dos
Desenvolvimento de ferramenta computacional suporte
para cálculos hidrossedimentológicos e estatísticos /
Bruno Bernardo dos Santos; orientador Frederico Fábio
Mauad. São Carlos, 2019.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação e Área
de Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2019.

1. Sedimentos. 2. Hidrossedimentologia. 3.
Estatística. 4. Ferramenta computacional. 5. Visual
Basic for Applications. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **BRUNO BERNARDO DOS SANTOS**.

Título da tese: "Desenvolvimento de ferramenta computacional suporte para cálculos hidrossedimentológicos e estatísticos".

Data da defesa: 11/03/2019.

Comissão Julgadora:

Prof. Associado **Frederico Fabio Mauad**
(Orientador)

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Profa. Dra. **Danielle Caroline Schnitzler**

(Universidade Tecnológica Federal do Paraná/UTFPR)

Prof. Dr. **Teodorico Alves Sobrinho**

(Universidade Federal de Mato Grosso do Sul/UFMS)

Prof. Dr. **Tiago Zenker Gireli**

(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Dr. **Renato Billia de Miranda**

(Anhanguera Educacional)

Resultado:

Aprovado

Cyproado

Aprovado

Rejeitado

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental:

Prof. Associado **Frederico Fabio Mauad**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

Aos meus pais, **Celso** e
Nerilda, e meus irmãos,
Thiago e **Gabriela**
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela inteligência, capacidade de aprendizado, pela força para superar os mais difíceis obstáculos e por tudo que Ele me permite realizar.

Aos meus pais Celso Ramão Bernardes dos Santos e Nerilda Bernardo dos Santos por sempre me apoiarem nas minhas decisões, e que trabalharam muito para que eu alcançasse meus objetivos.

Ao meu orientador Frederico Fábio Mauad, pela orientação acadêmica, dedicação, paciência, amizade, confiança e disponibilidade para me auxiliar no desenvolvimento da pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudo (142305/2015-4) e pelo suporte financeiro que viabilizou esta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro no final da pesquisa.

À Fundação para o Incremento da Pesquisa e Aperfeiçoamento Industrial (FIPAI) e à empresa AES Tietê S.A., pelo financiamento do Projeto de P&D “Desenvolvimento, Validação e Aplicação de um Modelo Tri-Dimensional de Transporte de Sedimentos em Reservatórios Aplicado ao Cálculo e Elaboração de Projeções Futuras de Geração Hidrelétrica” (ANEEL PD-0064-1028/2011).

Ao Núcleo de Hidrometria do Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais da Escola de Engenharia de São Carlos (USP) pelo suporte instrumental e laboratorial na obtenção de dados para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do Núcleo de Hidrometria: Allita Rezende dos Santos, Angélica Ardengue de Araújo, Camila Bermond Ruezzene, Carlos Eduardo Nunes Medina Martinez, Claudio Bielenki Junior, Gabriela Leite Neves, Mariana Abibi Guimarães Araujo Barbosa, Paulo Roberto Bairros da Silva, Phelipe da Silva Anjinho e Denise Parizotto, pela amizade e sugestões durante os “Café com pesquisa”.

Um agradecimento especial aos meus amigos Renato Billia de Miranda, Tainá Thomassim Guimarães e Dalva Maria de Castro Vitti pelos conselhos e sugestões. Sem dúvidas a contribuição de vocês foi essencial para o andamento desta tese.

Aos meus amigos Tiago Maretti Gonçalves e Maria Dalma Dutra pela amizade e companheirismo essencial para minha formação pessoal e profissional.

Aos funcionários do Núcleo de Hidrometria do Centro de Ciências da Engenharia Aplicada ao Meio Ambiente da Escola de Engenharia de São Carlos (USP)

Ao Professor Teodorico Alves Sobrinho pelas sugestões e considerações que foram muito importantes neste estudo.

Em suma, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta tese.

RESUMO

SANTOS, Bruno Bernardo dos. **Desenvolvimento de ferramenta computacional suporte para os cálculos hidrossedimentológicos e estatísticos**. 2019. 273 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Apesar da complexidade envolvendo a compreensão dos processos hidrossedimentológicos, o conhecimento da quantidade de sedimentos transportados pelos rios é importante para o planejamento e aproveitamento dos recursos hídricos e não deve ser ignorado. Além disso, a quantidade de dados obtidos em monitoramentos é significativa, e o entendimento dessas variáveis requer obrigatoriamente análises estatísticas. Com base na dificuldade em relacionar hidrossedimentologia com estatística, buscou-se com esse trabalho desenvolver uma ferramenta computacional gratuita e de código aberto em *Visual Basic for Applications* (VBA) integrando métodos de cálculos hidrossedimentológicos e estatísticos. Ela permite que o usuário calcule descarga sólida em suspensão, descarga sólida total, e realize testes estatísticos como, teste Kolmogorov-Smirnov de normalidade dos dados, testes paramétricos F de Fisher-Snedecor e T de Student, além do teste não-paramétrico Wilcoxon. A ferramenta computacional (NH *Sediment and Statistic*) foi aplicada em dados obtidos em medições de características hidráulicas, da concentração de sedimentos em suspensão, turbidez e temperatura do reservatório da Pequena Central Hidrelétrica de Mogi-Guaçu (SP). Desse modo, a ferramenta utilizada para o suporte às análises hidrossedimentológicas alcançou resultados equivalentes a outros *softwares* para cada um dos módulos desenvolvidos, se mostrando confiável e de fácil aplicação. Destaca-se, por fim, que a ferramenta pode ser aplicada em outras áreas de estudo permitindo planejamento e gerenciamento completo de recursos hídricos, assim como outras áreas do conhecimento.

Palavras-chave: Sedimentos. Hidrossedimentologia. Estatística. Ferramenta computacional. Visual basic for applications.

ABSTRACT

SANTOS, Bruno Bernardo dos. **Development of computational tool support for hydrosedimentological and statistical calculations.** 2019. 273 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Despite the complexity that involves the understanding of hydrosedimentological processes, the knowledge of the amount of sediment transported by rivers is fundamental for the planning and utilization of water resources. The amount of data obtained from the monitoring is significant, and the understanding of such variables requires statistical analyses. This paper addresses the development of a free and open-source computational tool in Visual Basic for Applications (VBA) that integrates methods of hydrosedimentological and statistical calculations and relates hydrosedimentology to statistics. Users can calculate solid suspended discharge and total solid discharge and perform important statistical tests, such as Kolmogorov-Smirnov normality test, Fisher-Snedecor and Student T parametric tests, and Wilcoxon non-parametric test. The computational tool (NH Sediment and Statistic) was applied to data obtained from measurements of hydraulic characteristics, suspended sediment concentration, turbidity and reservoir temperature of the Mogi-Guaçu Small Hydroelectric Power Plant. It supports hydrosedimentological analyses and yielded results equivalent to those of other software for each module developed. It also proved reliable and of easy application and provides a friendly interface. It can be applied to other areas of study for a complete planning and management of water resources, as well as other areas of knowledge.

Keywords: Sediments. Hydrosedimentology. Statistic. Computational tool. Visual basic for applications.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de produção de sedimentos no Brasil	41
Figura 2 – Mapa de produção de sedimentos em parte da América do Sul	41
Figura 3 – Variações no transporte de sedimentos em corpos hídricos	43
Figura 4 – Curva de Hjulstöm	44
Figura 5 – Comparativo dos tamanhos de sedimento em relação às propriedades dominantes	45
Figura 6 – Distribuição vertical do sedimento	47
Figura 7 – Perfis de velocidade e concentração em uma seção transversal de um rio	47
Figura 8 – Descarga líquida média anual e descarga sólida em suspensão em Óbidos no rio Amazonas entre 1996 e 2007	49
Figura 9 – Tipos de depósitos em reservatórios e as principais consequências	52
Figura 10 – Distribuição espacial da média anual de perda da capacidade de reservatórios em diferentes níveis do rio Yangtze (China).....	54
Figura 11 – Avanço do assoreamento no reservatório Wushe (Taiwan).....	55
Figura 12 – Princípio de funcionamento de um ADCP.....	66
Figura 13 – Exemplo de equipamento a laser (LISST-100X).....	68
Figura 14 – Diferentes tipos de regiões críticas conforme hipóteses nulas e alternativas.....	72
Figura 15 - Critérios de rejeição ou não de hipótese nula com base no p-valor para testes bilaterais ..	73
Figura 16 – Função densidade de probabilidade de uma variável aleatória normal com média μ e desvio padrão σ	74
Figura 17 – Critérios de rejeição da Hipótese nula para o teste Qui-Quadrado	80
Figura 18 – Região crítica para um dado nível de significância α para a distribuição Fisher-Snedecor	82
Figura 19 – Pontos críticos e região crítica da distribuição t de Student	86
Figura 20 – Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo	91
Figura 21 – Compartimentos da Bacia Hidrográfica do Rio Mogi-Guaçu	92
Figura 22 – Mapa dos solos do estado de São Paulo destacando a UGRHI 9	93
Figura 23 – Mapa de uso do solo da Bacia Hidrográfica do rio Mogi-Guaçu	94
Figura 24 – Mapa de suscetibilidade à erosão da UGRHI 9	95
Figura 25 – Uso e ocupação no entorno do reservatório de Mogi-Guaçu.....	96
Figura 26 – Vista aérea da PCH Mogi-Guaçu.....	97
Figura 27 – Localização dos pontos de amostragem.....	98
Figura 28 - Preparação e montagem da LISST e da bateria na gaiola de proteção (Esquerda); Montagem e troca de baterias do ADCP (Direita)	99
Figura 29 – Plataforma catamarã construída visando a segurança das atividades de campo no reservatório de Mogi-Guaçu.....	100
Figura 30 – Esquema de montagem do ADCP junto da antena do GPS na parte interna do catamarã (Esquerda); e destaque para o ADCP sem estar submerso (Direita)	101
Figura 31 – Seções transversais e locais de amostragem de perfis verticais	101
Figura 32 – Macrófitas junto à barragem durante o experimento de campo 2 (março de 2014).....	102
Figura 33 – Proteção da sonda multiparâmetro e LISST-100X para amostragem.....	103
Figura 34 – Amostrador de sedimentos em suspensão (Garrafa Van Dorn)	103
Figura 35 – Amostragens de sedimentos e turbidez: superfície (Esquerda); Equipamentos submersos (Direita).....	104
Figura 36 – Destaque aos computadores (toughbooks) armazenando em tempo real os dados de concentração e turbidez medidos pelas sondas	104
Figura 37 – Amostras encaminhadas ao Núcleo de Hidrometria (CRHEA/USP)	105

Figura 38 – Método de filtração destacando bomba à vácuo utilizado no processo	106
Figura 39 – Ábaco 1: Obtenção da descarga sólida não medida por metro de largura do rio a partir da velocidade média	110
Figura 40 – Obtenção de equação para o Ábaco 1 do Método simplificado de Colby (1957)	111
Figura 41 – Ábaco 2: Obtenção da concentração relativa a partir da velocidade média e da profundidade média do curso d'água.....	112
Figura 42 – Ábaco 3: Obtenção do fator de correção em função da razão de eficiência.....	114
Figura 43 – Relação para estimativa do p-valor para situações com D^* entre 0,47 e 1,035	120
Figura 44 – Relação para estimativa do p-valor para situações com D^* superior a 1,035	120
Figura 45 – Regressões da distribuição exata de Wilcoxon para tamanho amostral $n=7$	126
Figura 46 – Vazão e velocidade estimadas: Medição 2 da Seção 1 na primeira campanha (Esquerda); Medição 1 da Seção 1 na segunda campanha (Direita)	128
Figura 47 – Vazão e velocidade estimadas: Medição 1 da Seção 8 na primeira campanha (Esquerda); Medição 3 da Seção 8 na segunda campanha (Direita)	128
Figura 48 – Vazão e velocidade estimadas: Medição 4 da Seção 12 na primeira campanha (Esquerda); Medição 3 da Seção 12 na segunda campanha (Direita)	129
Figura 49 – Vazão e velocidade estimadas: Medição 1 da Seção 16 na primeira campanha (Esquerda); Medição 3 da Seção 16 na segunda campanha (Direita)	129
Figura 50 – Vazão e velocidade estimadas: Medição 3 da Seção 20 na primeira campanha (Esquerda); Medição 1 da Seção 19 na segunda campanha (Direita)	129
Figura 51 – Tela inicial da Ferramenta Computacional NH Sediment and Statistic	138
Figura 52 – Tela de seleção do método hidrossedimentológico.....	138
Figura 53 – Tela de cálculo da descarga sólida em suspensão	139
Figura 54 – Tela de estimativa da descarga sólida total pelo método simplificado de Colby (1957) .	140
Figura 55 – Cálculo da descarga sólida total em diferentes seções (Campanha 1)	141
Figura 56 – Ponto de "lavagem" da areia dragada.....	142
Figura 57 – Cálculo da descarga sólida total em diferentes seções (Campanha 2)	143
Figura 58 – Tela inicial do software WinTSR.....	144
Figura 59 – Tela inicial da Ferramenta Computacional NH Sediment.....	145
Figura 60 – Tela de seleção do módulo estatístico (Esquerda); Tela de seleção do teste estatístico (Direita)	152
Figura 61 – Fluxograma do processo de organização dos dados de sólidos suspensos e turbidez obtidos	153
Figura 62 – Fluxograma da metodologia adotada para verificação das Regressões lineares	154
Figura 63 – Fluxograma da metodologia aplicada na realização dos testes estatísticos paramétricos e não-paramétricos	155
Figura 64 – Correlações entre Turbidez e SS_C em relação ao dia de amostragem (Cenário 1)	159
Figura 65 - Correlações entre Turbidez e SS_C em relação ao setor do reservatório de Mogi-Guaçu (Cenário 1).....	160
Figura 66 – Correlações entre Turbidez e SS_C em relação ao setor do reservatório de Mogi-Guaçu (Cenário 1).....	160
Figura 67 – Correlações entre SS_L e SS_C em relação ao dia de amostragem (Cenário 2)	161
Figura 68 – Correlações entre SS_L e SS_C em relação ao setor do reservatório de Mogi-Guaçu (Cenário 2).....	162
Figura 69 – Correlações entre SS_L e SS_C em relação ao setor do reservatório de Mogi-Guaçu (Cenário 2).....	162
Figura 70 – Tela para realização do teste Kolmogorov-Smirnov para normalidade destacando a área com os resultados	168

Figura 71 – Teste de Normalidade aplicado aos Resíduos R-C1-1A destacando os principais resultados da Ferramenta NHSS.....	169
Figura 72 – Teste de Normalidade aplicado aos Resíduos R-C2-1A destacando os principais resultados da Ferramenta NHSS.....	170
Figura 73 – Teste de Normalidade aplicado aos Resíduos R-C1-1C destacando os principais resultados da Ferramenta NHSS.....	171
Figura 74 – Teste de Normalidade aplicado aos Resíduos R-C2-1C destacando os principais resultados da Ferramenta NHSS.....	171
Figura 75 – Teste de normalidade aplicado ao SS_C do Cenário 1 destacando os resultados obtidos na Ferramenta NHSS	173
Figura 76 – Teste de normalidade aplicado ao SS_C do Cenário 2 destacando os resultados obtidos na Ferramenta NHSS	174
Figura 77 – Tela inicial do módulo estatístico para Teste de variância da Ferramenta Computacional NHSS.....	176
Figura 78 – Aplicação do teste F para comparação dos dados de concentração SS_C C1 e SS_E C1-1A ilustrando os resultados fornecidos pela ferramenta computacional NHSS.....	177
Figura 79 – Resultados do teste de variâncias para SS_C C2 versus SS_E C2-1A (Esquerda) e SS_C C2 versus SS_E C2-1B (Direita)	178
Figura 80 – Tela do Teste paramétrico de médias da Ferramenta Computacional NHSS	179
Figura 81 – Tela do teste não-paramétrico de medianas da Ferramenta Computacional NHSS.....	180
Figura 82 – Aplicação do teste T pareado para comparação das médias dos dados de concentração SS_C C1 e SS_E C1-1A ilustrando os resultados fornecidos pela ferramenta computacional NHSS	181
Figura 83 – Aplicação do teste Wilcoxon pareado para comparação das medianas dos dados de concentração SS_C C1 e SS_E C1-2 ilustrando os resultados fornecidos pela ferramenta computacional NHSS.....	182
Figura 84 – Tela inicial da planilha de cálculo dos parâmetros estatísticos.....	185
Figura 85 – Resultados de índices estatísticos para o Cenário 1	186
Figura 86 – Resultados de índices estatísticos para o Cenário 2.....	186
Figura 87 – Teste de normalidade para os dados de temperatura T1A	188
Figura 88 – Resultados da comparação de variâncias obtidos com a ferramenta NHSS:	190
Figura 89 – Alguns resultados da comparação de médias obtidos com a ferramenta computacional NHSS para o cenário 3.....	191
Figura 90 – Alguns resultados da comparação de medianas obtidos com a ferramenta computacional NHSS para o cenário 3.....	191
Figura 91 – Resultados do teste de normalidade para o resíduo R-C1-1A obtidos pelo software R ..	193
Figura 92 – Resultados do teste de normalidade para o resíduo R-C1-1A obtidos pelo software Minitab	193
Figura 93 - Parte do código do teste de normalidade referente à conclusão do teste.....	197
Figura 94 – Resultados do teste F para os dados SS_C C1 vs. SS_E C1-1A obtidos pelo software R.....	198
Figura 95 – Resultados do teste F para os dados SS_C C1 vs. SS_E C1-1A obtidos pelo software Minitab	198
Figura 96 – Resultados do teste T de Student para os dados SS_C C1 vs. SS_E C1-1A obtidos pelo software R	201
Figura 97 – Resultados do teste T de Student para os dados SS_C C1 vs. SS_E C1-1A obtidos pelo software Minitab	201
Figura 98 – Resultados do teste Wilcoxon para os dados SS_C C1 vs. SS_E C1-2 obtidos pelo software R	203

Figura 99 – Resultados do teste Wilcoxon para os dados SSC C1 vs. SSE C1-2 obtidos pelo software Minitab	204
Figura 100 – Resultados do teste Wilcoxon para os dados de temperatura T6C x T12C obtidos pelo software R.....	206
Figura 101 - Parte do código referente ao teste Wilcoxon na Ferramenta computacional NHSS	206
Figura 102 - Tela inicial do manual da ferramenta computacional	207
Figura 103 – Descrição do cálculo de parâmetros estatísticos implementado no manual da ferramenta computacional.....	208

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos sedimentos quanto ao tamanho da partícula	46
Tabela 2 – Previsões sobre o fluxo de sedimentos para a zona costeira do mundo sob condições modernas e pré-humanas	50
Tabela 3 – Assoreamento de grandes reservatórios da bacia hidrográfica de Souss-Massa em Marrocos	54
Tabela 4 – Volumes mínimos das amostras necessárias para análise da concentração média de sedimentos em suspensão.....	59
Tabela 5 – Comparação da descarga sólida estimada e medida.....	63
Tabela 6 – Compartimentos da bacia hidrográfica de Mogi Guaçu.....	92
Tabela 7 – Distribuição dos usos do solo em porcentagem na UGRHI 9	94
Tabela 8 – Valores estimados de A e B para o cálculo da concentração relativa em função da profundidade	112
Tabela 9 – Valores críticos da estatística D_n apresentados por Lilliefors (1967) e utilizada na ferramenta computacional.....	117
Tabela 10 - Características hidráulicas médias do reservatório de Mogi-Guaçu (Campanha 1).....	132
Tabela 11 - Características hidráulicas médias do reservatório de Mogi-Guaçu (Campanha 2).....	132
Tabela 12 – Descargas líquidas, concentrações de sedimentos em suspensão médias, e descarga sólida em suspensão no Reservatório de Mogi-Guaçu	139
Tabela 13 – Síntese dos dados de descarga sólida total obtidos na Ferramenta Computacional NHSS (Campanha 1).....	141
Tabela 14 – Síntese dos dados obtidos na Ferramenta Computacional NHSS (Campanha 2).....	143
Tabela 15 – Comparações entre os valores de descarga sólida total (Qst) obtidos na Ferramenta Computacional NHSS e no software WinTSR (Campanha 1).....	145
Tabela 16 – Comparações entre os valores de descarga sólida total (Qst) obtidos na Ferramenta Computacional NHSS e na Ferramenta NH Sediment (Campanha 1).....	146
Tabela 17 – Comparações entre os valores de descarga sólida total (Qst) obtidos na Ferramenta Computacional NHSS e no software WinTSR (Campanha 2).....	147
Tabela 18 – Comparações entre os valores de descarga sólida total (Qst) obtidos na Ferramenta Computacional NHSS e na Ferramenta NH Sediment (Campanha 2).....	148
Tabela 19 – Resultados do Teste Kolmogorov-Smirnov para normalidade dos Resíduos	172
Tabela 20 – Resultados do Teste Kolmogorov-Smirnov para normalidade dos dados de concentração de sedimentos em suspensão medidos e estimados.....	174
Tabela 21 – Resumo dos resultados do teste F obtidos na Ferramenta Computacional NHSS	178
Tabela 22 – Resumo dos resultados do teste T de Student obtidos na Ferramenta Computacional NHSS.....	183
Tabela 23 – Resumo dos resultados do teste Wilcoxon obtidos na Ferramenta Computacional NHSS	183
Tabela 24 - Resultados dos parâmetros estatísticos aplicados sintetizados	186
Tabela 25 – Síntese dos resultados do teste de normalidade para o Cenário 3 obtidos por meio da ferramenta computacional NHSS.....	189
Tabela 26 – Síntese dos resultados do teste F obtidos na Ferramenta Computacional NHSS para os dados normais do Cenário 3	190
Tabela 27 – Síntese dos resultados do teste T de Student obtidos na Ferramenta Computacional NHSS para os dados normais do Cenário 3.....	192

Tabela 28 – Síntese dos resultados do teste Wilcoxon obtidos na Ferramenta Computacional NHSS para os dados não-normais do Cenário 3.....	192
Tabela 29 – Comparações entre os valores de Estatística Kolmogorov-Smirnov (Dn) obtidos na Ferramenta Computacional NHSS, no software livre R e no software Minitab para os Cenários 1 a 3	194
Tabela 30 – Comparações entre os p-valores do teste Kolmogorov-Smirnov obtidos na Ferramenta Computacional NHSS, no software livre R e no software Minitab para os Cenários 1 a 3	195
Tabela 31 – Comparações entre os valores de Estatística F obtidos na Ferramenta Computacional NHSS, e nos softwares R e Minitab	199
Tabela 32 – Comparações entre os p-valores obtidos na Ferramenta Computacional NHSS, e nos softwares R e Minitab.....	199
Tabela 33 – Comparações entre os valores de Estatística T de Student obtidos na Ferramenta Computacional NHSS, no software livre R e no software Minitab.....	202
Tabela 34 – Comparações entre os p-valores obtidos na Ferramenta Computacional NHSS, no software livre R e no software Minitab para o teste T de Student.....	202
Tabela 35 – Comparações entre os valores de Estatística T^+ de Wilcoxon obtidos na Ferramenta Computacional NHSS, no software livre R e no software Minitab.....	204
Tabela 36 – Comparações entre os p-valores do teste Wilcoxon obtidos na Ferramenta Computacional NHSS, no software livre R e no software Minitab	205

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais agentes erosivos e tipos de erosão	39
Quadro 2 – Classificações do transporte de sedimentos	44
Quadro 3 – Métodos de medição de sedimentos.....	57
Quadro 4 – Classificação das metodologias de estimativas das descargas sólidas de leito e total	61
Quadro 5 – Descrição dos métodos de estimativa da descarga sólida	62
Quadro 6 – Relação de CSS versus Turbidez encontrada na literatura.....	65
Quadro 7– Classificação da função distribuição acumulada.....	76
Quadro 8 – Analogias dos testes não-paramétricos para os procedimentos conhecidos paramétricos .	79
Quadro 9 – Característica técnicas da Pequena Central Hidrelétrica Mogi-Guaçu.....	97
Quadro 10 – Coletas de campo	99
Quadro 11 – Medições das características hidráulicas das seções do reservatório de Mogi-Guaçu na primeira campanha	130
Quadro 12 – Medições das características hidráulicas das seções do reservatório de Mogi-Guaçu na segunda campanha	131
Quadro 13 – Resultados das amostras de concentração de sedimentos em suspensão da primeira campanha de campo	132
Quadro 14 – Resultados das amostras de concentração de sedimentos em suspensão da segunda campanha de campo	133
Quadro 15 – Dados de turbidez obtidos com a sonda multiparâmetro no reservatório de Mogi-Guaçu	134
Quadro 16 – Dados de SS_L obtidos com a sonda LISST-100X no reservatório de Mogi-Guaçu	135
Quadro 17 – Dados de temperatura da água do reservatório de Mogi-Guaçu no dia 27/01/2014	136
Quadro 18 – Dados de temperatura da água do reservatório de Mogi-Guaçu no dia 29/01/2014	136
Quadro 19 – Dados de temperatura da água do reservatório de Mogi-Guaçu no dia 20/03/2014	137
Quadro 20 – Comparações das descargas sólidas totais para as duas campanhas	150
Quadro 21 – Dados de turbidez e SS_C (Cenário 1 – C1)	156
Quadro 22 – Dados de turbidez e SS_C (Cenário 2 – C2)	157
Quadro 23– Critérios de divisão dos dados de Turbidez e SS_C (Cenário 1)	158
Quadro 24 – Critérios de divisão dos dados de SS_L e SS_C (Cenário 2)	158
Quadro 25– Coeficientes de determinação (R^2) e as respectivas equações de cálculo do SS_E para o Cenário 1	163
Quadro 26 – Coeficientes de determinação (R^2) e as respectivas equações de obtenção de SS_E para o Cenário 2	163
Quadro 27 – Dados medidos e estimados de concentração de sedimentos em suspensão e os respectivos resíduos para o Cenário 1	164
Quadro 28 – Comparação dos dados medidos e estimados de concentração de sedimentos em suspensão para o Cenário 2	166
Quadro 29 – Recomendações dos métodos de estimativa da concentração de sedimentos em suspensão	184
Quadro 30 – Pares de dados do Cenário 3 aplicados aos testes paramétricos e não-paramétricos	189
Quadro 31 - Parte da distribuição exata T^+ do teste Wilcoxon	205
Quadro 32 – Distribuição normal padrão $Z \sim N(0,1)$ para valores z negativos e positivos	227
Quadro 33 – Valores críticos da estatística Kolmogorov-Smirnov para uma amostra	229
Quadro 34 – Valores críticos da distribuição Qui-Quadrado	230
Quadro 35 – Valores críticos da cauda direita da distribuição F de Fisher-Snedecor.....	232

Quadro 36 – Valores críticos da cauda esquerda da distribuição F de Fisher-Snedecor	233
Quadro 37 – Valores críticos da distribuição T de Student para testes bilaterais e unilaterais	235
Quadro 38 – Valores críticos da distribuição exata da estatística Wilcoxon*	236

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>
AGU	<i>American Geophysical Union</i>
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APHA	<i>American Public Health Association</i>
ASPRS	<i>American Society Photogrammetry and Remote Sensing</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBH	Comitê de Bacia Hidrográfica
CESP	Companhia Energética de São Paulo
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CRHEA	Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EUROSEM	<i>European Soil Erosion Model</i>
FIPAI	Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IID	Igual Incremento de Descarga
IIL	Igual Incremento de Largura
ISO	<i>International Standardization Organization</i>
KINEROS	<i>Kinematic Runoff and Erosion</i>
LISST	<i>Laser in Situ Scattering and Transmissiometry</i>
NHSS	<i>NH Sediment and Statistic</i>
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
P&D	Pesquisas & Desenvolvimento
RNA	Redes Neurais Artificiais
RUSLE	<i>Revised Universal Soil Loss Equation</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SSIIM	<i>Sediment Simulation in In-Takes with multiblock option</i>

UGRHI	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
USLE	<i>Universal Soil Loss Equation</i>
USP	Universidade de São Paulo
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>
WEPP	<i>Water Erosion Prediction Project</i>
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

%: porcentagem;

% .ano⁻¹: porcentagem ao ano – unidade de taxa;

<: menor que;

>: maior que;

≤: menor ou igual;

≥: maior ou igual;

°C: grau Celsius - unidade de temperatura;

∞: infinito;

A(α) e B(α): coeficientes linear e angular da estimativa de C(n,α) – Equações 80 e 81;

A: variável definida de acordo com a profundidade média (adimensional) – Equação 65;

ABS: *Backscatter* (Hz);

ano: unidade de tempo equivalente a 3,154.10⁷ s;

B: variável definida de acordo com a profundidade média (adimensional) – Equação 65;

C(n,α): valor crítico do teste de normalidade obtido por aproximação – Equação 79;

C: concentração de sedimentos no volume elementar espacial (mg.L⁻¹) – Equação 59;

CA: coeficiente de ajuste – Equação 110;

Cd: Cádmio – Elemento químico classificado como metal de transição (Família 2B);

cm: centímetro – unidade de comprimento equivalente a 0,01 m;

CMR: coeficiente de massa residual – Equação 112;

Cr: concentração relativa (mg.L⁻¹) – Equação 65;

CSS: concentração de sedimentos em suspensão (mg.L⁻¹) – Equações 1, 58, 60 e 62;

CSS_v: concentração de sedimento em suspensão em volume (μL.L⁻¹) – Equação 1;

Cu: Cobre – Elemento químico classificado como metal de transição (Família 1B);

D*: estatística D_n modificada – Equações 78 e 82;

d: densidade ou massa específica do sedimento (g.cm⁻³) – Equação 1;

D_{crit}: valor crítico para o teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov em função de n e α – Equações 14 e 75;

D_n: valor da estatística Kolmogorov-Smirnov para o teste de normalidade – Equações 13 e 14, 71, 74, 75, 77, 78 e 82;

$\bar{D}$: média das diferenças D₁, D₂, ..., D_n – Equações 37, 38 e 90;

E(T⁺|θ = θ₀) ou E(T⁺): média da distribuição exata T⁺ sob a hipótese nula – Equações 52, 54, 98, 100, 101 e 108;

EF: eficiência – Equação 111;

F: valor da estatística F de Fisher-Snedecor – Equações 22, 85, 86, 87 e 88;

$F_N(x_i)$: Função distribuição acumulada empírica dos dados – Equações 8, 10, 11, 68, 71 e 72;

$F(x_i)$ ou z_i : Função distribuição acumulada empírica dos dados – Equações 10 a 12, 14, e 70 a 73;

$F_N(x_{(i-1)})$: Elemento anterior $i - 1$ da função distribuição acumulada empírica dos dados – Equações 12 e 73;

F_α e $F_{1-\alpha}$: valores críticos respectivamente à esquerda e à direita da distribuição F de Fisher-Snedecor;

F_{critD} : valor crítico à direita da distribuição F de Fisher-Snedecor – Equações 84 e 86;

F_{critE} : valor crítico à esquerda da distribuição F de Fisher-Snedecor – Equações 83 e 86;

g: grama – unidade de massa;

GL1: graus de liberdade da amostra 1 – Equações 83, 84, 87, 88, e 91 a 93;

GL2: graus de liberdade da amostra 2 – Equações 83, 84, 87 e 88;

h: hora – unidade de tempo equivalente a 3.600 s

ha: hectare – unidade de área equivalente a 10.000 m²;

H_a : Hipótese alternativa de um teste estatístico – Equações 2 a 4, 7, 14 a 17, 19 a 21, 23 a 25, 27 a 29, 34 a 36, 39 a 41, 75 e 94;

hm³: hectômetro cúbico – unidade de volume equivalente a 10⁶ m³;

H_o : Hipótese nula de um teste estatístico – Equações 2 a 4, 5, 7, 14 a 17, 19 a 21, 23 a 25, 27 a 29, 34 a 36, 39 a 41, 75 e 94;

i: índice de O e P – Equações 110 a 115;

i: índice que denota classificação dos elementos estatísticos da amostra – Equações 8 e 68;

J: Joule – unidade de energia equivalente a 1 kg.m².s⁻²;

k: fator de correção (adimensional) – Equações 63 e 67;

kg: quilograma – unidade de massa equivalente a 1.000 g;

kHz: quilohertz – unidade de frequência equivalente a 1.000 hertz;

km.km⁻²: densidade de drenagem;

km: quilometro – unidade de comprimento equivalente a 10³ m;

km²: quilometro quadrado – unidade de área equivalente a 10⁶ m²;

KS: Teste Kolmogorov-Smirnov;

kV: quilovolt – unidade de tensão elétrica equivalente a 10³ V;

kW: quilowatt – unidade de potência equivalente a 10³ W;

L: largura da seção amostrada (m) – Equação 63;
 L: Litro – unidade de volume equivalente a 0,001 m³;
 m.s⁻¹: metro por segundo – unidade de velocidade;
 m: metro – unidade de comprimento;
 m²: metro quadrado – unidade de área superficial;
 m³: metro cúbico – unidade de volume;
 m³.s⁻¹: metro cúbico por segundo – unidade de vazão;
 MD: diferença média – Equação 115;
 ME: erro máximo – Equação 114;
 mg.L⁻¹: miligrama por Litro – unidade de concentração;
 mg: miligrama – unidade de massa equivalente a 0,001 gramas;
 MJ: Megajoules – unidade de energia equivalente a 10⁶ J;
 mm.ano⁻¹: milímetro por ano – unidade de precipitação;
 mm: milímetro – unidade de comprimento equivalente a 0,001 m;
 Mm³: Mega metro cúbico – unidade de volume equivalente a 10⁶ m³;
 Mt.ano⁻¹: milhões de toneladas por ano;
 Mt: milhões de toneladas – unidade de massa equivalente a 10⁹ gramas;
 MW: megawatt – unidade de potência equivalente a 10⁶ W;
 MWh: Megawatt hora – unidade de energia elétrica equivalente a 10⁶ Wh;
 n.: número;
 n: tamanho da amostra – Equações 8, 18, 26, 37, 38, 48 e 49, 52 e 53, 68, 77 a 79, 90, 98 e 99, 102, 104, 105, 108 a 115;
 n₁: tamanho amostral da população 1 – Equações 30 a 33;
 n₂: tamanho amostral da população 2 – Equações 30 a 33;
 Ni: Níquel – Elemento químico classificado como metal de transição (Família 8B);
 NTU: Unidade Nefelométrica de Turbidez;
 $\bar{O}$: média dos valores observados – Equações 110 e 111;
 O_i: valor observado – Equações 110 a 115;
 p.: página;
 $\mathbb{P}$: denotação matemática para probabilidade;
 p: probabilidade da distribuição da estatística D_n – Equações 76 e 77;
 p: profundidade (m);
 P1: massa do filtro (g) – Equação 58;
 P2: massa do material filtrado mais o filtro (g) – Equação 58;

Pb: Chumbo – Elemento químico classificado como outros metais (Família 4A);

pH: potencial hidrogeniônico;

Pi: valor estimado – Equações 110 a 115;

ppm: partes por milhão;

p-valor: probabilidade de significância – Equações 5, 49 a 51, 55 a 57, 76, 82, 89, 93, 107 e 109;

Q: descarga líquida ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) – Equações 60 e 62;

q'_{nm} : descarga sólida não medida por metro de largura ($\text{t} \cdot \text{dia}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) – Equações 63 e 64;

Q_{nm} : descarga sólida não-medida ($\text{t} \cdot \text{dia}^{-1}$) – Equações 61 e 63;

Q_{sm} : descarga sólida medida ($\text{t} \cdot \text{dia}^{-1}$) – Equações 61 e 62;

Q_{ss} : descarga sólida em suspensão ($\text{t} \cdot \text{dia}^{-1}$) – Equações 59 e 60;

Q_{st} : descarga sólida total ($\text{t} \cdot \text{dia}^{-1}$) – Equação 61;

R^2 : coeficiente de determinação;

R_e : razão de eficiência (adimensional) – Equações 66 e 67;

Resíduo R: diferença entre SS_C e SS_E ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) – Equação 116;

R_i : rank associado a um dado Z_i – Equações 43, 95, 104 e 105;

RMSD: desvio do quadrado médio da raiz – Equação 113;

s: desvio padrão amostral – Equações 9, 26 e 69;

s: segundo – unidade de tempo;

s_D : desvio padrão amostral das diferenças $D_1, D_2, \dots, D_n$ – Equações 37 e 90;

s_p : desvio padrão amostral agrupado – Equações 30 e 31;

s^2 : variância amostral – Equação 18;

s_1^2 : variância amostral referente a população 1 – Equações 31 a 33, e 85;

s_2^2 : variância amostral referente a população 2 – Equações 31 a 33, e 85;

s_D^2 : variância amostral das diferenças $D_1, D_2, \dots, D_n$ – Equação 38;

SS_C : concentração de sólidos suspensos obtidos convencionalmente ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) – Equação 116;

SS_E : concentração de sólidos suspensos estimados ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) – Equação 116;

SS_L : concentração de sólidos suspensos obtidos com a sonda LISST-100X ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

$\text{t} \cdot \text{dia}^{-1}$: toneladas por dia;

$\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$: tonelada por hectare por ano;

$\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$: tonelada por quilometro quadrado por ano;

t: tonelada – unidade de massa equivalente a 1.000 gramas;

T: valor da estatística T de *Student* para o teste de hipótese para médias – Equações 26, 30, 32, 37, 90 a 94;

T^+ : valor da estatística do teste Wilcoxon – Equações 43, 95, 99 a 101, 103, 108 e 109;
 t_{inf} e t : valor crítico inferior da distribuição exata da estatística T^+ – Equações 47, 48, 49 a 51, 97, 101 a 103;
 t_{sup} : valor crítico superior da distribuição exata da estatística T^+ – Equações 48, 49, 102 e 103;
 t_α (t_{crit}) e $-t_\alpha$ ($-t_{crit}$): valores críticos da distribuição T de Student – Equações 91, 92 e 94;
 U : velocidade de partículas de sedimento através da área elementar dA ($m.s^{-1}$) – Equação 59;
 v : volume;
 V : velocidade média ($m.s^{-1}$) – Equações 64 e 65;
 V : volume filtrado da amostra (L) – Equação 58;
 $Var(T^+|\theta = \theta_0)$ ou $Var(T^+)$: variância da distribuição exata T^+ sob a hipótese nula – Equações 53, 54, 99, 100, 101 e 108;
 W : Watt – unidade de potência;
 Wh : Watt hora – unidade de energia elétrica que indica a taxa de potência consumida durante o tempo;
 w_i : valor da distribuição normal padrão utilizado para cálculo de $F(x_i)$ – Equações 9, 69 e 70;
 X : variável aleatória contínua da população 1 na estatística;
 $X \sim N(0,1)$: distribuição normal padrão;
 $\bar{X}$: média amostral – Equações 9 e 69;
 $\bar{X}$: média amostral da população 1 – Equações 26, 30 e 32;
 x_i : elementos de uma amostra da população X – Equações 8 a 12, 69, 70 a 73;
 Y : variável aleatória contínua da população 2 na estatística;
 $\bar{Y}$: média amostral da população 2 – Equações 30 e 32;
 Z : valor da estatística Z do teste Wilcoxon para $n > 50$ – Equações 54, 100, 106, 107, 108 e 109;
 Z_i : valor de um conjunto amostral ordenado para o teste Wilcoxon – Equações 42 e 96;
 Zn : Zinco – Elemento químico classificado como metal de transição (Família 2B);
 Z_{upper} e Z_{lower} : valores intermediários de Z para cálculo do p-valor – Equações 104 a 107;
 Z_α e $-Z_\alpha$: valores críticos da distribuição Z de Wilcoxon, respectivamente para testes unilaterais à direita e esquerda – Equações 56 e 57;
 $Z_{\alpha/2}$ e $-Z_{\alpha/2}$: valores críticos da distribuição Z de Wilcoxon para testes bilaterais – Equação 55;
 α : nível de significância de um teste estatístico – Equações 5, 55 a 57, 79, 80, 81, 83 e 84, 91 e 92;
 θ : mediana populacional – Equações 39 a 41, 44 a 46;

θ_0 : mediana populacional hipotética – Equações 39 a 41;
 μ : média populacional – Equações 6, 9, 23 a 25, 34 a 36;
 μ_0 : média populacional hipotética ao qual se deseja testar – Equações 23 a 26;
 μ_1 : média populacional para os dados da população 1 – Equações 27 a 30, e 32;
 μ_2 : média populacional para os dados da população 2 – Equação 27 e 30, e 32;
 μ_D : média populacional das diferenças $D_1, D_2, \dots, D_n$ – Equações 34 a 37, e 90;
 $\mu L.L^{-1}$: unidade volumétrica de concentração;
 μm : micrômetro ou micron – unidade de comprimento equivalente a $10^{-6} m$;
 v : graus de liberdade para o teste T com variâncias populacionais iguais e desconhecidas – Equação 33;
 σ : desvio padrão populacional – Equações 6 e 9;
 σ_0^2 : variância populacional hipotética ao qual se deseja testar – Equações 15 a 17;
 σ_1^2 : variância populacional da população 1 – Equações 19 a 21, 85, e 86;
 σ^2 : variância populacional – Equações 6, e 15 a 18;
 σ_2^2 : variância populacional da população 2 – Equações 19 a 21, 85, e 86;
 τ : parâmetro genérico da população estatística que pode ser média, variância, mediana, etc. – Equações 2 a 4;
 τ_0 : valor hipotético do parâmetro genérico na qual se deseja testar comparando-o com o τ – Equações 2 a 4;
 χ^2 : Valor da estatística Qui-quadrado para o teste de variância e desvio padrão para uma única amostra – Equação 18;
 χ^2_{critD} : valor crítico à direita da distribuição qui-quadrado;
 χ^2_{critE} : valor crítico à esquerda da distribuição qui-quadrado;
 w : variável indicadora do teste Wilcoxon – Equações 42, 44, 95 e 96;
 $\in$: denotação matemática para “pertence”;

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	33
2. OBJETIVOS	35
3. REVISÃO DE LITERATURA	37
3.1. Hidrossedimentologia.....	37
3.1.1. Erosão.....	38
3.1.2. Transporte de sedimentos.....	42
3.1.3. Deposição de sedimentos e assoreamento de reservatórios	51
3.2. Sedimentometria	57
3.2.1 Métodos de estimativa da descarga sólida	60
3.2.2 Estimativa da descarga sólida a partir de outros parâmetros hidrossedimentológicos	64
3.3. Estatística e probabilidade	71
3.3.1. Distribuição Normal e Teste de Normalidade	73
3.3.2. Testes Paramétricos e Não-paramétricos.....	78
3.3.2.1. Teste de hipótese para variância e desvio padrão de uma amostra.....	79
3.3.2.2. Teste de hipótese para variância e desvio padrão de duas amostras.....	81
3.3.2.3. Teste de hipótese paramétrico para médias – Teste t de Student	82
3.3.2.4. Teste de hipótese não-paramétrico para medianas	86
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	91
4.1. Caracterização da área de estudo	91
4.2. Obtenção de dados primários.....	98
4.2.1. Obtenção das características hidráulicas do reservatório de Mogi-Guaçu.....	100
4.2.2. Amostragens de sedimentos em suspensão e turbidez	102
4.2.3. Análises de Laboratório.....	105
4.3. Metodologia aplicada no desenvolvimento da Ferramenta Computacional – <i>NH Sediment and Statistic</i>	107
4.3.1. Implementação do cálculo da descarga sólida em suspensão em VBA	107
4.3.2. Implementação do cálculo de descarga sólida total em VBA	108
4.3.3. Implementação do teste de normalidade.....	115
4.3.4. Implementação dos testes F de Fisher-Snedecor e T de Student pareado	121
4.3.5. Implementação do teste não-paramétrico Wilcoxon.....	123
4.3.6. Implementação dos parâmetros estatísticos.....	127
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	128
5.1. Simulações na Ferramenta Computacional – Módulo Hidrossedimentológico.....	138
5.1.1. Cálculo da descarga sólida em suspensão	139

5.1.2. Estimativa da descarga sólida total.....	140
5.1.3. Verificação dos resultados de descarga sólida total obtidos na ferramenta computacional – NH <i>Sediment and Statistic</i>	144
5.2. Simulações na Ferramenta Computacional – Módulo Estatístico	152
5.2.1. Proposta de metodologia para utilização do módulo estatístico da Ferramenta computacional NHSS.....	152
5.2.2. Aplicação do módulo estatístico da ferramenta computacional NHSS	156
5.2.3. Teste Kolmogorov-Smirnov para Normalidade dos Resíduos	168
5.2.4. Teste Kolmogorov-Smirnov para Normalidade dos dados de concentração de sedimentos em suspensão medidos (SS _C) e estimados (SS _E).....	172
5.2.5. Teste de comparação das variâncias das concentrações de sedimentos medidas e estimadas (Teste F de Fisher-Snedecor)	175
5.2.6. Teste de comparação das médias e medianas.....	179
5.2.7. Determinação do melhor método de estimativa por meio de índices estatísticos	185
5.3. Verificação dos resultados dos testes estatísticos obtidos na ferramenta computacional – NH <i>Sediment and Statistic</i>	187
5.3.1. Obtenção dos resultados dos testes estatísticos para o Cenário 3	188
5.3.2. Verificação da acurácia do teste de normalidade	193
5.3.3. Verificação da acurácia do teste F de Fisher-Snedecor	198
5.3.4. Verificação da acurácia do teste T de Student.....	200
5.3.5. Verificação da acurácia do teste Wilcoxon.....	203
5.3.6. Diferenciais da ferramenta computacional NH <i>Sediment and Statistic</i>	207
6. CONCLUSÕES.....	209
7. RECOMENDAÇÕES.....	211
REFERÊNCIAS	212
ANEXO A – Distribuição normal padrão	227
ANEXO B – Valores críticos para a estatística do Teste Kolmogorov-Smirnov	229
ANEXO C – Distribuição Qui-Quadrado	230
ANEXO D – Distribuição F de Fisher-Snedecor	232
ANEXO E – Quadro da distribuição T de Student	235
ANEXO F – Distribuição exata do Teste Wilcoxon.....	236
ANEXO G – Código da ferramenta computacional para o cálculo da descarga sólida em suspensão	237
ANEXO H – Código da ferramenta computacional para o método simplificado de Colby (1957)	239
ANEXO I – Código da ferramenta computacional para o Teste de Normalidade Kolmogorov-Smirnov	241
ANEXO J – Código da ferramenta computacional para o Teste de Variâncias.....	247

ANEXO K – Código da ferramenta computacional para o Teste T de Student.....	252
ANEXO L – Código da ferramenta computacional para o Teste Wilcoxon.....	260
ANEXO M – Código da ferramenta computacional para os parâmetros estatísticos	272

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos países que possui a maior reserva hidroenergética do mundo, contendo em torno de 18% da água doce do planeta. A utilização desse recurso principalmente na irrigação, abastecimento e geração de energia elétrica requer análises hidrossedimentológicas que proporcionam o conhecimento da dinâmica do corpo hídrico, indispensável para seu planejamento, gerenciamento e correto manejo. Além disso, os processos hidrossedimentológicos necessitam de estudos detalhados dos sedimentos e suas interações com o meio ambiente, importante tema de interesse econômico, social e ecológico.

A interferência dos sedimentos em países em desenvolvimento é notável principalmente em países em desenvolvimento onde a taxa de crescimento populacional é geralmente elevada. Essas taxas são proporcionais às pressões sobre os recursos naturais e podem aumentara produção e deposição de sedimentos, causando problemas como o assoreamento de rios e reservatórios, e até mesmo redução da qualidade da água que impede o aproveitamento hídrico para diversos fins.

O monitoramento se torna fundamental para a compreensão dos processos hidrossedimentológicos. Entretanto, o transporte de sedimento é um fenômeno complexo e sua quantificação geralmente é morosa, pois se submete a amostra ao processo de filtragem ou evaporação para determinação de sedimentos, além da necessidade de transporte do material até o laboratório, e rotina de análise demorada. Também são exigidas várias campanhas e a obtenção de outras informações como características hidráulicas e granulometria, o que torna o processo de monitoramento dessa variável oneroso e ainda mais extenso.

Nesse contexto, a adoção de métodos indiretos de determinação dos sedimentos tem se tornado comuns na área, como a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão a partir de parâmetros como turbidez e concentração volumétrica de sedimentos obtidas a por meio de sondas que utilizam como princípio de funcionamento a difração a *laser*. Estes equipamentos são capazes de reduzir a mão de obra e obter maior quantidade de dados em menor tempo, sendo necessário coleta manual apenas na primeira campanha com objetivo apenas de calibração dos equipamentos.

Com isso, inúmeros dados são obtidos nos monitoramentos, e o entendimento dessas variáveis demanda de ferramentas computacionais que auxiliem e facilitem os cálculos hidrossedimentológicos. Além de auxiliarem a estimativa do transporte de sedimentos, tais ferramentas são a saída para a redução do erro em cálculos manuais da descarga sólida total,

pois a maioria das fórmulas necessitam da análise de ábacos e gráficos, o que tornam o cálculo subjetivo, podendo variar conforme a interpretação da pessoa.

Além disso, a quantidade de dados obtidos requer obrigatoriamente cálculos estatísticos que visam sintetizar uma série de dados referentes à determinada variável de estudo, com o intuito de estudar estatisticamente uma população tendo como base a amostra. Novamente a utilização do computador como ferramenta de trabalho e de cálculo é imprescindível por permitir a execução de tarefas repetidas, que de outra forma demandariam tempo com potencial introdução de erros humanos.

Os estudos hidrossedimentológicos e as análises estatísticas devem estar integradas para auxiliar o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos. Desse modo, implementou-se a programação em *Visual Basic for Applications* (VBA) como ferramenta simples e de fácil aplicação, voltada aos cálculos hidrossedimentológicos e estatísticas. Optou-se por esse tipo de linguagem por ser encontrada nas diversas versões do Microsoft Excel, que funciona no sistema mais popular do mundo, o Microsoft Windows. Além disso, é um tipo de linguagem que não necessita de compiladores específicos como outras linguagens de programação, apresenta sintaxe descomplicada, o que possibilita a rápida aprendizagem do usuário.

Esta pesquisa está inserida no projeto do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica (P&D ANEEL) por meio da parceria entre a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP), Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial (FIPAI), e a concessionária de energia AES Tietê, sendo esta última a financiadora do projeto.

HIPÓTESE: Tendo em vista a complexidade envolvida em alguns cálculos hidrossedimentológicos e a análise estatística de dados coletados em campo, é possível desenvolver ferramenta computacional para cálculos hidrossedimentológicos e estatísticos usando linguagem de programação de fácil acesso e visando ao planejamento e gerenciamento de recursos hídricos.

2. OBJETIVOS

Geral:

Desenvolver ferramenta computacional suporte para cálculos hidrossedimentológicos e estatísticos.

Específicos:

- Desenvolver módulo computacional para cálculos hidrossedimentológicos;
- Avaliar o transporte de sedimentos utilizando o módulo hidrossedimentológico da ferramenta computacional desenvolvida;
- Desenvolver módulo computacional para cálculos estatísticos;
- Propor e aplicar metodologia de estimativa da concentração de sedimentos em suspensão por meio do módulo estatístico da ferramenta computacional desenvolvida.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Hidrossedimentologia

Sabe-se que o conhecimento e estudo dos processos relacionados à dinâmica da água e dos sedimentos, e as possíveis interações dessas partículas com o meio ambiente nitidamente é importante e consensual. Essas interações o tornam como um tema de interesse econômico, social e ecológico em uma gestão sustentável. Entretanto, os processos hidrossedimentológicos que incluem a desagregação ("erosão" na definição rigorosa), transporte, sedimentação e consolidação de sedimentos, são complexos.

Sedimento é a partícula derivada da fragmentação das rochas por processos físicos ou químicos, e que é transportada pela água ou vento do lugar de origem aos rios e aos locais de deposição. Também pode ser definido por material originado por intemperismo e degradação das rochas tendendo a formar depósitos em camadas sedimentares (CARVALHO, 2008; CURTIS; CULBERTSON; CHASE, 1973).

O conhecimento da erosão, transporte e deposição de sedimentos em relação à superfície terrestre, córregos, reservatórios e outros corpos hídricos é importante para aqueles envolvidos direta ou indiretamente no desenvolvimento e manejo desses recursos. Também é essencial que esse desenvolvimento e gerenciamento sejam realizados de maneira que ceda ou esteja em conformidade com ambiente socialmente aceitável (EDWARDS; GLYSSON, 1999). Vestana (2009) ainda complementa que o conhecimento da dinâmica dos processos hidrossedimentológicos na bacia hidrográfica fornece informações que fundamentam a tomada de decisões e subsidiam o planejamento de manejo de uso racional dos recursos naturais.

Dessa forma, Edwards e Glysson (1999) apontam que para o conhecimento desses processos hidrossedimentológicos, deve-se contemplar a avaliação da produção de sedimentos segundo as condições naturais do meio ambiente como solo, clima, topografia, cobertura do solo e área de drenagem; avaliação da produção de sedimentos segundo uso e ocupação do solo; taxa de transporte de sedimentos em rios; granulometria das partículas transportadas e relacionamento das características químicas dos sedimentos com a qualidade da água e consequentemente com a biota, tanto aquática como terrestre.

3.1.1. Erosão

O processo erosivo consiste de três eventos sequenciais, caracterizados pelo desprendimento, arraste e deposição das partículas do solo (PANACHUKI et al., 2006). A erosão, primeira etapa na movimentação dos sedimentos, é um processo que age em superfície e em profundidade, através do arraste das partículas de solo causado por água, vento ou por outro efeito, sendo que diversos efeitos têm ação preponderante nesses processos (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1999; CARVALHO, 2008).

Capeche et al. (2008, p. 106) definem erosão como “processo de desgaste e consequente modificação da superfície das terras (rochas e solos), sendo influenciada por: água, vento, cobertura vegetal, topografia e tipo de solo”. Embora seja um processo natural, ela é afetada pelas políticas de uso e ocupação do solo, especialmente agricultura, desmatamento e urbanização (ANACHE et al., 2015).

Cassol et al. (2007) comentam que a erosão constitui em um grande problema urbano e nas áreas de utilização agrícola. Além de causar danos à estrutura física do solo, reduzir sua fertilidade, provocar assoreamento e aumentar a turbidez dos corpos hídricos, provoca prejuízos econômicos, sociais e ambientais. E, segundo Scapin, Paiva e Beling (2007), a retirada da vegetação, o manejo inadequado do solo e a ocupação urbana acelerada próximos às margens de rios são alguns dos fatores que prejudicam o homem e o meio ambiente.

A erosão pode ser classificada em geológica, que conforme Capeche et al. (2008), refere-se àquela oriunda da atividade geológica sobre a superfície terrestre, correspondendo a um processo natural, sem a interferência do homem; e em erosão acelerada, que para Carvalho (2008) dita erosão antrópica ou induzida pelo homem, ou dos solos agrícolas e obras, é aquela provocada pela ação humana. O autor ainda complementa que a erosão provocada por catástrofes, como terremotos e enchentes podem estar incluídos nessa classificação.

De acordo com Carvalho (2008) os agentes erosivos são os elementos do meio físico que causam, ou afetam, diretamente a erosão, sendo ativos e passivos. Como agentes passivos, pode-se citar a topografia, gravidade, tipos de solo, cobertura vegetal, formações superficiais e práticas antrópicas. Como agentes ativos, água, temperatura, insolação, vento, gelo, neve, ação humana são os principais responsáveis pela erosão (Quadro 1).

Quadro 1 – Principais agentes erosivos e tipos de erosão

Agentes erosivos	Tipos de Erosão
Eólica	De transporte pelo ar De transporte na superfície
Fluvial	Erosão de margem Erosão de leito
Hídrica superficial	Erosão laminar Erosão por ravinas e sulcos Erosão por escoamento concentrado
Remoção de massa	Desprendimento de terra ou deslizamento Escorregamento superficial

Fonte: Adaptado de Carvalho (2008)

Dentre todos os tipos de erosões existentes a erosão fluvial e hídrica são as mais preocupantes na Hidrossedimentologia.

A erosão do solo é um processo mecânico que envolve energia, e a energia necessária para desencadear o processo de erosão hídrica do solo é proveniente da água das chuvas e do escoamento superficial, especialmente a energia cinética do impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo (CASSOL et al., 2007). Segundo Oliveira et al. (2009, p.417), “erosão hídrica é caracterizada como uma das significativas formas de degradação ambiental, sendo influenciada por diversos fatores, tais como: característica do solo; topografia; uso e ocupação do solo e clima.”

O desenvolvimento da civilização esteve sempre apoiado na exploração e utilização dos recursos naturais. Nesse sentido, a natureza do solo, um meio natural onde ocorre o crescimento das plantas, possui papel fundamental no desenvolvimento de uma sociedade, seja na produção de alimentos, fibras, energia ou como estrato onde residem grande parte dos seres vivos, como o ser humano em suas variadas formas de assentamentos (UNITES STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 1998).

Com a necessidade premente de alimentar a população mundial com uma quantia finita de terra agricultável, a Revolução Verde trouxe consigo o manejo intensivo das culturas, gerando o aumento da produção e da produtividade no campo. No entanto, o modo de produção vigente, baseado no uso de insumos, mecanização e expansão de monocultivos é predatório e está minando a fundação sobre a qual foi construído, uma vez que retira excessivamente e degrada os recursos naturais dos quais a agricultura depende – o solo, a água, a diversidade genética natural (GLIESSMAN, 2001).

Além dos impactos na degradação do solo, o processo erosivo está associado aos impactos dos sedimentos erodidos nos recursos hídricos. Os problemas podem ser de natureza

física, pela presença de grandes volumes de sedimentos que provocam o assoreamento dos rios, causando enchentes e dificultando a navegação (MINELLA; MERTEN; MAGNAGO, 2011).

De acordo com Cunha e Guerra (2001), a erosão apesar de ser um problema em escala mundial ocorre de forma mais séria em países em desenvolvimento e com regime de chuvas tropicais, ou seja, áreas tropicais, com grande aptidão ao uso agrícola, como regiões do Brasil, estão sujeitas a degradações que colocam em risco a produção alimentar do país, e pelo fato de o Brasil ser um dos maiores exportadores de alimento, e do mundo.

Uma vez que se encontram intimamente relacionados, a erosão e a sedimentação do solo estão entre as maiores as preocupações ambientais modernas do mundo. Em muitas partes do mundo, a erosão do solo não só causou deterioração da terra e dificultou o desenvolvimento da agricultura e da indústria, mas também aumentou a produção de sedimentos da bacia hidrográfica (*WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION – WMO*, 2003). A sedimentação afeta muitos aspectos da bacia hidrográfica e do meio ambiente como a qualidade da água, abastecimento de água, controle de inundações, regulação do rio, vida útil do reservatório, lençol freático, irrigação, navegação, pesca, turismo, etc. (CRUZ; RODRIGUES, 2013; WMO, 2003).

A degradação das bacias hidrográficas pela ação antrópica, associada aos fenômenos naturais de precipitação, como os verificados nas regiões tropicais, resulta em um aumento das quantidades de solo (sedimento) que chega aos rios e reservatórios, que é muito maior que aquelas produzidas em condições de equilíbrio natural (PAIVA, E., 2001). O conhecimento das relações entre o uso do solo e a erosão é essencial, pois os sedimentos presentes nos cursos d'água são originados, em grande parte, da erosão da bacia hidrográfica, das margens e dos próprios leitos dos rios.

Com isso alguns estudos têm sido realizados buscando mensurar a produção de sedimentos e erosão no mundo. *Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO* (2011), apontam em seu Relatório Solaw que 25% dos solos no mundo estão degradados, o que, somado à escassez de solos e de água, impõem um novo desafio à tarefa de alimentar uma população mundial, projetada para nove bilhões de pessoas em 2050. Ainda segundo a FAO (2011), 8% dos solos estão moderadamente degradados, 36% estão estáveis ou levemente degradados e 10% estão classificados como “em recuperação”, sendo que o restante dos solos está descoberto ou coberto por águas interiores.

Corroborando a isso, Campagnoli (2006) apresentou a classificação do Brasil quanto à produção de sedimentos com base em estudo das características geológicas, geomorfológicas, pedológicas, de uso do solo, declives e precipitação, aplicando-os na plataforma ArcGIS e

correlacionando às amostras coletadas na rede de estações de monitoramento da Agência Nacional de Águas – ANA (Figura 1). Nota-se que o Brasil apresenta área considerável com produção de sedimentos variando de 5 a 400 t.Km⁻².ano⁻¹. O autor expõe que o Pantanal e a região Amazônica aumentaram a produção de sedimentos nos últimos anos principalmente devido à expansão da fronteira agrícola e ao desmatamento. Além disso, o autor também apresenta a classificação para parte do continente Sul americano (Figura 2).

Figura 1 – Mapa de produção de sedimentos no Brasil

Fonte: Adaptado de Campagnoli (2006).

Figura 2 – Mapa de produção de sedimentos em parte da América do Sul

Fonte: Adaptado de Campagnoli (2006)

Miranda et al. (2015) destacam em seu trabalho que muitos países apresentam altas taxas de perda de, principalmente em climas úmidos. As taxas de erosão em solos descobertos podem variar de 4 a 9 t.ha⁻¹.ano⁻¹ nos Estados Unidos e 280 a 360 t.ha⁻¹.ano⁻¹ na China. Segundo os autores, os fatores antrópicos são vistos como os principais causadores de erosão, devido à interferência que geram, a má gestão da terra e, em alguns casos, possivelmente devido à ignorância sobre os efeitos da erosão do solo.

A importância desse tipo de estudos e a dificuldade na predição da perda de solo e produção de sedimentos têm levado a criação de modelos matemáticos, sejam eles empíricos, determinísticos ou híbridos. Segundo Oliveira (2011), os modelos variam de procedimentos complexos, que requerem uma série de parâmetros de entrada, como *Water Erosion Prediction Project* (WEPP), desenvolvido por Nearing et al. (1990), *Kinematic Runoff and Erosion* (KINEROS), desenvolvido por Woolhiser, Smith e Goodrich (1990) e *European soil erosion model* (EUROSEM) desenvolvido por Morgan et al. (1998), até modelos mais simplificados, como a *Universal Soil Loss Equation* (USLE) desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978) e a *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE), resultado de estudos de Renard et al. (1997).

Dentre os modelos matemáticos de predição de erosão do solo, a USLE é a mais conhecida e utilizada mundialmente, e foi desenvolvida visando à estimativa das perdas de solo de longo prazo em glebas sob condições específicas de cultivos e práticas de manejo (WISCHMEIER; SMITH, 1978). Kinnell (2010) complementa que a USLE ainda é mal utilizada, já que embora tenha sido concebido para prever a perda média anual de solo a longo prazo, tem a capacidade de prever as perdas de solo razoavelmente bem em alguns locais geográficos e não bem em outros.

Para maiores conhecimentos acerca da USLE, diversos autores abordam a temática: Anache, Bacchi e Alves Sobrinho (2014), Bertoni e Lombardi Neto (1999), Carvalho (2008), Kinnell (2010), Magalhães Filho, Ayres e Alves Sobrinho (2014), Morris e Fan (1998), Oliveira (2011), Randle, Yang e Daraio (2006).

3.1.2. Transporte de sedimentos

Após a produção de sedimentos, tanto na bacia hidrográfica em eventos de chuva quanto nos rios, o sedimento tende a ser transportado, sendo caracterizada a segunda etapa dos processos hidrossedimentológicos. Genericamente, segundo Branco e Rocha (1977) e Muller (1995) todos os cursos d'água apresentam a propriedade inerente de transportar sedimentos, seja em suspensão, arraste, saltação, rolamento ou combinação destas maneiras (Figura 3). Esse

transporte de sedimentos na água é regido pela relação entre a capacidade de carreamento do escoamento e a força necessária para deslocar as partículas sólidas disponíveis em seu curso (LIMA; SILVA, 2007).

Figura 3 – Variações no transporte de sedimentos em corpos hídricos

Fonte: Adaptado de University of Maryland (2017)

Os mecanismos que regem o transporte de sedimentos podem ser sintetizados pela Curva de Hjulstöm (1935¹) *apud* Morris e Fan (1998), que ilustra como a velocidade de um corpo hídrico afeta a sua capacidade de erodir, transportar ou depositar partículas de diferentes tamanhos. Em outras palavras, ela mostra como a energia de um rio afeta a erosão e deposição dos sedimentos em função da granulometria (Figura 4).

As forças que atuarão na partícula de sedimento são função do tamanho da partícula (granulometria), da forma de escoamento (laminar ou turbulento), da velocidade de corrente, dos obstáculos no leito, temperatura da água, entre outros. Então para uma mesma composição de sedimento de fundo, partículas se arrastam se a velocidade for baixa, e à medida que a velocidade aumenta, parte desse movimento é carregado para uma zona onde o fluxo é maior, passando a ser sedimento em suspensão (CARVALHO, 2008; SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION, 1963; VANONI, 1975; WMO, 2008a)

¹ Hjulstrom, F. Studies of Morphological Activity of Rivers as Illustrated by the River Fyris. Bulletin of the Geological Institute University of Uppsala, 25, 1935, 221-527.

Figura 4 – Curva de Hjulstöm

Fonte: Adaptado de Morris e Fan (1998)

Aparentemente, os diferentes modos de transporte de sedimento estão intimamente relacionados e é difícil, não impossível, separá-los completamente. Há duas maneiras de classificar a carga de sedimentos conforme García (2008). A primeira a divide de acordo com o mecanismo de transporte em carga de sedimentos em suspensão e carga de sedimentos de fundo, enquanto a segunda classifica a carga de sedimentos baseada no tamanho da partícula em carga de lavagem e carga do material de leito (Quadro 2).

Quadro 2 – Classificações do transporte de sedimentos

Classificação baseada nos mecanismos de transporte	Classificação baseada no tamanho da partícula
Carga em suspensão	Carga de lavagem
Carga de leito	Carga do material de fundo
Carga total de sedimentos	Carga total de sedimentos

Fonte: Adaptado de Diplas et al. (2008)

Para Morris e Fan (1998), a carga de sedimentos em suspensão se refere às partículas movendo em suspensão, sustentadas na coluna de água por turbulência ou suspensão coloidal, ou ao material coletado ou calculado a partir de um amostrador de carga suspensa. Carga de lavagem é a porção da carga de sedimento composta de partículas menores às encontrados em quantidades apreciáveis no leito móvel, muitas vezes tomadas como as partículas menores encontradas no leito. Além disso, a carga de lavagem é normalmente transportada em suspensão através do sistema fluvial sem interação significativa com o leito (MORRIS; FAN, 1998).

A carga de sedimentos de fundo (leito) consiste nas partículas que são predominantemente representadas no leito móvel de uma corrente sendo utilizada para designar: material grosseiro movendo-se em contato contínuo ou intermitente com o leito, ou material coletado ou calculado a partir de amostras coletadas em um amostrador de fundo ou armadilha. Biedenharn, Thorne e Watson (2006) complementam que a carga de fundo inclui partículas que rolam ou deslizam ao longo do leito mais a carga de saltação, que consiste em partículas que saltam ao longo do leito. Finalmente, a carga do material de fundo é a parcela de carga de sedimento composta de material de leito que pode ser transportada como carga em suspensão ou carga de fundo (BIEDENHARN; THORNE; WATSON, 2006; VANONI, 1975).

Dados conceitos apresentados, segundo Carvalho (2008) os corpos hídricos têm a capacidade de transportar determinada quantidade máxima de sedimentos, dependendo de fatores como a vazão e declividade do curso d'água. Enquanto a quantidade de sedimentos transportados for menor (insaturação), há tendências de formação de processos erosivos nas margens e leitos dos corpos hídricos. Porém, quando há redução do gradiente energético do fluxo d'água criada pela construção da barragem, ou até mesmo ocorrendo naturalmente na foz de um rio ou em zonas de remanso, diminui-se o valor de saturação, e conseqüentemente há deposição do sedimento. Vanoni (1975) complementa que o transporte e a deposição de sedimentos não dependem apenas das características hidráulicas do corpo hídrico, mas também dependem das propriedades do próprio sedimento.

Algumas características dependentes do tamanho dos sedimentos estão resumidas na Figura 5, juntamente com intervalos de tamanho para vários outros tipos de partículas.

Figura 5 – Comparativo dos tamanhos de sedimento em relação às propriedades dominantes

Fonte: Adaptado de Morris e Fan (1998)

É possível verificar que as classes granulométricas estão diretamente relacionadas com o tipo de transporte dominante e apresentam relações entre velocidade do escoamento e diâmetro da partícula variadas. Além disso, na Tabela 1 está a classificação dos sedimentos de acordo com *American Geophysical Union* (AGU).

Tabela 1 – Classificação dos sedimentos quanto ao tamanho da partícula

Tipo de sedimento	Diâmetros (mm)		Classificação
	Mínimo	Máximo	
Pedregulhos	256	4096	–
Pedras	64	256	–
Cascalho	32	64	Cascalho muito grosso
	16	32	Cascalho grosso
	8	16	Cascalho médio
	4	8	Cascalho fino
	2	4	Cascalho muito fino
Areia	1	2	Areia muito grossa
	0,5	1	Areia grossa
	0,25	0,5	Areia média
	0,125	0,25	Areia fina
	0,062	0,125	Areia muito fina
Silte	0,031	0,062	Silte grosso
	0,016	0,031	Silte médio
	0,008	0,016	Silte fino
	0,004	0,008	Silte muito fino
Argila	0,002	0,004	Argila grossa
	0,001	0,002	Argila média
	0,0005	0,001	Argila fina
	0,00024	0,0005	Argila muito fina

Fonte: Adaptado de Morris e Fan (1998)

As partículas mais grosseiras formadas por areias e pedregulhos são consideradas os sedimentos não-coesivos, enquanto, sedimentos coesivos, em geral, correspondem aos sedimentos de granulometria mais finas, compostos por siltes e argilas com diâmetro mediano inferior a 0,063 mm (HUANG; HILLDALE; GREIMANN, 2006).

Neste caso, o processo de transporte e deposição deste tipo de sedimento não obedece ao mesmo comportamento que os não coesivos. Diferentemente dos sedimentos não coesivos que apresentam os processos de transporte e deposição de sedimentos regidos pela Lei de Navier-Stokes (relação com o tamanho e massa das partículas), os sedimentos coesivos são afetados pela capacidade de interagir fisicamente e quimicamente (BERLAMONT et al., 1993).

Estigoni et al. (2012) apresentaram um resumo dos principais conceitos desse tipo de sedimento envolvidos na modelagem hidrodinâmica de reservatórios, apresentando equações

fundamentais envolvidas no processo e os principais métodos numéricos que podem ser utilizados.

A partícula em suspensão está sujeita à ação da velocidade da corrente na direção horizontal e do seu peso, implicando que a concentração do sedimento seja menor na superfície e apresente seu máximo no leito do corpo hídrico para uma granulometria variada (Figura 6). Esse comportamento pode ser explicado por causa da variação da velocidade, já que segundo Edwards e Glysson (1999), as velocidades em uma seção de um rio são menores nas margens e aumentam em direção ao centro, variando também na vertical, onde são maiores na superfície e menores no leito (Figura 7).

Figura 6 – Distribuição vertical do sedimento

Fonte: Adaptado de Carvalho (2008)

Figura 7 – Perfis de velocidade e concentração em uma seção transversal de um rio

Fonte: Adaptado de Subcommittee on Sedimentation (1963)

A discussão anterior ilustra a complexidade do estudo do transporte de sedimentos fluviais e algumas das muitas variáveis envolvidas. Trabalhos como Colby (1963²), Leopold et al. (1964³), Guy (1970⁴), e Vanoni (1975) apresentam conceitos de sedimentos fluviais e processos geomorfológicos mais detalhados.

Os sedimentos, uma vez presentes no ecossistema aquático, passam a ter papel importante para a biota através do fornecimento de nutrientes e energia. Além disso, os sedimentos cumprem função de regulação da qualidade da água por sua capacidade de reter e liberar poluentes (GOLTERMAN; SLY; THOMAS, 1983).

Para Huang, Hilldale e Greimann (2006) os sedimentos coesivos são uma preocupação em muitas vias navegáveis e estão intimamente ligados à qualidade da água. Muitos poluentes, como espécies metálicas, pesticidas e nutrientes adsorvem preferencialmente a sedimentos coesivos. Jordão et al. (1990) verificaram que embora a concentração de metais nos sedimentos do rio Paraibuna (MG) não fosse preocupante, no ribeirão Três Pontes a quantidade de metais como cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobre (Cu) e zinco (Zn) nos sedimentos poderia vir a restringir o pleno desenvolvimento da vida aquática.

O transporte de sedimentos pode prejudicar os usos múltiplos da água, interferir na penetração da luz e calor nos corpos hídricos, necessários para a fotossíntese e salubridade dos corpos hídricos, atuar como portadores de outros poluentes, causar abrasão em equipamentos eletromecânicos e estruturas hidráulicas e provocar perturbações na forma do canal. Por isso, muitos trabalhos de monitoramento e quantificação desse transporte têm sido realizados.

Curtis, Culbertson e Chase (1973) a partir de dados de 27 bacias hidrográficas nos Estados Unidos puderam estimar a descarga sólida anual média que chegava aos oceanos. Em seus resultados, apontaram que 14,2 milhões t.dia⁻¹ de sedimentos chegam ao Oceano atlântico, 378,179 milhões chegam ao Golfo do México, e 99,1 milhões para o Oceano Pacífico. Além disso, para Curtis, Culbertson e Chase (1973) e Holeman (1968), estima-se que, nos Estados Unidos, apenas cerca de 10% do material erodido nas bacias hidrográficas atingem os oceanos, sendo o restante depositado em lagos, reservatórios, canais e superfícies terrestres.

² COLBY, B. R. Fluvial sediments: A summary of source, transportation, deposition and measurement of sediment discharge. U.S. Geological Survey Bulletin 1181-A, 1963, 47 p.

³ LEOPOLD, L. B.; WOLMAN, M. G.; MILLER, J. P. Fluvial processes in geomorphology. San Francisco, California: W.H. Freeman and Company, 1964, 522 p.

⁴ GUY, H. P. Fluvial sediment concepts: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, chap. C1, book 3, 1970, 55 p.

Por meio do modelo empírico RUSLE, Sistema de Informações Geográficos (SIG) e dados de estações sedimentométricas, Duraes, Melo e Beskow (2016) obtiveram média de erosão hídrica, entre os anos de 1997 e 2008, de $2,7 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ para a bacia hidrográfica do rio Paraopeba (Minas Gerais), enquanto que o transporte de sedimentos para a mesma região variou entre $0,25$ a $1,63 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, mostrando que até 39% do sedimento produzido está depositando seja no próprio solo ou em corpos hídricos.

Já Martinez et al. (2009) estimaram a quantidade de sólidos suspensos no rio Amazonas utilizando *Acoustic Doppler Current Profilers* (ADCP) associado com a rede de medição HYBAM, e por meio da correlação entre as concentrações suspensas na superfície e a irradiância espectral obtidas por imagens de satélite. Os autores constataram um aumento significativo na quantidade de sedimentos da Amazônia com uma descarga de sedimentos em suspensão 20% maior em 2007 em relação a 1996 (Figura 8).

Figura 8 – Descarga líquida média anual e descarga sólida em suspensão em Óbidos no rio Amazonas entre 1996 e 2007

Fonte: Adaptado de Martinez et al. (2009)

Syvitski et al. (2005) combinaram bases de dados e modelos para prever a taxa de sedimento que chega à área costeira para 4462 rios do mundo sob duas condições: a pré-humana e moderna. A primeira estava relacionada ao transporte de sedimentos antes da influência humana (antes do sequestro de sedimentos em reservatórios, ou aumento da produção de sedimentos por erosão), e a segunda considerando todos os fatores. Na Tabela 2 estão as

previsões sobre o fluxo de sedimentos transportados que chegam na zona costeira do mundo sob condições modernas e pré-humanas obtidas pelos autores.

A partir desse estudo de Syvitski et al. (2005), verificou-se que são transportados mundialmente nos corpos hídricos aproximadamente 12,6 bilhões de toneladas de sedimentos por ano. Dado que grandes reservatórios capturam 20% do fluxo global de sedimentos devido principalmente à deposição e assoreamento, tem-se então destacada a importância do estudo da terceira etapa do ciclo hidrossedimentológico.

Tabela 2 – Previsões sobre o fluxo de sedimentos para a zona costeira do mundo sob condições modernas e pré-humanas

Critérios de divisão	Área (milhões km²)	Carga de sedimentos em suspensão Pré-humana (Mt.ano⁻¹)	Carga de sedimentos em suspensão Moderna (Mt.ano⁻¹)	Carga de sedimentos retida em reservatórios (%)
Continentes				
África	20	1.310 ± 250	800 ± 100	25
Ásia	31	5.450 ± 1.300	4.74 ± 800	31
Australásia	4	420 ± 100	390 ± 40	8
Europa	10	920 ± 210	680 ± 90	12
Indonésia	3	900 ± 340	1.630 ± 300	1
América do Norte	21	2.350	1.910 ± 250	13
Ilhas da Oceania	0,01	4 ± 1	8 ± 3	0
América do Sul	17	2.680 ± 690	2.450 ± 310	13
Bacia oceânica				
Oceano Ártico	17	580 ± 120	420 ± 60	5
Oceano Atlântico	42	3.850 ± 800	3.410 ± 420	14
Oceano Índico	15	3.810 ± 1.020	3.290 ± 410	15
Mares interiores	5	470 ± 180	140 ± 30	30
Mediterrâneo e Mar Negro	8	890 ± 280	480 ± 60	30
Oceano Pacífico	18	4.430 ± 1.100	4.870 ± 910	26
Zona Climática				
Tropical (> 25°C)	17	1.690 ± 480	2.220 ± 360	16
Temperado quente (10 - 25° C)	47	9.070 ± 2.600	8.030 ± 1.250	15
Temperado frio (0-10° C)	17	1.940 ± 250	1.460 ± 160	47
Polar (< 0°C)	24	1.330 ± 170	900 ± 120	6
Altitude				
Alta montanha (> 5.000 m)	21	5.120 ± 1.600	4.100 ± 740	31
Montanha (3.000-5.000 m)	30	2.970 ± 610	2.190 ± 340	22
Baixa montanha (1.000 - 3.000 m)	36	4.670 ± 1.030	4.800 ± 630	12
Planalto (500 - 1.000 m)	10	910 ± 180	1.060 ± 110	4
Planície	8	330 ± 70	360 ± 50	2
Planície Costeira	1	30 ± 10	100 ± 20	0
Global	106	14.030	12.610	20

Fonte: Syvitski et al. (2005)

3.1.3. Deposição de sedimentos e assoreamento de reservatórios

Por fim, apesar da erosão, transporte e deposição de sedimentos ocorrerem simultaneamente, a deposição dos sedimentos é a última etapa do ciclo hidrossedimentológico. Por definição, os sedimentos são formados por material granular que se depositam na água através do efeito da gravidade.

Segundo Macarthur et al. (2008), assim como na erosão, a deposição de sedimentos pode ser categorizada como geológica (natural) e acelerada (induzida). A deposição geológica ocorre por causa dos processos naturais de tectônica de placas, erupções vulcânicas, aquecimento climático, ou movimentos glaciais. Esta categoria de processos geralmente ocorre em longos períodos, mas também pode resultar de episódios graves. Por outro lado, a deposição induzida por humanos é resultante de várias atividades antrópicas que geralmente resulta em mudanças relativamente rápidas na morfologia e sedimentação do rio, sendo que o sedimento produzido da erosão pode ser transportado e depositado em uma ampla gama de distâncias a partir da fonte.

Nesse sentido, algumas das principais causas da deposição de sedimentos e assoreamento em ambientes lóticos, como córregos e riachos, está relacionado, conforme Izagirre et al. (2009), com o maior transporte de sedimentos durante tempestades, forçando a deposição nas fases de recessão das inundações. A deposição é um fenômeno natural induzida pela erosão hídrica e está ligada às características das bacias hidrográficas como topografia, litologia, cobertura vegetal, hidrologia e atividades humanas.

Além disso, a construção de uma barragem para fins de abastecimentos e/ou geração de energia com formação de reservatórios é uma das atividades humanas que contribuem para o assoreamento. Esses reservatórios são responsáveis pelo aumento da disponibilidade hídrica sendo consideradas a maneira mais eficiente de gerenciar as águas superficiais. Entretanto, os reservatórios geram modificações físicas, ambientais e sociais nos locais onde são instalados, principalmente no regime de vazão do rio, alterando o transporte de sedimentos dos corpos hídricos os quais se depositam no interior do reservatório.

De acordo com Mahmood (1987), a taxa média anual de sedimentação mundial é aproximadamente 1% do volume de reservatórios. Porém, este valor não é uniforme, dependendo de fatores como a hidrologia, pedologia, relevo, e uso do solo na bacia hidrográfica. Scheuerlein (1990) verificou na América Central taxas de sedimentação de até 5% e White (2001) cita que a capacidade de armazenamento nos reservatórios chineses é reduzida cerca de

2,3% ao ano. Albertin, Matos e Mauad (2010) apresentam um estudo de caso brasileiro, no reservatório Três Irmãos, onde houve perda de cerca de 14% do volume útil em 36 anos.

De acordo com Dendy, Champin e Wilson (1973⁵) *apud* Mama e Okafor (2011) a taxa de sedimentação de reservatórios com capacidade menor que $1,235 \times 10^4 \text{ m}^3$ foi aproximadamente 3,5% ao ano. Já para reservatórios de tamanho médio, a perda anual de armazenamento era de 2,7%, enquanto que em reservatórios com capacidade maior que $1,235 \times 10^9 \text{ m}^3$ a taxa foi apenas 0,16% ao ano.

Assim, estudar os sedimentos presentes nos depósitos é de grande importância para o gerenciamento de reservatórios, já que a distribuição dos sedimentos não é uniforme e pode dar origem a três tipos de depósitos: depósito de remanso, delta e depósito de leito ilustrados na Figura 9.

Figura 9 – Tipos de depósitos em reservatórios e as principais consequências

Fonte: Adaptado de Carvalho (2008)

Os depósitos de remanso, onde geralmente são encontrados sedimentos de granulometria maior, podem causar problemas de enchente a montante do reservatório (CARVALHO, 2008; VANONI, 1975). Já o depósito tipo delta é formado no interior do reservatório por sedimentos de diversas granulometrias e tem como principal consequência a diminuição gradativa do volume útil do reservatório. Segundo Happ (1975), os deltas são

⁵ DENDY, F. E; CHAMPIN W. A; WILSON, R. B. Reservoir Sedimentation Surveys in the United States. In: ACKERMANN, W. C. et al. (eds). **Geophysical Monograph Series.**, 1973, 353 p.

associações características de tipos de sedimentos localizados onde a velocidade do fluxo é alterada pela entrada em um corpo hídrico maior. Por outro lado, o depósito de leito, geralmente formado por sedimentos mais finos (silte e argila), afeta diretamente o volume morto.

Como consequências do assoreamento de corpos hídricos o sedimento depositado pode causar danos que dependem da quantidade, qualidade e local de deposição. O sedimento, em ocasiões de enchentes, pode cobrir rodovias, danificar propriedades e áreas urbanas; em cursos d'água assoreados, a água em nível mais elevado provoca erosão de margens; riachos assoreados prejudicam os animais que acabam ingerindo sedimento. Além disso, o depósito em reservatórios pode provocar seu assoreamento, reduzindo o volume d'água, a regularização do curso d'água e a vida útil do lago (CARVALHO, 2008; GARCÍA, 2008; IZAGIRRE et al., 2009; MORRIS; FAN, 1998; VANONI, 1975). Em outras palavras, o assoreamento não só cria transtornos, mas também impõe altos custos públicos de serviços de manutenção.

Devido aos problemas causados pelos sedimentos, Izagirre et al. (2009) avaliaram os efeitos da deposição de sedimentos na biomassa perifítica e na atividade fotossintética da comunidade de algas. Para isso, os autores construíram canais com características semelhantes que permitiam o desenvolvimento dos seres aquáticos, com quantidades variadas de argila. Algumas semanas após a adição do sedimento, houve redução de 50% da quantidade de clorofila *a* no canal com deposições acima de 35 g.m⁻² de argila (> 6.000 mg.L⁻¹). Além disso, os autores verificaram que pulsos de assoreamento provocaram mudanças na estrutura da comunidade, aumentando, por exemplo, a quantidade de diatomáceas em tratamentos com altas quantidades de sedimentos.

Miranda e Mauad (2015), em estudo de caso no Reservatório de Três Irmãos, avaliaram a influência da sedimentação na geração hidroelétrica. Para tal, realizaram batimetrias, utilizaram dados disponíveis pela própria hidrelétrica datadas de 1975. De acordo com os dados fornecidos pela hidrelétrica, em 1975 a capacidade total do reservatório era 13.371,21 hm³, entretanto a batimetria realizada em 2008 pelos autores, mostrou uma capacidade total de 11.461,59 hm³. Com isso, verificou-se uma redução de 14,3% da capacidade total do reservatório devido o assoreamento. Seus resultados mostraram a interferência dos processos de sedimentação na geração de energia elétrica com uma perda de 377 MWh gerados a cada mês.

Elmouden et al. (2016) investigaram o assoreamento de alguns reservatórios considerados grandes na bacia hidrográfica de Souss-Massa localizada em Marrocos. Por meio comparações da capacidade inicial de alguns reservatórios com batimetrias realizadas, obtiveram taxa anual média de assoreamento de 1,49 % conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Assoreamento de grandes reservatórios da bacia hidrográfica de Souss-Massa em Marrocos

Barragem	Capacidade Inicial (Mm³)	Volume referente à última batimetria (Mm³)	Data da última batimetria	Volume perdido (Mm³)	Volume perdido (%)	Duração (anos)	Taxa de Assoreamento (%.ano ⁻¹)
Youssef Bem Tachfine	313,77	298,20	2010	15,57	5,0	38	0,13
Abdelmoumen	222,00	198,40	2011	23,60	10,6	30	0,35
Aoulouz	108,24	89,00	2011	19,25	17,8	20	0,89
Dkhila	0,716	0,20	2003	0,516	72,1	17	4,24
Ime El Kheng	12,00	9,76	2007	2,24	18,7	14	1,34
Mokhtar Soussi	52,16	39,80	2010	12,36	23,7	8	2,96
My Abdellah	110,00	90,60	2011	19,4	17,6	9	1,96
Ahl Souss	5,05	4,60	2010	0,45	0,45	6	0,08

Fonte: Elmouden et al. (2016)

Yang e Lu (2014) estimaram as taxas de sedimentação em um sistema multi-reservatórios na bacia hidrográfica do rio Yangtze localizado ao sudeste da China com área de $1,8 \times 10^6 \text{ km}^2$, sendo considerado o terceiro maior rio do mundo. Para isso, foram selecionados para esse sistema 1358 reservatórios de médio e grande porte ($\geq 10^7 \text{ m}^3$ de capacidade máxima de armazenamento), o que permitiu a obtenção da distribuição espacial da média anual de perda da capacidade dos reservatórios (Figura 10).

Figura 10 – Distribuição espacial da média anual de perda da capacidade de reservatórios em diferentes níveis do rio Yangtze (China)

Fonte: Adaptado de Yang e Lu (2014)

Dadas condições propostas por Yang e Lu (2014), os resultados obtidos indicaram uma taxa de sedimentação para a bacia do rio Yangtze de aproximadamente $691 (\pm 93,7) \text{ Mt. ano}^{-1}$.

Além disso, os reservatórios do alto Yangtze, destacados em vermelho, são os principais contribuintes para a taxa de sedimentação, sendo depositados aproximadamente 494 Mt de sedimentos por ano, com redução da capacidade dos reservatórios variando entre 0,22 a 0,65% anualmente.

Apesar da taxa de assoreamento relativamente baixa constatada em diversos estudos conforme citados anteriormente, a não avaliação do transporte de sedimento do corpo hídrico pode ter consequências desastrosas. Schleiss et al. (2016) apresentaram o avanço acelerado da migração do delta do reservatório Wushe (Taiwan) que avançou cerca de 15% do comprimento total do reservatório de 4,5 km em apenas 2 meses (Figura 11). Os mesmos autores explicam que o projeto e o *layout* dos reservatórios e barragens devem considerar a sedimentação do reservatório desde as fases iniciais do planejamento, e existe a necessidade de um banco de dados mundial sobre erosão e perda de solo em bacias hidrográficas em geral e sedimentação de reservatórios em particular.

Figura 11 – Avanço do assoreamento no reservatório Wushe (Taiwan)

Fonte: Schleiss et al. (2016)

Valera e Izquierdo (1984⁶) *apud* Miranda e Mauad (2015) citaram alguns problemas decorrentes do rápido assoreamento do reservatório de Anchicaya (Colômbia) já que 65% da capacidade inicial de armazenamento foi reduzida em um período de 4 anos (1958 a 1962). Fato este também evidenciado no Brasil por Coiado (2001), em que o reservatório da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) de Cariobinha localizado no município de Americana (São Paulo) com $4,2 \times 10^5 \text{ m}^3$ de capacidade teve que ser esvaziado em 1986 e 1992 para desobstrução da tomada d'água devido ao assoreamento. Chanson e James (1998) comentaram que durante o assentamento europeu da Austrália nos séculos 19 e 20, uma série de barragens foi construída no sudeste da Austrália para fins de abastecimento de água. Entre estas, quatro barragens foram assoreadas rapidamente e abandonadas em menos de 25 anos.

Dados problemas associados ao transporte e deposição de sedimentos, de acordo com Wu et al. (2003), estima-se que 160 a 320 novas barragens estão sendo construídas anualmente em todo o mundo. Para Li et al. (2013) são necessários esforços científicos e multidisciplinares, e informações adequadas sobre geologia, hidrologia, biodiversidade e ecologia dos corpos hídricos. Os mesmos autores comentam que além de pesquisas de campo de curto prazo, um monitoramento de longo prazo também deve ser planejado e implementado, incluindo estações de pesquisa permanentes para avaliação dos possíveis impactos negativos causados pela construção de barragens.

Happ (1975), Lai e Capart (2009), Morris e Fan (1998), Randle, Yang e Daraio (2006), Schleiss et al. (2016), Vanoni (1975), White (2001), Yang e Lu (2014) fornecem informações abrangentes sobre deposição em reservatórios e lagos.

⁶ VALERA, N. E.; IZQUIERDO, G. C. **Problemas y soluciones de sedimentatción en la planta del bajo Anchicaya**. In: SEMINARIO LATINOAMERICANO SOBRE PRESAS Y EMBALSES, v. 1, Bogotá, Colômbia, 1984.

3.2. Sedimentometria⁷

A erosão, o transporte e a deposição de sedimentos são processos naturais que podem sofrer desequilíbrio com a ação do homem, prejudicando o meio ambiente e a si mesmo devido à retirada da vegetação, manejo inadequado do solo e a ocupação urbana nas margens de rios. Embora a sedimentometria seja necessária para a compreensão desses processos, as medidas quantitativas dos sedimentos em corpos hídricos são altamente variáveis e difíceis de serem obtidas.

De acordo com Been e Sills (1981), o transporte de sedimentos é controlado, em geral, por três fatores interdependentes: os processos hidrodinâmicos, a morfologia de fundo do corpo hídrico e a concentração de sedimentos em suspensão. Xavier et al. (2014) complementam que concentração de sedimentos em suspensão é um parâmetro importante na determinação das taxas de deposição e fluxo de massa de sedimentos, e sua estimativa precisa é essencial para o conhecimento de seu comportamento na coluna d'água e previsão da descarga sólida.

Segundo Carvalho et al. (2000) e Gray e Landers (2014), a sedimentometria envolve a medida da descarga líquida, amostragem do sedimento em suspensão, amostragem de material do leito, medida da temperatura da água, medida da declividade do gradiente energético da linha d'água, entre outros. Em geral, há três métodos de medição de sedimentos: o método gravimétrico, sensoriamento remoto, e métodos acústicos ou ópticos. Os diversos métodos de medição da descarga em suspensão, do leito ou total, são classificados em diretos (ou *in situ*) e indiretos, abrangendo diversos equipamentos e metodologias que estão descritos no Quadro 3.

Quadro 3 – Métodos de medição de sedimentos

	Medição	Descrição	Equipamentos ou metodologia de medida
Descarga sólida em suspensão	Direta	Utilizam-se equipamentos que medem diretamente no curso d'água a concentração ou outra grandeza como a turbidez.	Medidor nuclear; Ultra-sônico ótico; Turbidímetro; Equipamentos acústicos.
		Por acumulação do sedimento em um medidor	Garrafa Delft

⁷ Parte do texto publicado no periódico: SANTOS, B. B. et al. Evaluation of the laser diffraction method for the measurement of suspended sediment concentration in Mogi-Guaçu reservoir (São Paulo, Brazil). **International Journal of River Basin Management**. p. 1-11, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/15715124.2018.1446965>

	Medição	Descrição	Equipamentos ou metodologia de medida
	Indireta	Coleta de sedimento por amostragem da mistura água-sedimento, análise de concentração e granulometria, e cálculos posteriores da descarga sólida.	Diversos tipos de equipamentos: - de bombeamento, equipamentos que usam garrafas ou sacas, sendo pontuais instantâneos pontuais por integração e integradores na vertical.
		Uso de fotos de satélite e comparação com medidas simultâneas de campo para calibragem em grandes rios.	São estabelecidas equações que correlacionam as grandezas de observação das fotos com as concentrações medidas.
Descarga sólida de arrasto ou de leito	Direta	Amostradores portáteis que são instalados no leito do corpo hídrico durante um tempo para se coletar o sedimento transportado por arrasto.	Cesta ou caixa – medidores Muhlhofer, Ehrenberger, etc; Bandeja ou tanque – medidores Losiebsky, Plyakov, etc; Diferença de pressão – medidores Helley-Smith, Arnhem, etc.
	Indireta	Coleta de material do leito, análise granulométrica, medida da declividade, da temperatura, parâmetros hidráulicos e cálculo da descarga de arrasto e de material do leito por meio de fórmulas.	Equipamentos de penetração horizontal (caçambas de dragagem e de concha); Equipamentos de penetração vertical; Equipamentos tipo <i>piston-core</i> ;
Descarga sólida total	Direta	Uso de estruturas tipo blocos, no leito, para provocar turbulência e todo o sedimento ficar em suspensão	Faz-se a amostragem do sedimento e calcula-se como descarga em suspensão
		Levantamento topo-batimétrico de reservatório, determinação do volume dos depósitos e da eficiência de retenção de sedimentos no lago	1) Para pequenos reservatórios permite o cálculo do sedimento do leito 2) Para grandes reservatórios permite o cálculo do sedimento total
	Indireta	Coleta de material em suspensão e do leito, análise de concentração, análise granulométrica, medida da temperatura, parâmetros hidráulicos e cálculo da descarga total – método modificado de Einstein e método simplificado de Colby	Diversos tipos de equipamentos – de bombeamento, equipamentos que usam garrafas ou sacas, sendo pontuais instantâneos, pontuais por integração e integradores na vertical

Fonte: Adaptado de Carvalho et al. (2000)

As técnicas de amostragem e o tipo de equipamento a serem empregados nas amostragens e monitoramento sedimentométrico apresentam tópicos a serem detalhados em um trabalho sedimentométrico. Os métodos ou técnicas de amostragem são: pontual instantâneo, pontual por integração e integração na vertical. As amostragens pontuais são utilizadas somente em trabalhos específicos ou científicos, sendo a mais rotineira a integração na vertical, porque permite a obtenção da concentração e da granulometria média na vertical.

Caso definido amostragem por integração, deve-se determinar quantas verticais serão adotadas no mínimo, e qual tipo de técnica de amostragem recomendada (Igual Incremento de Largura – IIL ou Igual Incremento de Descarga – IID) (CARVALHO et al., 2000; EDWARDS;

GLYSSON, 1999). Além disso, é importante deixar claro o tipo de equipamento a ser adotado, bem como o método de medição de descarga líquida e os procedimentos de cálculo.

Agência Nacional de Águas – ANA (2012) e Merten e Poletto (2013) alertam que as condições das amostragens devem ser isocinéticas, ou seja, a velocidade de entrada da água no equipamento ser igual à velocidade de escoamento, para que a quantidade de sedimento medido não seja diferente do real. Para a garantia dessas condições, deve-se atentar aos equipamentos utilizados nas medições, pois apresentam especificidades que variam conforme condições hidrodinâmicas do escoamento, profundidade de amostragem e do material a ser coletado.

Na amostragem por integração são realizadas coletas em várias verticais para permitir a obtenção de valores médios em toda a seção, já que a distribuição de sedimentos é variável em toda a largura do rio e em profundidade, atentando-se em obter as amostras com quantidade suficiente para que sejam realizadas análises com a precisão desejada (ANA, 2012). Os volumes necessários para análise dos sedimentos coletados variam conforme a concentração esperada de sedimento em suspensão (Tabela 4), constatando-se que menores concentrações exigem volumes maiores de amostras.

Tabela 4 – Volumes mínimos das amostras necessárias para análise da concentração média de sedimentos em suspensão

Concentração esperada de sedimento em suspensão (mg.L⁻¹ ou ppm)	Volume da amostra (L)
> 100	1
50 a 100	2
20 a 30	5
< 20	10

Fonte: WMO (1981)

De um modo geral, a amostragem mecânica e convencional é uma técnica confiável, bem documentada, e extensamente usada, geralmente considerada como padrão em comparação com outros tipos de medição de sedimentos.

3.2.1 Métodos de estimativa da descarga sólida

As medidas diretas de concentração de sólidos em suspensão são, em geral, mais precisas, desde que adotados os protocolos adequados para coleta e análise. Em contrapartida, segundo Silva e Wilson Júnior (2005), a estimativa da vazão sólida em um rio é provavelmente um dos problemas de maior complexidade em toda hidráulica fluvial. Gartner (2004) complementa que o conhecimento da concentração de sólidos suspensos é necessário para entender esses processos de transporte de sedimentos, no entanto, a medição dessa propriedade potencialmente flutuante sempre foi difícil, na melhor das hipóteses.

A combinação das medidas indiretas com as medidas diretas de sólidos em suspensão através de correlações matemáticas e estatísticas permitem converter os dados de medidas indiretas em concentrações de sólidos em suspensão. De acordo com Nagy, Watanable e Hirano (2002), a importância deste tópico veio de sua influência nas práticas de engenharia fluvial, no gerenciamento de recursos hídricos, e nos projetos de construções como barragens para geração de energia elétrica.

Com isso, muitas aproximações e abordagens para descarga de sedimentos foram desenvolvidas. Nagy, Watanable e Hirano (2002), por exemplo, utilizaram redes neurais artificiais (RNAs) para estimar a descarga sólida nos rios. Os autores concluíram que o modelo de RNAs pode ser aplicado com sucesso para o transporte de sedimentos quando outras abordagens não podem ser bem-sucedidas devido à incerteza e à natureza estocástica do movimento do sedimento.

Entretanto, a medição indireta mais tradicional é feita através da coleta de amostras seja em suspensão ou do material do leito, determinação das características do curso d'água e análise granulométrica do sedimento, possibilitando o cálculo da descarga sólida em suspensão ou de material de leito por uma fórmula ou metodologia (CARVALHO, 2008).

A descarga sólida em suspensão, apesar da complexidade em se estimar, é sempre obtida com maior facilidade. A maior dificuldade, segundo Carvalho (2008) e Paiva, J. (2001) está na determinação da descarga sólida de leito e total devido à maior quantidade de grandezas intervenientes. Elas podem ser classificadas em funções determinísticas, aos quais empregam equações para estimar estes processos, ou em fórmulas estocásticas (probabilísticas) que faz uso de dados medidos em campo para analisar as relações entre as variáveis envolvidas.

Dentre as fórmulas para estimativa da descarga sólida de arrasto (ou leito) e total, apresenta-se no Quadro 4 alguns dos métodos desenvolvidos separadas por categorias.

Quadro 4 – Classificação das metodologias de estimativas das descargas sólidas de leito e total

Descarga sólida	Metodologia	Tipo de Fórmula	Tipo de sedimento (1)	Granulometria recomendada (2)
Fundo	Ackers e White (1973) ⁸	Determinística	F	A, P
	Colby (1964) ⁹	Determinística	F	A
	Einsten (1950)	Probabilística	M	A, P
	Engelund e Hansen (1967) ¹⁰	Determinística	F	A
	Kalinske (1947) ¹¹	Determinística	M	A
	Karim (1998)	Determinística	F	T
	Meyer-Peter e Muller (1948)	Determinística	F	A, P
	Schoklitsch (1934) ¹²	Determinística	M	A, P
	Toffaleti (1969) ¹³	Determinística	M	A
	Yang (1973)	Determinística	O	A
Total	Yang (1984) ¹⁴	Determinística	O	P
	Einstein modificado por Colby e Hembre (1955)	Probabilística	M	T
	Colby (1957)	Determinística	O	T

Legenda: 1 – Fração granulométrica específica (F), Mistura das frações (M) ou opcional (O);

2 – Areias (A), Pedregulhos (P) ou Total (T).

Fonte: Modificado de Stevens e Yang (1989)

Stevens e Yang (1989) consideram os métodos de Schoklitsch (1934), Meyer-Peter e Muller (1948), Engelund e Hansen (1967), Ackers e White (1973), Yang (1973) e Yang (1984) como os de maior confiança para estimativa da descarga sólida de leito. Já em relação aos métodos de estimativa da descarga sólida total, os mais conhecidos são o Método de Einstein modificado por Colby e Hembre (1955) e o Método simplificado de Colby (1957), sendo sua adoção remendada de acordo com os dados disponíveis.

No Quadro 5 são descritos detalhadamente alguns dos principais métodos de estimativa destacando os parâmetros necessários para cálculo da descarga sólida total ou de leito.

⁸ ACKERS, P.; WHITE, W. R. Sediment transport in channels: new approach and analysis. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 99, n.11, p. 2014-2060, 1973.

⁹ COLBY, B. R. Discharge of sands and mean-velocity relationships in sand-bed-streams. In: U. S. GEOLOGICAL SURVEY. **Sediment transport in Alluvial Channels 1963-65**. Washington: USGS, 1964, cap. A, p. 1-47.

¹⁰ ENGELUND, F.; HANSEN, E. **A monograph on sediment transport in alluvial streams**. Copenhagen: Teknisk Forlag, 65p., 1967.

¹¹ KALINSKE, A. A. Movement of sediment as bed load in rivers. **Transactions American Geophysical Union**, v. 28, n. 4, 1947, 615-620.

¹² SCHOKLITSCH, A. **Geschiebetrieb und die Geschiebefracht**. Wasserkraft Wasserwirtsch, v. 39, 1934.

¹³ TOFFALETI, F. B. Definitive Computations of Sand Discharge in Rivers. **J. Hydraulics Div.**, v. 95, n. 1, 1969, 225-248.

¹⁴ YANG, C. T. Unit Stream power equation for gravel. **Journal of Hydr. Engineering**, v. 110, n. 12, 1984, p. 1783-1797.

Quadro 5 – Descrição dos métodos de estimativa da descarga sólida

Método	Tipo de descarga	Tipo de fórmula e respectivas abordagens	Parâmetros requeridos
Método de Yang (1973)	Fundo	Yang (1973) observou que potência unitária do escoamento é um fator dominante na determinação da concentração total de sedimentos. Suas equações podem ser usadas em canais com materiais não coesivos e para qualquer tipo de forma de fundo.	Diâmetro médio do sedimento; Velocidade média do escoamento; Descarga líquida; Largura da superfície do canal; Viscosidade cinemática da água; Profundidade hidráulica; Raio hidráulico; Declividade da linha d'água.
Método de Einstein (1950)	Fundo	O método desenvolvido por Einstein (1950) foi baseado na probabilidade de remoção que relaciona força hidrodinâmica, instantânea, de sustentação com o peso da partícula.	Largura da superfície livre do rio; Declividade da linha d'água; Raio hidráulico; Diâmetro característico $D_{65\%}$; Viscosidade cinemática; Velocidade média da superfície d'água.
Método de Meyer-Peter e Muller (1948)	Fundo	O método é baseado na consideração de uma relação de descarga, onde uma dada porção de energia é consumida para o transporte sólido e a energia remanescente para o movimento líquido.	Peso específico dos sedimentos; Diâmetros característicos do material de fundo; Declividade da linha d'água; Velocidade média da superfície d'água; Forma da seção transversal do canal.
Método de Karim (1998)	Fundo	Karim (1998) apresenta equação para obtenção da descarga de fundo de sedimentos por unidade de largura, tendo como princípio que a velocidade média do escoamento, a velocidade de atrito no fundo e a velocidade de queda das partículas são as variáveis mais importantes.	Largura da superfície do canal; Diâmetro característico do material de fundo $D_{50\%}$; Profundidade hidráulica; Declividade da linha d'água; Viscosidade cinemática da água.
Método de Einstein modificado por Colby e Hembre (1955)	Total	Método probabilístico resultado de vários anos de pesquisa em rios rasos e profundos no estado de Nebraska. Neste método é necessário medições da descarga sólida em suspensão e obtenção da descarga sólida de fundo, necessitando de informações consideráveis e a utilização de ábacos.	Descarga líquida; Características hidráulicas da seção; Declividade da linha d'água; Concentração de sedimentos em suspensão; Viscosidade cinemática da água; Intensidade de cisalhamento; Diâmetro do sedimento dominante; Diâmetro característico $D_{35\%}$; Diâmetro característico $D_{65\%}$.
Método simplificado de Colby (1957)	Total	O método de Colby (1957) para estimativa da descarga sólida total foi baseado no método de Einstein e em várias medições de campo. Neste método a descarga sólida é dividida em medida e não-medida, sendo a primeira facilmente calculada por equações de cálculo da descarga sólida em suspensão, enquanto que a segunda é estimada a partir de ábacos.	Descarga líquida; Concentração de sólidos suspensos; Largura do corpo hídrico; Velocidade média; Profundidade;

Fonte: Modificado de Santos et al. (2012)

Alonso, Neibling e Foster (1981) comentam que a previsão das taxas de transporte de sedimentos difere significativamente entre as fórmulas, tornando difícil a seleção de uma equação confiável para estimativa de uma carga específica. Por isso, alguns trabalhos foram realizados comparando as descargas sólidas estimadas com medições diretas. Alonso, Neibling e Foster (1981) avaliaram as fórmulas de estimativa utilizando dados de concentração de sedimentos adquiridos na literatura consistindo em 40 medições de campo realizadas no Niobrara River em Nebraska (EUA). Assim, para cada conjunto de dados, a taxa de discrepância média, dada pela relação entre as descargas estimadas e medidas, foi calculada juntamente com a percentagem de dados para os quais as previsões ficaram entre 0,5 e 2 vezes os valores observados (Tabela 5).

Tabela 5 – Comparação da descarga sólida estimada e medida

Fórmula	Nº de testes	Taxa de discrepância média entre valores estimados e medidos de descarga sólida	Porcentagem de testes com taxa de discrepância entre 0,5 e 2 (%)
Ackers e White (1973)	40	1,27	88
Einstein (1950) para carga de leito	40	0,83	59
Einstein (1950) para material de leito	40	0,93	63
Engelund e Hansen (1967)	40	1,46	83
Lauresen (1958) ¹⁵	40	0,65	56
Meyer-Peter e Muller (1948)	40	0,24	0
Yang (1973)	40	1,01	93

Fonte: Alonso, Neibling e Foster (1981)

Apesar da alta discrepância entre os valores medidos e observados de descarga sólida relacionada ao método de Meyer-Peter e Muller para a situação apresentada anteriormente, em experimentos com sedimentos de menor granulometria, a porcentagem de testes com taxa de discrepância entre 0,5 e 2 para o mesmo método chegou a 76% conforme Alonso, Neibling e Foster (1981).

Scapin, Paiva e Beling (2007) constataram que os métodos de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955) e Colby (1957), que incorporam dados medidos de concentração de sedimentos em suspensão, forneceram os melhores resultados em uma seção do rio Arroio

¹⁵ LAURSEN, E. M. The total sediment load of streams. **J. Hydraulics Division**, v.84, n. 1, 1958, 1-36.

Cancela em Santa Maria (RS). Os mesmos autores ainda comentam que no caso da ausência de medidas da concentração de sedimentos em suspensão, é possível aplicar o Método de Yang (1973) que apresentou o melhor resultado, em relação aos demais, quando comparado com dados medidos.

Em estudo na bacia hidrográfica do Córrego Guariroba (MS), região de Área de Preservação Ambiental, Santos et al. (2012) verificaram que de todos os métodos de estimativa de descarga sólida de fundo, o método de Meyer-Peter e Muller (1948) e o Método de Einstein (1950) apresentaram melhores ajustes estatísticos se comparado às medições diretas. Então, a seleção do método de estimativa requer estudo prévio de comparação dos métodos para determinar qual equação melhor se adequa a situação.

3.2.2 Estimativa da descarga sólida a partir de outros parâmetros hidrossedimentológicos

Os melhores métodos para estimativa de descarga sólida em suspensão, de fundo ou total requerem dados de concentração de sedimentos e granulometria. As medições e coletas no campo são de fundamental importância para a obtenção dessa informação, entretanto, de acordo com Gartner (2004), este método pode ser adequado para algumas aplicações, mas tem limitações, principalmente devido ao caráter mutável de materiais suspensos, recomendando-se o monitoramento dos sedimentos. Com isso, a utilização de instrumentos sonoros e ópticos *in situ* com a capacidade de produzir séries temporais de medições de alta frequência para os materiais suspensos ajudam a resolver a natureza variável dos sólidos em suspensão (DEINES, 1999).

A prática de estimar a quantidade de sólidos suspensos a partir de dados de turbidez, *backscatter* provenientes de ADCPs (*Acoustic Doppler Current Profiler*) ou até mesmo de dados fornecidos por sondas LISST (*Laser In-Situ Scattering and Transmissometry*) é relativamente comum e adotada em diversos trabalhos técnicos e científicos como Agrawal e Pottsmith (1994), Daphne, Utomo e Kenneth (2011), Deines (1999), Dinehart e Burau (2005), Gartner (2004), Ghaffari et al. (2011), Oliveira et al. (2018), Rügner et al. (2013), Topping et al. (2006), Williamson e Crawford (2011).

Turbidez é um parâmetro de qualidade de água associado à dispersão da luz devido a presença de partículas suspensas na água, podendo ser medida por sensores óticos como sondas multiparâmetros. Com as recentes melhorias na tecnologia e a possibilidade de estimar a concentração de sedimentos em suspensão (CSS) a partir da turbidez, esforços são aplicados para equipar bacias hidrográficas com sensores (RÜGNER et al., 2013).

A relação entre turbidez e CSS, no entanto, depende do tamanho, densidade, forma e tipo das partículas suspensas em geral, bem como da cor da água (DOWNING, 2006; GIPPEL, 1995). Apesar de todas essas complicações, geralmente uma relação quase linear é observada entre as variáveis, corroborada em alguns trabalhos na literatura (Quadro 6). É possível notar que cada trabalho fornece uma equação diferenciada para estimativa dos sólidos suspensos de um corpo hídrico. Isso indica a necessidade de um estudo prévio na área de estudo buscando a calibração do método de estimativa.

Quadro 6 – Relação de CSS versus Turbidez encontrada na literatura

Referência	Relação	R ²	Faixa de turbidez	Meio/Localização do estudo
Weib (1998) ¹⁶	CSS = 0,48.Turbidez	0,99	100-2.000	Caulinita (laboratório)
Thackston e Palermo (2000) ¹⁷	CSS = 2,1.Turbidez	0,99	5-200	Coluna de sedimento (laboratório)
Ziegler et al. (2011) ¹⁸	CSS = 1,38.Turbidez	0,86	>1.000	<i>Mae As catchment</i> (Thailand)
Stubblefield et al. (2007) ¹⁹	CSS = 3,3.Turbidez – 6,54	0,91	<50	Lago Tahoe (Califórnia)
Dowing (2006)	CSS = 1,85.Turbidez	0,97	20-320	Baía de São Francisco (California)

Fonte: Adaptado de Rügener et al. (2013)

Tomazoni et al. (2005) propuseram um processo simples de estimativa da concentração de sólidos em suspensão a partir da turbidez para as bacias hidrográficas do Sudoeste do Estado do Paraná que sejam tipicamente agrícolas. Após junção dos dados de alguns rios da região, os autores identificaram fator de conversão de turbidez (em NTU) para concentração de sedimento suspenso (em mg.L⁻¹) em torno de 0,6937. Além disso, Tomazoni et al. (2005), utilizando tal fator, verificaram que o coeficiente de determinação (R²) foi de 0,73 no rio Coxilha Rica, 0,85 no rio Jirau, 0,92 no rio Anta Gorda e 0,94 no rio Brinco, indicando boas correlações.

De acordo com Daphne, Utomo e Kenneth (2011), Singapura conta com vários projetos de construção. As atividades de construção podem resultar em um aumento na poluição da água do rio, especialmente na concentração de sedimentos, próximo a locais de construção. Sendo

¹⁶ WEIß, H (1998) Sa“ulenversuche zur Gefahrenbeurteilung fu“r das Grundwasser an PAK kontaminierten Standorten. **Tu“binger Geowissenschaftliche Arbeiten (TGA)**, C 45, p 111.

¹⁷ THACKSTON, E. L.; PALERMO, M. R. Improved methods for correlating turbidity and suspended solids for monitoring. In: US ARMY ENGINEER RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER. **DOER technical notes collection (ERDC TN-DOER-E8)**, Vicksburg, 2000, 12p.

¹⁸ ZIEGLER, A.D.; XI, L. X.; TANTASARIN, C. Sediment load monitoring in the Mae Sa catchment in northern Thailand. IN: WALLING, D.E. (ed) **Sediment problems and sediment management in Asian river basins**, 349th ed.. IAHS, Wallingford, 2011, p. 86–91.

¹⁹ STUBBLEFIELD A. P. et al. Use of turbidimetry to characterize suspended sediment and phosphorus fluxes in the Lake Tahoe basin, California, USA. **Hydrol Process**, v. 21, 2007, p. 281–291.

assim, os autores realizaram um estudo estabelecendo uma correlação entre CSS e turbidez para oferecer mais eficiência na previsão da concentração de sólidos suspensos em um rio. A relação positiva entre os parâmetros com R^2 aproximadamente 0,81 indicou que a medição da turbidez é possivelmente a opção mais econômica para estimar a concentração total de sólidos suspensos em um rio.

Outra metodologia empregada na estimativa de sólidos suspensos em corpos hídricos são as medições com o ADCP, equipamento mundialmente conhecido no meio hidrológico. Esses equipamentos são utilizados para medir velocidades das partículas presentes nas correntes de água em diferentes profundidades e determinar a vazão em seções transversais de rios, através do somatório de sucessivos perfis de corrente obtidos em tempo real. Originalmente, os instrumentos foram desenvolvidos para medir as correntes marítimas e, a partir da década de 80, têm sido adaptados com sucesso, na medição de vazões em cursos d'água, especialmente estuários e em grandes rios (GARTNER, 2004).

Este equipamento utiliza como princípio o efeito *Doppler*, sendo constituído por sensores (transdutores) que, alternadamente, assumem as funções de emissor e receptor de pulsos sonoros. Ao emitir uma onda sonora, os pulsos acústicos percorrem a coluna d'água, formando feixes sonoros. As partículas de sedimentos transportados pela água refletem os pulsos que retornam para o instrumento, registrando essa frequência modificada, chamado de *backscatter* (Figura 12).

Figura 12 – Princípio de funcionamento de um ADCP

Fonte: Adaptado de WMO (2008b)

ADCPs têm diversos usos como medições da descarga líquida, da velocidade, medições de turbidez, análises de transporte de sedimentos, avaliação de habitat aquático, validação de modelos numéricos e pesquisas geomorfológicas e hidráulicas (CARR; REHMANN, 2007; NYSTROM; REHMANN; OBERG, 2007; SHIELDS; RIGBY, 2005).

A relação entre método acústico e concentração de sedimentos em suspensão tem sido estudada ao longo dos últimos anos. Young et al. (1982) foram um dos pioneiros a correlacionar *backscatter* (ABS) com sólidos suspensos. Neste trabalho em específico, os autores verificaram uma relação aproximadamente linear entre intensidade de sinal sonoro proveniente do equipamento e sedimento marinho.

Posteriormente Thorne, Hardcastle e Soulsby (1993) mostraram a utilidade das medições de sedimentos em suspensão usando equipamentos acústicos. Segundo os autores, a aplicação desse método forneceu boa concordância entre os valores medidos e estimados de CSS. No Brasil, Filizola e Guyot (2004) avaliaram o desempenho da tecnologia Doppler em medições de vazão, amostragem de sedimentos e de cálculo de descarga no Rio Amazonas, sendo um dos pioneiros no Brasil. Segundo os autores, a diferença entre CSS medido e estimado por meio do ABS foi de 28%.

De acordo com Ghaffari et al. (2011), a utilização de dados acústicos e *backscatter* para quantificar a concentração de sólidos suspensos está se tornando comum devido as vantagens sobre outros métodos. Os autores chegaram a essa conclusão após utilizarem dois ADCPs paralelamente as amostragens tradicionais de sedimentos em suspensão em um complexo portuário de Imam localizado no Irã. Além da compatibilidade qualitativa do CSS medido e estimado, Ghaffari et al. (2011) obtiveram uma correlação bastante alta ($R^2 = 88\%$).

Há algumas limitações significativas ao se utilizar o equipamento, sendo a mais crítica a presença de bolhas de ar na coluna d'água, induzindo um ruído considerável nos resultados. Portanto, deve-se analisar qual modelo de ADCP operar já que quanto maior a frequência, menor é a profundidade que o sinal acústico atinge ao se deslocar na água sem perdas significativas na sua intensidade.

Outro equipamento utilizado em estudos hidrossedimentológicos é a sonda LISST (Figura 13). Trata-se de um equipamento a *laser* para mensuração da concentração volumétrica e da granulometria de sedimentos em suspensão *in situ*, com maior velocidade e menor volume de amostras, a partir da tecnologia de difração a laser de baixo ângulo.

Figura 13 – Exemplo de equipamento a laser (LISST-100X)

Fonte: Sequoia (2013)

Basicamente, quando a luz irradia o sedimento, a luz difratada ignora as partículas e é focada através de uma lente convexa para um detector de fotodiodo composto por 32 anéis, e, em seguida, a energia recebida do laser é preservada e convertida para gerar a distribuição de tamanho das partículas e concentração (DU; SONG, 2012).

A LISST fornece dados de concentração de sólidos suspensos expressos em unidades volumétricas ($\mu\text{L.L}^{-1}$), de modo que os resultados obtidos devem ser calibrados (XIAU et al., 2014). Segundo Czuba et al. (2015) um dos maiores desafios, é a conversão da concentração em volume de sedimentos em suspensão (CSS_v) para CSS. Teoricamente, se as faixas de tamanhos de sedimento forem incluídas no CSS_v medido, e as densidades do sedimento forem conhecidas para todos os tamanhos, pode-se converter a concentração volumétrica para massa simplesmente multiplicando a medida volumétrica pelo peso específico do sedimento (Equação 1) (AGRAWAL; POTTSMTITH, 2000; CZUBA et al., 2015).

$$\text{CSS} = d \cdot \text{CSS}_v \quad (1)$$

Sendo:

CSS = Concentração de sedimentos em suspensão [mg. L^{-1}];

d = densidade ou massa específica do sedimento [g.cm^{-3}];

CSS_v = Concentração volumétrica de sedimentos em suspensão [$\mu\text{L.L}^{-1}$].

Entretanto não se pode adotar o método com segurança. As características dos corpos hídricos são dinâmicas, assim como a densidade. Sugere-se buscar a relação entre CSS e CSS_v

por meio de regressões lineares, obtendo-se um valor de “densidade efetiva”, que muitas vezes não representa a densidade real do sedimento.

Czuba et al. (2015) comparando com medições convencionais, geraram melhores estimativas da concentração de sedimento em suspensão ao multiplicar CSS_v por uma densidade efetiva de $1,24 \text{ g.cm}^{-3}$ obtida na regressão linear, ao invés de utilizar a densidade média das partículas, cujo valor era $2,67 \text{ g.cm}^{-3}$. De acordo com Czuba et al. (2015) e Williams, Walling e Leeks (2007), o erro médio gerado na estimativa da CSS, ao multiplicar CSS_v pela massa específica média medida pode chegar a 100%, sendo mais seguro a utilização de regressões lineares.

Trabalhos abrangentes e maiores informações a respeito dos princípios da difração a laser e avaliações do método podem ser encontrados em trabalhos de Agrawal e Pottsmith (2000), Davies et al. (2012), Felix, Albayrak e Boes (2013), Gartner et al. (2001), Guerrero et al. (2017), Traykovski, Latter e Irish (1999) e Xiau et al. (2014).

A combinação de técnicas é essencial nas primeiras medições para auxiliar na compreensão dos processos sedimentológicos que ocorrem em corpos hídricos. Neste caso, empregar a sonda LISST e/ou ADCP juntamente com o método tradicional, além de permitir calibração do equipamento, a amostragem mecânica é uma técnica confiável, bem documentada, e extensamente usada, geralmente considerada como padrão em comparação com outros tipos de medição de sedimentos (CARVALHO, 2008).

Guerrero et al. (2017) por exemplo, ao combinar métodos acústicos e ópticos, localizou processos de ressuspensão de sedimento de leito do rio Danube localizado na Hungria. Além disso, a implantação combinada de métodos ajudou a detectar condições ideais para a medição com a sonda LISST em um grande canal fluvial.

Topping et al. (2006) em estudo no rio Colorado, próximo do Grand Canyon, Arizona, utilizando um sistema de equipamentos incluindo sonda LISST-100X, LISST-25X e três ADCPs de frequências distintas, concluíram que os dados de sedimentos coletados diariamente associando difração a laser e instrumentos acústicos possuem maior acurácia do que a utilização de equipamentos convencionais.

Unverricht et al. (2014) através de medições com a sonda LISST-100X e o Perfilador Acústico de Corrente por Efeito Doppler (1200 kHz) estudaram a dinâmica do sedimento em suspensão durante a estação inter-monção no delta do rio Mekong (sudeste do Vietnã). As correlações se mostraram boas, o que possibilitou gerar a distribuição espacial do sedimento em suspensão para a região.

Haun et al. (2013) utilizaram o modelo tridimensional SSIIM (*Sediment Simulation in In-Takes with Multiblock option*) para estudar a variação espacial da concentração dos sedimentos em suspensão e granulometria do reservatório pertencente a hidrelétrica de Angostura situada na bacia hidrográfica do rio Reventazón, no centro da Costa Rica. Na validação do modelo realizaram simulação do estado estacionário do transporte de sedimentos em suspensão e a simulação transiente do padrão de deposição de sedimentos no reservatório comparando com os dados obtidos pela sonda LISST. Por meio das comparações constataram que o modelo numérico poderia fornecer resultados razoáveis.

No Brasil, alguns estudos já foram realizados utilizando difração a laser. Fillipa et al. (2011) compararam, em laboratório, a granulometria de sedimentos em suspensão de alguns rios brasileiros, como o Amazonas e o Paraná, mensuradas por duas sondas LISST-25X e o equipamento *Malvern Mastersizer 2000* (*Malvern Instruments Ltd.*) e obtiveram correlações satisfatórias, possibilitando assim, estimar a granulometria do sedimento.

Por fim, essas medições são muito úteis, pois permitem a obtenção de uma grande quantidade de dados para o diagnóstico das condições do corpo hídrico com um reduzido esforço para coleta, armazenagem e análise de amostras físicas de sólidos em suspensão. Em contrapartida, tendo em vista a quantidade de dados gerados, deve-se aplicar teorias probabilísticas e testes estatísticos para explicar a frequência da ocorrência desses dados, assim como verificar incertezas e normalidade, que venham a auxiliar até mesmo na previsão de fenômenos hidrossedimentológicos.

3.3. Estatística e probabilidade

Tendo em vista a complexidade envolvendo alguns dos testes estatísticos, nesta tese serão abordados os principais conceitos envolvendo a inferência estatística. Vale destacar que parte dessa revisão bibliográfica foi preparada com o objetivo de auxiliar o usuário da Ferramenta Computacional (NH *Sediment and Statistic*) desenvolvida na realização dos testes e interpretação dos resultados. Antes de apresentar o conceito dos testes estatísticos, é necessário definir alguns pontos importantes na estatística: teste de hipóteses e o p-valor.

Os testes de hipóteses são procedimentos usuais da inferência estatística, úteis na tomada de decisões que importam a forma ou o valor de um certo parâmetro de uma distribuição de probabilidades da qual se conhece apenas uma amostra de observações (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

De acordo com Larson e Farber (2010) e Morettin e Bussab (2010), a associação de uma variável aleatória X a uma população se tem uma hipótese sobre determinado parâmetro τ (média, variância, etc.). Cria-se então, um par de hipóteses, uma representando a afirmação e outra, sua negação, o que caracteriza respectivamente a Hipótese Nula (H_0) e Hipótese Alternativa (H_a). A primeira afirma que o parâmetro τ da população é igual, menor ou maior a um valor hipotético amostral τ_0 , enquanto a hipótese alternativa afirma o contrário. Nas Equações 2 a 4 estão sintetizados, respectivamente, os tipos de testes de hipóteses bicaudais (bilateral), unilateral à esquerda e unilateral à direita.

$$H_0: \tau = \tau_0 \Rightarrow H_a: \tau \neq \tau_0 \quad (2)$$

$$H_0: \tau \geq \tau_0 \Rightarrow H_a: \tau < \tau_0 \quad (3)$$

$$H_0: \tau \leq \tau_0 \Rightarrow H_a: \tau > \tau_0 \quad (4)$$

Sendo:

H_0 = Hipótese nula;

H_a = Hipótese alternativa;

τ = parâmetro qualquer associado a uma população estatística (média, desvio, etc.);

τ_0 = valor hipotético amostral para o parâmetro τ ao qual se deseja testar.

O objetivo do teste de hipóteses é verificar, por meio de um teste estatístico, se a hipótese H_0 é ou não aceitável. Operacionalmente, essa decisão é tomada através da consideração de uma região crítica estabelecida a partir do nível de significância α (Figura 14). Diante do

exposto, a rejeição da hipótese nula acontece quando a estimativa da estatística de teste encontrar-se dentro da região crítica (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Figura 14 – Diferentes tipos de regiões críticas conforme hipóteses nulas e alternativas

Fonte: Adaptado de Portal Action (2018a)

Em resumo, caso se opte pela realização dos testes de hipóteses usando a região crítica ou região de rejeição, deve-se, inicialmente, enunciar a hipótese nula e a hipótese alternativa. Em seguida, deve-se selecionar a estatística amostral (exemplos: teste Z, teste F, teste T, etc.) a ser utilizada e o nível de significância α , que geralmente é 5% ou 0,05. Então, faz-se os cálculos para determinar a estimativa do teste a partir das observações da amostra da população. Por fim, se o valor da estatística calculado anteriormente pertencer à região crítica definida pelo nível de significância, rejeita-se a hipótese nula. Caso contrário, não se rejeita a hipótese nula.

Outra forma de avaliar as hipóteses nula e alternativa de um dado parâmetro τ consiste em apresentar a probabilidade de significância ou p-valor do teste e compará-lo ao nível de significância α . De acordo com Portal Action (2018a) p-valor é a probabilidade de que a estatística de um teste tenha valor extremo em relação ao valor observado quando H_0 é verdadeiro. Em geral, quanto menor for o valor-p, a evidência da amostra é mais forte para rejeição da H_0 . Mais especificamente, caso p-valor for menor que α , resulta-se na rejeição de H_0 – Equação 5 (MINITAB INC., 2017). Exemplifica-se na Figura 15 os critérios de rejeição ou não de H_0 para testes bilaterais.

$$Se \begin{cases} pvalor \leq \alpha, & \text{Rejeita-se } H_0 \\ pvalor > \alpha, & \text{Não se rejeita } H_0 \end{cases} \quad (5)$$

Em que:

p-valor = probabilidade de significância;

α = nível de significância.

Figura 15 - Critérios de rejeição ou não de hipótese nula com base no p-valor para testes bilaterais

Fonte: Adaptado de Portal Action (2018a)

O p-valor além de ser o caminho mais rápido para o teste de hipótese, fornece a ideia de quanto os dados contradizem a hipótese nula e permite a utilização de diferentes níveis de significância para avaliar os resultados (LARSON; FARBER, 2010; PORTAL ACTION, 2018a)

Por fim, conhecendo-se as definições de testes de hipóteses e p-valor, o entendimento dos testes estatísticos e seus resultados se torna transparente e de simples interpretação.

3.3.1. Distribuição Normal e Teste de Normalidade

Dada uma variável aleatória contínua X , na estatística se interessa saber qual a função densidade de probabilidade de X . Atualmente existem alguns modelos probabilísticos como: Exponencial, Gumbel, Log-Normal, t de Student, Uniforme, Poisson, entre outros. Dentre tais modelos, a distribuição normal é a mais importante entre todas as distribuições da estatística (DEVORE; 2006; LARSON; FARBER, 2010).

Por definição, diz-se que uma variável contínua X possui distribuição normal com parâmetros μ (média) e σ (desvio padrão), onde $-\infty < \mu < \infty$ e $0 < \sigma < \infty$, se a função de densidade de probabilidade de X atender a Equação 6. Na Figura 16 está ilustrada uma particular curva normal ou gaussiana com média μ e desvio padrão σ .

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad x \in (-\infty, \infty) \quad (6)$$

Em que:

x = variável contínua;

μ = média populacional;

σ = desvio padrão populacional;

σ^2 = variância populacional.

Figura 16 – Função densidade de probabilidade de uma variável aleatória normal com média μ e desvio padrão σ

Fonte: Adaptado de Morettin e Bussab (2010)

Quando $\mu=0$ e $\sigma^2=1$, tem-se a distribuição normal padrão $X \sim N(0,1)$, amplamente utilizada em testes estatísticos, já que segundo Devore (2006) se trata de uma distribuição de referência a partir da qual podem ser obtidas informações sobre outras distribuições normais.

Procedimentos estatísticos como testes de médias, testes para coeficientes de regressão, análise de variância e o teste F de homogeneidade de variância têm como pressuposto subjacente que os dados amostrados provêm de uma distribuição normal (AMERICAN SOCIETY PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING – ASPRS, 2015; THODE JUNIOR, 2002). Box (1953) ainda complementa que os testes estatísticos são derivados de várias suposições, em particular, de que as observações são normalmente distribuídas. No entanto, o autor diz que como pouco se sabe sobre as populações de onde são extraídas as amostras, esses testes são usados, por necessidade, como se a suposição de normalidade pudesse ser ignorada.

Parte dos problemas que se encontra em estatística são tratados com a hipótese que os dados apresentam distribuição normal, entretanto, nem sempre se pode assumir tal premissa.

Box (1953) mostrou que o teste de homogeneidade de variância foi seriamente comprometido pela não-normalidade, sendo um equívoco utilizar tal teste.

Simulações de Pearson e Please (1975) confirmaram os resultados teóricos sobre a falta de robustez do teste F para homogeneidade de variância para amostras pequenas. Os autores usaram amostras de tamanho 10 e 25, e mostraram que a não-normalidade afeta seriamente o verdadeiro nível de significância do teste de variância única e as duas razões de variância da amostra, mesmo para distribuições simétricas.

Além disso, Pearson e Please (1975) concluíram também que teste T para uma amostra foi afetado pela assimetria existente em distribuições não-normais, e que o teste T para duas amostras independentes foi muito afetado quando as amostras vêm de populações idênticas. Portanto, em teoria, antes de adotar uma distribuição particular, como a Normal, para avaliar a probabilidade de ocorrência de um determinado valor de dados é preciso verificar se a função fornece um ajuste razoável e paramétrico (BLAIN, 2014).

Com esse intuito, tem-se os testes de normalidade que examinam se um conjunto de observações de uma determinada variável possuem distribuição normal. Entre eles estão o de Kolmogorov-Smirnov apresentados por Kolmogorov (1933) e Smirnov (1939), Shapiro-Wilk desenvolvido por Shapiro e Wilk (1965), e o teste Anderson-Darling apresentado por Anderson e Darling (1954). Todos eles possuem a hipótese nula que os dados possuem a distribuição normal, e contrariamente, a hipótese alternativa que os dados possuem distribuição diferente da normal (não-normal) – Equação 7.

$$\begin{aligned} H_0: & \text{Os dados possuem distribuição normal } X \sim N(0,1) \\ H_a: & \text{Os dados não possuem distribuição normal } X \sim N(0,1) \end{aligned} \quad (7)$$

Em que:

H_0 = hipótese nula;

H_a = hipótese alternativa.

Nesta tese abordaremos especificamente o teste Kolmogorov-Smirnov (KS) para normalidade. Conforme dito anteriormente, o teste foi desenvolvido inicialmente por Andrey Nikolaevich Kolmogorov para amostra única de dados (KOLMOGOROV, 1933). Já o teste para duas amostras independentes foi implementado por Vladimir Ivanovich Smirnov (SMIRNOV, 1939). Além disso, as tabelas com valores críticos foram apresentadas por Massey (1952) para o teste de duas amostras independentes, e por Miller (1956) para amostra única, facilitando a aplicação e obtenção dos resultados para esse teste.

Conforme metodologia proposta por Kolmogorov(1933), para implementar o teste KS os elementos da amostra são classificados em ordem crescente $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$, onde $1 \leq i \leq n$ denota ordem de classificação. Assim, para cada elemento x_i , calcula-se a distribuição empírica $F_N(x_i)$, para $i = 1, 2, \dots, n$, dada pela Equação 8.

$$F_N(x_i) = \frac{i}{n} \quad (8)$$

Em que:

$F_N(x_i)$ = Função distribuição acumulada empírica dos dados;

i = índice que denota classificação do conjunto amostral;

n = tamanho amostral.

Em seguida se deve calcular a função distribuição acumulada $F(x_i)$ para o conjunto de dados. De acordo com Stephens (1974), $F(x_i)$ pode ser classificada em quatro tipos distintos apresentados no Quadro 7.

Quadro 7– Classificação da função distribuição acumulada

Situação	Descrição do cálculo de $F(x_i)$
Caso 1	$F(x_i)$ contínua e completamente especificada, dispensando o uso de tabelas;
Caso 2	$F(x_i)$ apresentando distribuição normal, σ^2 conhecida e μ estimada pela média amostral $\bar{x}$;
Caso 3	$F(x_i)$ apresentando distribuição normal, μ conhecida e σ^2 estimada pelo desvio padrão amostral s^2 ;
Caso 4	$F(x_i)$ apresentando distribuição normal com μ e σ^2 desconhecidos e estimados, respectivamente, por $\bar{x}$ e s^2

Fonte: Adaptado de Stephens (1974)

Em um teste de normalidade, o caso 4 é a situação prática mais importante e que mais ocorre, embora o caso 2 às vezes apareça caso alguém desejar testar os resíduos na análise de regressão, transformada para combinações lineares de resíduos que são teoricamente independentemente normal com média zero, mas com variância desconhecido (DALLAL; WILKINSON, 1986; STEPHENS, 1974).

Assim, para cada elemento x_i , a função distribuição acumulada $z_i = F(x_i)$ para $i = 1, 2, \dots, n$, é estimada em dois estágios: primeiro se calcula w_i por meio da Equação 9, e então z_i é a probabilidade cumulativa da distribuição normal padrão $z_i \sim N(0,1)$ para o valor w_i encontrado na tabela padrão (Anexo A).

$$w_i = \begin{cases} (x_i - \bar{x})/\sigma, & \text{para o Caso 2} \\ (x_i - \mu)/s, & \text{para o Caso 3} \\ (x_i - \bar{x})/s, & \text{para o Caso 4} \end{cases} \quad (9)$$

Sendo:

w_i = valor estatístico da distribuição normal padrão para x_i ;

x_i = elemento i de uma amostra da população X ;

$\bar{x}$ = média amostral;

μ = média populacional;

s = desvio padrão amostral;

σ = desvio padrão populacional.

Este teste observa a máxima diferença absoluta entre a função de distribuição acumulada assumida para os dados, no caso a Normal, e a função de distribuição empírica dos dados (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Segundo Kolmogorov (1933), a estatística utilizada para o teste é dada pela Equação 10. Entretanto, como a função de distribuição acumulada $F(x_i)$ é descontínua, deve-se considerar duas estatísticas conforme Equações 11 e 12 (KOLMOGOROV, 1933; SMIRNOV, 1939; STEPHENS, 1974).

$$D = \max_x |F(x_i) - F_N(x_i)| \quad (10)$$

$$D^+ = \max_{x_{(i)}} |F(x_{(i)}) - F_N(x_{(i)})| \quad (11)$$

$$D^- = \max_{x_{(i)}} |F(x_{(i)}) - F_N(x_{(i-1)})| \quad (12)$$

Sendo:

$F_N(x_i)$ = Função distribuição acumulada empírica dos dados;

$F(x_i)$ = Função distribuição acumulada assumida para os dados;

$F_N(x_{i-1})$ = Elemento anterior da função distribuição acumulada empírica dos dados;

i = índice que denota classificação do conjunto amostral;

D = valor da estatística Kolmogorov-Smirnov sem correção;

D^+ e D^- = limites máximos à direita e esquerda da estatística Kolmogorov-Smirnov.

Lembrando que $F(x_i)$ é a função de distribuição acumulada assumida para os dados, que $F_N(x_i)$ é a função de distribuição empírica, deseja-se testar $H_0: F(x) = F_N(x)$ que indica que os

dados seguem distribuição normal contra a $H_a: F(x) \neq F_N(x)$ indicando que os dados seguem distribuição não-normal.

Neste caso, a estatística D_n do teste Kolmogorov-Smirnov é calculada por meio da Equação 13. Assim, utilizando-se o quadro de valores críticos para o teste de normalidade KS (D_{crit}) proposto por Miller (1956) para um dado nível de significância α do Anexo B, e o comparando com o valor da estatística D_n , têm-se as seguintes possibilidades apresentadas na Equação 14.

$$D_n = \max(D^+, D^-) \quad (13)$$

$$Se \begin{cases} D_n \leq D_{crit} \Rightarrow H_o: F(x) = F_N(x) \Rightarrow \text{Dados normais} \\ D_n > D_{crit} \Rightarrow H_a: F(x) \neq F_N(x) \Rightarrow \text{Dados não - normais} \end{cases} \quad (14)$$

Segundo Vieira (2011), a grande vantagem de pressupor que uma variável tem distribuição normal é o fato de ser possível calcular as probabilidades relacionadas a essa variável. Além disso, segundo a mesma autora, dados se seguem a distribuição normal apresentam média, mediana e moda coincidentes e localizadas no centro da distribuição.

3.3.2. Testes Paramétricos e Não-paramétricos

Os testes de hipóteses podem ser classificados em paramétricos ou não paramétricos. Eles são ditos paramétricos se os dados amostrais, por premissa, tiverem sido extraídos de uma população Normal ou de qualquer outra população, cujo modelo distributivo é conhecido ou previamente especificado. Ao contrário, os testes não paramétricos, ou também chamados de testes livres de distribuição, não necessitam da especificação prévia do modelo distributivo da população, da qual foram extraídos os dados amostrais (EVERITT; SKRONDAL, 2010; NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Alguns dos procedimentos da inferência estatística – teste F, teste T, ANOVA entre outros – partem do pressuposto de que os dados amostrais estejam distribuídos de acordo com uma distribuição específica e conhecida. Já para a estatística não-paramétrica, de acordo com Contador e Senne (2016) e Morettin e Bussab (2010), agrega-se um grande número de técnicas de inferência cujo fator preponderante são as poucas suposições sobre como os dados foram gerados. Além disso, exigem apenas que as amostras sejam independentes ou que os dados sejam obtidos aleatoriamente. Devore (2006) complementa que os procedimentos livres de distribuição têm desempenho quase tão bom quanto seus concorrentes T e F quando a

distribuição for normal, e frequentemente oferecem uma melhora considerável sob condições não-normais.

Historicamente Hotelling e Pabst (1936) foram um dos pioneiros a apresentar testes livres de distribuição envolvendo a aplicação do método de *ranks*. Em seguida, Friedman (1937) usou o método de ranks para evitar a suposição implícita de normalidade na análise da variância. O mesmo autor diz que a utilização de dados ordenados (*ranks*) é um dispositivo desejável para evitar suposições de normalidade. Outros trabalhos vieram em seguida explorando o conceito de classificação dos dados em *ranks* como Kruskal e Wallis (1952), Mann e Whitney (1947) e Wilcoxon (1945),

A seguir será descrito alguns dos testes mais importantes na inferência estatística. Alguns dos testes de hipóteses paramétricos e as respectivas alternativas não-paramétricas estão listados no Quadro 8.

Quadro 8 – Analogias dos testes não-paramétricos para os procedimentos conhecidos paramétricos

Paramétricos	Não-Paramétrico
Coeficiente de Pearson para correlação	Coeficiente de Spearman para correlação
Análise de Variância – ANOVA	Teste de Kruskal-Wallis
Teste T para 1 amostra	Teste Wilcoxon
Teste T para 2 amostras independentes	Teste Wilcoxon-Mann-Whitney
Teste T pareado	Teste Wilcoxon pareado

Fonte: Adaptado de Portal Action (2018b)

3.3.2.1. Teste de hipótese para variância e desvio padrão de uma amostra

A premissa básica do teste paramétrico para variância de uma única população normal é que as variáveis aleatórias independentes $X_1, X_2, \dots, X_n$, componentes de uma certa amostra aleatória simples de tamanho n , foram extraídas de uma única população normal de variância σ^2 desconhecida (NAGHETTINI; PINTO, 2007; SPIEGEL, 1993). Nesta situação, pode-se testar σ^2 utilizando o teste Qui-quadrado χ^2 .

A determinação das hipóteses está relacionada com o tipo de teste: bilateral, unilateral à direita e unilateral à esquerda. Nas Equações 15, 16 e 17 estão as hipóteses nulas e alternativas para o teste χ^2 .

$$\text{Para teste bilateral: } \begin{cases} H_o: \sigma^2 = \sigma_0^2 \\ H_a: \sigma^2 \neq \sigma_0^2 \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{Para teste unilateral à direita: } \begin{cases} H_o: \sigma^2 \leq \sigma_0^2 \\ H_a: \sigma^2 > \sigma_0^2 \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{Para teste unilateral à esquerda: } \begin{cases} H_o: \sigma^2 \geq \sigma_0^2 \\ H_a: \sigma^2 < \sigma_0^2 \end{cases} \quad (17)$$

Sendo:

σ^2 = variância populacional;

σ_0^2 = variância populacional hipotética ao qual se deseja testar por meio do teste χ^2 .

A estatística χ^2 dada pela Equação 18 tem distribuição Qui-quadrado com $n - 1$ graus de liberdade.

$$\chi^2 = \frac{(n-1)s^2}{\sigma^2} \quad (18)$$

Sendo:

n = tamanho da amostra;

s^2 = variância amostral;

σ^2 = variância populacional.

Os valores críticos $\chi_{\text{crit E}}^2$ e $\chi_{\text{crit D}}^2$ podem ser determinados a partir da tabela da distribuição qui-quadrado do Anexo C com $n - 1$ graus de liberdade e o nível de significância α (ou $\alpha/2$ para testes bilaterais). Portanto, de modo geral, se $\chi^2 > \chi_{\text{crit D}}^2$ ou $\chi^2 < \chi_{\text{crit E}}^2$ rejeita-se H_o (Figura 17).

Figura 17 – Critérios de rejeição da Hipótese nula para o teste Qui-Quadrado

Fonte: Adaptado de Larson e Farber (2010)

3.3.2.2. Teste de hipótese para variância e desvio padrão de duas amostras

A premissa básica do teste de hipótese para variância de duas populações é de que as variáveis aleatórias e independentes $X_1, X_2, \dots, X_{n_1}$, referente a população 1, e $Y_1, Y_2, \dots, Y_{n_2}$, referente a população 2, componentes de duas amostras aleatórias simples de tamanhos n_1 e n_2 , foram extraídas de duas populações normais, de respectivas variâncias σ_1^2 e σ_2^2 desconhecidas (NAGHETTINI; PINTO, 2007; SPIEGEL, 1993). Em relação a determinação das hipóteses do teste, adota-se as hipóteses das Equações 19, 20 e 21, respectivamente para testes bilaterais, unilaterais à direita e unilaterais à esquerda.

$$\begin{cases} H_o: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \Leftrightarrow \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = 1 \\ H_a: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \Leftrightarrow \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \neq 1 \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} H_o: \sigma_1^2 \leq \sigma_2^2 \Leftrightarrow \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \leq 1 \\ H_a: \sigma_1^2 > \sigma_2^2 \Leftrightarrow \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} > 1 \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} H_o: \sigma_1^2 \geq \sigma_2^2 \Leftrightarrow \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \geq 1 \\ H_a: \sigma_1^2 < \sigma_2^2 \Leftrightarrow \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} < 1 \end{cases} \quad (21)$$

Sendo:

σ_1^2 e σ_2^2 = variâncias populacionais, respectivamente para as populações 1 e 2;

H_o = hipótese nula;

H_a = hipótese alternativa.

Neste caso, a expressão da estatística F dada pela Equação 22 tem distribuição de Fisher-Snedecor com $n_1 - 1$ graus de liberdade no numerador e $n_2 - 1$ graus de liberdade no denominador.

$$F = \frac{s_1^2 \sigma_2^2}{s_2^2 \sigma_1^2} \quad (22)$$

Sendo:

s_1^2 e s_2^2 = variâncias amostrais, respectivamente para as populações 1 e 2;

σ_1^2 e σ_2^2 = variâncias populacionais, respectivamente para as populações 1 e 2;

F = valor da estatística F de Fisher-Snedecor.

Na Figura 18 estão representadas as regiões críticas para um dado nível de significância para a distribuição F de Fisher-Snedecor (ANEXO D). Para testes bilaterais, os pontos críticos $F_{\alpha/2}$ e $F_{1-\alpha/2}$ para $n_1 - 1$ graus de liberdade no numerador e $n_2 - 1$ graus de liberdade no denominador são tais que $\mathbb{P}[F < F_{\alpha/2}] = \mathbb{P}[F > F_{1-\alpha/2}] = \alpha/2$. Assim, se $F > F_{1-\alpha/2}$ ou $F < F_{\alpha/2}$, deve-se rejeitar hipótese nula.

Figura 18 – Região crítica para um dado nível de significância α para a distribuição Fisher-Snedecor

Fonte: Adaptado de Portal Action (2018c)

Para testes unilaterais à direita, o ponto crítico $F_{1-\alpha}$ é tal que $\mathbb{P}[F > F_{1-\alpha}] = \alpha$. Assim, se, $F > F_{1-\alpha}$ deve-se rejeitar hipótese nula. Já para testes unilaterais à esquerda, o ponto crítico F_{α} é tal $\mathbb{P}[F > F_{\alpha}] = \alpha$. Para essa situação, caso a estatística F calculada for menor que valor crítico F_{α} , rejeita-se hipótese a nula.

3.3.2.3. Teste de hipótese paramétrico para médias – Teste t de Student

O nome Student vem do pseudônimo usado pelo estatístico inglês W. S. Gosset, que introduziu a distribuição T (MORETTIN; BUSSAB, 2010). Para o teste de hipótese paramétrico sobre a média de uma única população normal, considere variáveis aleatórias e independentes $X_1, X_2, \dots, X_n$, componentes de uma amostra aleatória simples de tamanho n extraída de uma população normal, de média μ e variância σ^2 desconhecidas. Neste caso, as hipóteses do teste são dadas pelas Equações 23, 24 e 25, respectivamente para testes bilaterais, unilaterais à direita e unilaterais à esquerda.

$$\begin{cases} H_0: \mu = \mu_0 \\ H_a: \mu \neq \mu_0 \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} H_o: \mu \leq \mu_0 \\ H_a: \mu > \mu_0 \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} H_o: \mu \geq \mu_0 \\ H_a: \mu < \mu_0 \end{cases} \quad (25)$$

Sendo:

μ = média populacional;

μ_0 = média populacional hipotética ao qual se deseja testar.

Para o teste T de uma única população normal, a expressão da estatística T é dada pela Equação 26, tendo distribuição T de Student com $n - 1$ graus de liberdade

$$T = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (26)$$

Sendo:

$\bar{X}$ = valor da média amostral;

μ_0 = valor da média populacional sob a hipótese nula (valor a ser testado);

s = valor do desvio padrão amostral;

n = tamanho da amostra.

Em relação ao teste de hipóteses paramétrico para comparação da média de duas populações normais, considere variáveis aleatórias e independentes $X_1, X_2, \dots, X_{n_1}$, referente a população 1, e $Y_1, Y_2, \dots, Y_{n_2}$, referente a população 2, componentes de duas amostras aleatórias simples de tamanhos n_1 e n_2 , de médias μ_1 e μ_2 desconhecidas. Segundo Naghettini e Pinto (2007) e Spiegel (1993), o conhecimento da variância populacional σ_1^2 e σ_2^2 determinará a estatística do teste a ser utilizada. Além disso, as hipóteses do teste são dadas pelas Equações 27, 28 e 29, respectivamente para testes bilaterais, unilaterais à direita e unilaterais à esquerda.

$$\begin{cases} H_o: \mu_1 = \mu_2 \\ H_a: \mu_1 \neq \mu_2 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} H_o: \mu_1 - \mu_2 = 0 \\ H_a: \mu_1 - \mu_2 \neq 0 \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} H_o: \mu_1 \leq \mu_2 \\ H_a: \mu_1 > \mu_2 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} H_o: \mu_1 - \mu_2 \leq 0 \\ H_a: \mu_1 - \mu_2 > 0 \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{cases} H_o: \mu_1 \geq \mu_2 \\ H_a: \mu_1 < \mu_2 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} H_o: \mu_1 - \mu_2 \geq 0 \\ H_a: \mu_1 - \mu_2 < 0 \end{cases} \quad (29)$$

Sendo:

μ_1 : média populacional para os dados da população 1;

μ_2 : média populacional para os dados da população 2.

Nesta situação, considerando que as variâncias das populações são iguais e desconhecidas, ou seja, $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$. A partir das propriedades da distribuição amostral da média e da distribuição amostral da variância, a expressão da estatística T dada pela Equação 30, tendo distribuição t de Student com $n_1 + n_2 - 2$ graus de liberdade.

$$T = \frac{(\bar{X} - \bar{Y}) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (30)$$

Em que:

$\bar{X}$ e $\bar{Y}$ = valor da média amostral respectivamente para a população 1 e 2;

$\mu_1 - \mu_2$ = diferença entre as médias populacionais sob a hipótese nula (igual a zero);

s_p = valor do desvio padrão agrupado dado pela Equação 31;

n_1 e n_2 = tamanho da amostra para a população 1 e 2.

$$s_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (31)$$

Sendo:

s_1^2 = variância amostral da população 1;

s_2^2 = variância amostral da população 2;

Entretanto, para situações do teste de verificação da igualdade das médias tendo variâncias desconhecidas e diferentes ($\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$), a estatística T é dada pela Equação 32 com distribuição T de Student e v graus de liberdade (Equação 33).

$$T = \frac{(\bar{X} - \bar{Y}) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (32)$$

$$v = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}} \quad (33)$$

Em que:

$\bar{X}$ e $\bar{Y}$ = valor da média amostral respectivamente para a população 1 e 2;

$\mu_1 - \mu_2$ = diferença entre as médias populacionais sob a hipótese nula (igual a zero);

s_1^2 e s_2^2 = variância amostral respectivamente da população 1 e 2;

n_1 e n_2 = tamanho da amostra para a população 1 e 2.

Todas as situações de teste T citadas anteriormente partem da premissa de que as populações são independentes. Entretanto há uma situação onde as populações são dependentes e é recomendado a aplicação do teste T pareado. Para esse caso, conforme Spiegel (1993), considerando duas amostras dependentes $X_1, X_2, \dots, X_n$, e $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$, pode-se considerar uma amostra única de pares $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$.

Definindo-se $D_i = X_i - Y_i$, para $i = 1, 2, \dots, n$, constrói-se uma amostra única $D_1, D_2, \dots, D_n$ com $D_i \sim N(\mu_D, \sigma_D^2)$. Para realizar o teste, as hipóteses são dadas pelas Equações 34, 35 e 36, respectivamente para testes bilaterais, unilaterais à direita e unilaterais à esquerda.

$$\begin{cases} H_0: \mu = \mu_D \\ H_a: \mu \neq \mu_D \end{cases} \quad (34)$$

$$\begin{cases} H_0: \mu \leq \mu_D \\ H_a: \mu > \mu_D \end{cases} \quad (35)$$

$$\begin{cases} H_0: \mu \geq \mu_D \\ H_a: \mu < \mu_D \end{cases} \quad (36)$$

A expressão da estatística T para o teste pareado é dada pela Equação 37, tendo distribuição T de Student com $n - 1$ graus de liberdade.

$$T = \frac{\bar{D} - \mu_D}{\frac{s_D}{\sqrt{n}}} \quad (37)$$

Sendo:

$\bar{D}$ = valor da média amostral das diferenças;

μ_D = valor da média populacional das diferenças sob a hipótese nula (geralmente igual a zero);

s_D = valor do desvio padrão amostral das diferenças (Equação 38);

n = tamanho da amostra.

$$s_D^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n-1} \quad (38)$$

Na Figura 19 estão representados os pontos críticos e regiões de rejeição para um dado nível de significância α e graus de liberdade calculado na distribuição T de Student. Tais valores podem ser obtidos por meio da tabela padrão no Anexo E. Para testes bilaterais, os pontos críticos $-t_{\alpha/2}$ e $t_{\alpha/2}$ são tais que $\mathbb{P}[T > t_{\alpha/2}] = \mathbb{P}[T < -t_{\alpha/2}] = \alpha/2$. Assim, se $T < -t_{\alpha/2}$ ou $T > t_{\alpha/2}$, rejeita-se hipótese nula H_0 . Em testes unilaterais à direita, o ponto crítico t_α é tal que $\mathbb{P}[T > t_\alpha] = \alpha$, logo, se $T > t_\alpha$, deve-se a hipótese nula H_0 . Por fim, para testes unilaterais à esquerda, o ponto crítico $-t_\alpha$ é tal que $\mathbb{P}[T < -t_\alpha] = \alpha$. Caso $T < -t_\alpha$, rejeita-se a hipótese nula H_0 .

Figura 19 – Pontos críticos e região crítica da distribuição t de Student

Fonte: Adaptado de Larson e Farber (2010)

3.3.2.4. Teste de hipótese não-paramétrico para medianas

Em meados do Século XX, os métodos livres de distribuição (não-paramétricos) aplicados a problemas com variáveis aleatórias foram impulsionados e ganharam importância a partir do artigo de Wilcoxon (1945) que apresentou um teste baseado no ranqueamento, isto é, método na qual *ranks* 1, 2, 3, ..., n são substituídos pelos dados numéricos reais.

Na ocasião, o autor testou a significância das diferenças das medianas de duas amostras extraídas de uma mesma população, criando o ‘Teste Wilcoxon para amostra única’ e o ‘Teste Wilcoxon pareado’. Em seguida, Mann e Whitney (1947) desenvolveram um procedimento mais adequado para o teste Wilcoxon, onde inclusive os autores consideraram a situação em que o tamanho das amostras a serem testadas eram diferentes, não considerado por Wilcoxon (1945). Assim, com essas melhorias foi criado o ‘Teste Wilcoxon-Mann-Whitney’, utilizado para comparações de medianas de duas populações distintas.

O Teste Wilcoxon para amostra única genericamente verifica se a localização da mediana populacional θ é igual ao valor da mediana θ_0 sob a hipótese nula. Considerando uma população com distribuição contínua e simétrica de uma variável aleatória $X_1, X_2, \dots, X_n$ com tamanho de amostra n , as hipóteses são dadas pelas Equações 39, 40 e 41, respectivamente para testes bilaterais, unilaterais à direita e unilaterais à esquerda (CONOVER, 1999).

$$\begin{cases} H_o: \theta = \theta_0 \\ H_a: \theta \neq \theta_0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} H_o: \theta - \theta_0 = 0 \\ H_a: \theta - \theta_0 \neq 0 \end{cases} \quad (39)$$

$$\begin{cases} H_o: \theta \leq \theta_0 \\ H_a: \theta > \theta_0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} H_o: \theta - \theta_0 \leq 0 \\ H_a: \theta - \theta_0 > 0 \end{cases} \quad (40)$$

$$\begin{cases} H_o: \theta \geq \theta_0 \\ H_a: \theta < \theta_0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} H_o: \theta - \theta_0 \geq 0 \\ H_a: \theta - \theta_0 < 0 \end{cases} \quad (41)$$

Sendo:

θ = mediana populacional;

θ_0 = valor de mediana populacional hipotética na qual se deseja testar.

Partindo dessa premissa, inicialmente se classifica o conjunto amostral em ordem crescente, obtendo um novo conjunto de dados $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ sendo $Z_i = X_i - \theta_0$, para $i=1, 2, \dots, n$. Em seguida, ordena-se o novo conjunto de dados, em módulo, $|Z_1|, \dots, |Z_n|$ associando a cada valor Z_i o *rank* R_i correspondente. Além disso, de acordo com Conover (1999), deve-se ignorar valores Z_i nulos, e para *ranks* com valores iguais, atribui-se a cada Z_i a média de tais valores. Então, a cada *rank* se associa uma variável indicadora ψ_i dada pela Equação 42. Assim, a estatística T^+ é calculada pela soma do produto dos *ranks* e a respectiva variável indicadora (Equação 43).

$$\psi_i = \begin{cases} 1, se Z_i > 0 \\ 0, se Z_i < 0 \end{cases} \quad (42)$$

$$T^+ = \sum_i^n R_i \psi_i \quad (43)$$

Em que:

Z_i = valor de um elemento ordenado do conjunto amostral para o teste Wilcoxon;

R_i = rank associado ao elemento Z_i ;

ψ_i = variável indicadora do teste Wilcoxon.

Em relação ao Teste Wilcoxon Pareado, semelhante ao teste T de Student pareado abordado no item 3.3.2.4, sejam duas populações $X_1, X_2, \dots, X_n$ e $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ dependentes e ambas de tamanho n . Como são observações pareadas $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$, define-se $D_i = X_i - Y_i$, obtendo-se um novo conjunto. Dessa forma, aplica-se o teste Wilcoxon para amostra única, citado anteriormente, da amostra $D_1, D_2, \dots, D_n$ na qual a mediana $\theta_0 = 0$.

As hipóteses para o teste Wilcoxon Pareado são dadas pelas Equações 44, 45 e 46, respectivamente para testes bilaterais, unilaterais à direita e unilaterais à esquerda.

$$\begin{cases} H_0: \theta = 0 \\ H_a: \theta \neq 0 \end{cases} \quad (44)$$

$$\begin{cases} H_0: \theta \leq 0 \\ H_a: \theta > 0 \end{cases} \quad (45)$$

$$\begin{cases} H_0: \theta \geq 0 \\ H_a: \theta < 0 \end{cases} \quad (46)$$

Sendo:

θ = mediana populacional;

Em um teste de Wilcoxon com o tamanho amostral $n \leq 50$ se utiliza a distribuição exata da estatística T^+ (ANEXO F). A partir desta distribuição, calculamos os valores críticos do teste para um dado nível de significância α . Para testes bilaterais, os pontos críticos t_{inf} e t_{sup} são tais que $\mathbb{P}[T^+ < t_{inf}] = \mathbb{P}[T^+ > t_{sup}] \approx \alpha/2$. Já para testes unilaterais à direita, o ponto crítico t é tal que $\mathbb{P}[T^+ > t] \approx \alpha$, e para testes unilaterais à esquerda, o ponto crítico t é tal que $\mathbb{P}[T^+ < t] \approx \alpha$. O cálculo destes valores críticos se dá por meio das Equações 47 e 48.

$$t_{inf} = t = \text{valor tabelado do ANEXO F} \quad (47)$$

$$t_{sup} = \frac{n(n+1)}{2} - t_{inf} \quad (48)$$

Sendo:

t_{inf} e t = valor crítico inferior da distribuição exata da estatística T^+ ;

t_{sup} = valor crítico superior da distribuição exata da estatística T^+ ;

n = tamanho da amostra.

Assim, em testes bilaterais, se $T^+ < t_{inf}$ ou $T^+ > t_{sup}$, rejeitar-se hipótese nula H_0 . Já para testes unilaterais à direita e à esquerda, rejeita-se H_0 caso $T^+ > t$ e $T^+ < t$, respectivamente. O p-

valor na distribuição exata do teste Wilcoxon é teorizado através das Equações 49, 50 e 51, respectivamente para testes bilaterais, unilaterais à direita e unilaterais à esquerda.

$$\text{p-valor} = \begin{cases} 2\mathbb{P}(t_{sup} > T^+ - 1) & \text{se } T^+ > \frac{n(n+1)}{4} \\ 2\mathbb{P}(t_{inf} \leq T^+) & \text{se } T^+ \leq \frac{n(n+1)}{4} \end{cases} \quad (49)$$

$$\text{p-valor} = \mathbb{P}(t > T^+ - 1) \quad (50)$$

$$\text{p-valor} = \mathbb{P}(t \leq T^+) \quad (51)$$

Sendo:

t_{inf} e t = valor crítico inferior da distribuição exata da estatística T^+ ;

t_{sup} = valor crítico superior da distribuição exata da estatística T^+ ;

T^+ = valor da distribuição exata de Wilcoxon.

Nas situações em que se tem amostras de tamanho $n > 50$, de acordo com Conover (1999), pode-se utilizar a aproximação da distribuição normal para o Teste Wilcoxon. Neste caso, supõe-se que os valores $X_1, X_2, \dots, X_n$ ou $D_1, D_2, \dots, D_n$ estão igualmente distribuídos em torno da mediana θ_0 sob hipótese nula. Além disso, o valor esperado de T^+ ($E_0(T^+)$) e a variância de T^+ ($Var_0(T^+)$) são dadas pelas Equações 52 e 53. Sabendo-se disso, calcula-se a estatística Z do teste Wilcoxon, nesta situação, por meio da Equação 54.

$$E(T^+ | \theta = \theta_0) = \frac{n(n+1)}{4} \quad (52)$$

$$Var(T^+ | \theta = \theta_0) = \frac{n(n+1)(2n+1)}{24} \quad (53)$$

$$Z = \frac{T^+ - E_0(T^+)}{\sqrt{Var_0(T^+)}} \quad (54)$$

Em que:

$E(T^+ | \theta = \theta_0)$ = média da distribuição exata T^+ sob a hipótese nula;

$Var(T^+ | \theta = \theta_0)$ = variância da distribuição exata T^+ sob a hipótese nula;

Z = estatística Z do teste Wilcoxon para $n > 50$;

Sendo $Z \sim N(0,1)$, pode-se determinar os valores críticos para o teste por meio da distribuição normal padrão tabelada no Anexo A para um dado nível de significância α . Assim, para testes bilaterais, unilaterais à direita e unilaterais à esquerda temos, respectivamente, os valores críticos $-Z_{\alpha/2} / Z_{\alpha/2}$ e $Z_{\alpha} / -Z_{\alpha}$.

Se $Z > Z_{\alpha/2}$ ou $Z < -Z_{\alpha/2}$ em testes bilaterais, ou se $Z > Z_{\alpha}$ em testes unilaterais à direita e $Z < -Z_{\alpha}$ para testes unilaterais à esquerda, tem-se evidências para rejeitar a hipótese nula H_0 , sendo o p-valor teorizado por meio das Equações 55, 56 e 57, respectivamente.

$$\text{p-valor} = \mathbb{P}[Z_{\alpha/2} > Z|H_0] + \mathbb{P}[-Z_{\alpha/2} < Z|H_0] = 2\mathbb{P}[Z > |Z_{\alpha/2}||H_0] \quad (55)$$

$$\text{p-valor} = \mathbb{P}[Z_{\alpha} > Z|H_0] \quad (56)$$

$$\text{p-valor} = \mathbb{P}[-Z_{\alpha} < Z|H_0] \quad (57)$$

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Caracterização da área de estudo

A área de estudo para coleta de dados primários necessários para os testes da ferramenta computacional foi o reservatório da Pequena Central Hidrelétrica de Mogi-Guaçu. Localizado na Bacia Hidrográfica do Mogi-Guaçu (22°22'45.6" S; 46°53'59,1" W), pertence a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 9 (UGRHI – 9) (Figura 20).

Figura 20 – Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo

Fonte: Santos et al. (2018)

O rio Mogi-Guaçu, principal corpo hídrico da UGRHI 9, possui 473 km de extensão. Nasce no município de Bom Repouso (Minas Gerais – MG), com altitude média de 1.700 metros e percorre 95,5 km até desembocar no Estado de São Paulo na região da Serra da Mantiqueira. Em terras paulistas tem 377,5 km de extensão, desaguando no rio Pardo, formando assim a Bacia Hidrográfica do Rio Mogi-Guaçu. A área de drenagem total desta bacia é de

A bacia hidrográfica do estudo apresenta dois tipos climáticos segundo a classificação de Köppen: Aw e Cwa. Mais especificamente em relação às cidades de Mogi-Guaçu e Mogi-Mirim, localização da PCH Mogi-Guaçu, o clima é Cwa onde a temperatura média do ar no mês mais quente é 22 °C com chuvas de verão e inverno brando, semelhante ao clima temperado quente. Em relação à pluviometria da região, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB (2014) registrou precipitações médias anuais na UGRHI 9 de aproximadamente 1.300 mm.ano⁻¹.

Os solos da bacia hidrográfica de Mogi-Guaçu são classificados de acordo com Rossi (2017) em Argiloso Vermelho-amarelo predominante no compartimento Baixo Mogi, Argissolo vermelho presente na sub-bacia do rio do Peixe, em Cambissolos húmicos existentes exclusivamente no compartimento Jaguari Mirim. Na maior parte da UGRHI 9 são encontrados Latossolo vermelho, Latossolo Vermelho-amarelo e Latossolo Amarelo presentes em todos os compartimentos da bacia (Figura 22).

Figura 22 – Mapa dos solos do estado de São Paulo destacando a UGRHI 9

Fonte: Adaptado de Rossi (2017)

Quanto ao uso e ocupação do solo, observa-se na Figura 23 que a agricultura é a principal atividade na UGRHI 9, sendo cana de açúcar, laranja, braquiária e milho as principais culturas. Além disso, o compartimento Peixe é o único cuja predominância é de pastagem.

Figura 23 – Mapa de uso do solo da Bacia Hidrográfica do rio Mogi-Guaçu

Fonte: CBH Mogi (2008)

As atividades industriais possuem uma forte articulação com as atividades agrícolas, destacando os seguintes ramos fabris: usinas de açúcar e álcool, papel e celulose, óleos vegetais, frigoríficos e bebidas (CBH MOGI, 2008). Ainda segundo o mesmo autor, as manchas de silvicultura estão associadas a indústrias de papel e celulose localizadas nos municípios de Mogi Guaçu e de Luiz Antônio (Tabela 7).

Tabela 7 – Distribuição dos usos do solo em porcentagem na UGRHI 9

Tipo de uso do solo	Distribuição dos usos do solo em porcentagem				
	Alto Mogi	Peixe	Jaguari Mirim	Médio Mogi	Baixo Mogi
Agrícola	62,78	14,44	51,82	63,90	86,02
Cobertura nativa	15,30	25,05	18,36	20,27	10,18
Silvicultura	5,39	1,12	3,04	9,23	0,45
Pastagem	10,93	53,27	22,36	3,98	0,49
Urbanizada	4,10	3,63	2,09	1,84	2,12
Outros	1,50	2,49	2,34	0,78	0,74

Fonte: Adaptado de CBH Mogi (2008)

Conhecendo-se a distribuição dos usos dos solos e a classificação pedológica da bacia hidrográfica do rio Mogi-Guaçu, CBH Mogi (2018) fornece um mapa de suscetibilidade à erosão (Figura 24). Dele se constata à margem esquerda do reservatório de Mogi-Guaçu baixa suscetibilidade a processos erosivos, enquanto na margem direita há alta suscetibilidade à erosão.

Figura 24 – Mapa de suscetibilidade à erosão da UGRHI 9

Fonte: CBH Mogi (2008)

Corroborando com o mapa de suscetibilidade, Miranda (2015) elucida que a agropecuária e a inexistência de mata ciliar no entorno do reservatório intensificam processos erosivos e a geração de sedimentos. Ele completa que ações relacionadas ao plantio de mata ciliar são importantes para redução dos processos erosivos e consequentes deposições no corpo hídrico (Figura 25). De acordo com CBH Mogi (2015), na região dos municípios de Mogi-Guaçu e Mogi-Mirim existem aproximadamente 314 pontos de erosão (urbana e rural), ilustrando a necessidade de ações protetivas e conservacionistas do solo.

Figura 25 – Uso e ocupação no entorno do reservatório de Mogi-Guaçu

Fonte: Miranda (2015)

A UGRHI 9 conta com 948 barramentos, equivalente a 10% do total de barragens existentes no Estado de São Paulo (CBH MOGI, 2018). Segundo Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2018) há na UGRHI 9 uma Central Geradora Hidrelétrica com potência instalada de 1.000 KW, e três Pequenas Centrais Hidrelétricas, duas localizadas em Espírito Santo do Pinhal, com 6.800 e 19.000 KW, e uma em Mogi-Guaçu com 7.200 KW.

A pequena central hidrelétrica de Mogi-Guaçu (SP) está localizada na sub-bacia do Alto Mogi, entre os municípios de Mogi-Guaçu e Mogi-Mirim. Com queda bruta de 11,6 m, o barramento que represa as águas do rio que dá nome às cidades e ao empreendimento (Rio Mogi-Guaçu) possui potência instalada de 7,2 MW (Figura 26). Inicialmente de propriedade da Companhia Energética de São Paulo (CESP), foi adquirida pela AES Tietê no fim da década de 90 durante a grande privatização do setor elétrico e permanece sob concessão dessa empresa (Quadro 9).

Quadro 9 – Característica técnicas da Pequena Central Hidrelétrica Mogi-Guaçu

Entrada em operação	1994	Potência instalada	7,2 MW
Localização	Rio Mogi-Guaçu	Número de turbinas	2
Área inundada	5,73 km ²	Tensão Nominal	13,8 kV
Volume	32,89 x 10 ⁶ m ³	Cota máxima útil	598,5 m
Comprimento de barragem	150 m	Cota mínima útil	596 m
Descarga total no Vertedouro	2.099 m ³ .s ⁻¹	Eclusa	Não possui

Fonte: Adaptado de AES Tietê (2018)

Figura 26 – Vista aérea da PCH Mogi-Guaçu

Fonte: AES Tietê (2018)

Segundo CBH Mogi (2008) as águas do reservatório da PCH Mogi-Guaçu se enquadram como classe 2, seu entorno é utilizado predominantemente para cultura de cana-de-açúcar com pequenas áreas de pastagem e de cultivo de café. Sua área de influência se encontra em zona caracterizada como de alta suscetibilidade à erosão, bem como grande parte da área de drenagem da bacia do reservatório.

Além da geração de energia elétrica, a barragem possui a finalidade de amortecimento de picos de cheia e abastecimento das cidades de Mogi-Mirim e Mogi-Guaçu. Ambos os municípios possuem em sua malha urbana áreas de alta suscetibilidade a enchente ao longo da calha do rio no trecho de jusante da barragem de Mogi-Guaçu (SANTOS, 2015).

4.2. Obtenção de dados primários

A coleta de dados foi realizada por meio do convênio estabelecido no âmbito do programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica sob código ANEEL P&D-0064-1028/2011. O levantamento de dados primários no reservatório de Mogi-Guaçu aconteceu em duas campanhas. A primeira campanha, representando o período chuvoso, foi realizada nos dias 25, 27, 28 e 29 de janeiro de 2014, e na segunda campanha, representando a estação seca, as coletas foram realizadas nos dias 18, 19 e 20 de março de 2014. Vale ressaltar que as campanhas dependiam de equipes técnicas e equipamentos do exterior, e estavam limitadas aos objetivos do projeto P&D, logo todo procedimento metodológico utilizado, pontos amostrados, e dados obtidos se resumem aos fornecidos pelo projeto e pela prestadora de serviço.

O reservatório foi estrategicamente dividido em 20 pontos de amostragem para possibilitar o entendimento do transporte de sedimento ao longo do mesmo, sendo que cada ponto foi localizado aproximadamente sobre o talvegue do canal principal de escoamento (Figura 27). Além disso, foram realizadas medições na seção transversal dos pontos 12, 14, 16 e 20 as quais o número de amostragens variou conforme tamanho da seção.

Figura 27 – Localização dos pontos de amostragem

Fonte: Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial – FIPAI (2015)

O cronograma de medições no reservatório de Mogi-Guaçu está apresentado no Quadro 10 detalhando os principais equipamentos utilizados e os respectivos pontos/seções amostrados.

É importante frisar que o primeiro dia de amostragem para ambas as campanhas serviram principalmente para planejamento, organização, montagem, configuração e calibração dos equipamentos (Figura 28).

Quadro 10 – Coletas de campo

	Equipamento	Data	Estações Amostradas
Período Chuvoso	Sonda LISST-100X e Sonda Multiparâmetro	25/01/2014	P1 a P12 e P14 a P20
		27/01/2014	P1, P6, P7 a P20
		29/01/2014	P1, P6, P8, P12, P16, P20
	ADCP	29/01/2014	P1, P6, P8, P12, P16, P20
	Garrafa <i>Van Dorn</i>	27/01/2014	P1, P6, P11, P14, P16, P20
		29/01/2014	P1, P6, P8, P12, P16, P20
Período Seco	Sonda LISST-100X e sonda Multiparâmetro	18/03/2014	P1, P3, P5 e P7 a P19
		20/03/2014	P1, P6, P8, P12, P14, P16, P19
	ADCP	20/03/2014	P1, P6, P8, P12, P14, P16, P19
	Garrafa <i>Van Dorn</i>	20/03/2014	P1, P6, P8, P12, P14, P16, P19

Fonte: Autor

Figura 28 - Preparação e montagem da LISST e da bateria na gaiola de proteção (Esquerda); Montagem e troca de baterias do ADCP (Direita)

Fonte: FIPAI (2015)

Visando à segurança nas medições, uma plataforma catamarã foi construída com a junção de dois barcos preservando um vão central de aproximadamente 2,5 m² para que os equipamentos fossem içados pelo centro, evitando problemas de instabilidade dos barcos (Figura 29). Além disso, a plataforma foi necessária para possibilitar a utilização de diversos equipamentos simultaneamente como o ADCP, LISST, sonda multiparâmetro, receptores *Global Positioning System* (GPS), entre outros.

Figura 29 – Plataforma catamarã construída visando a segurança das atividades de campo no reservatório de Mogi-Guaçu

Fonte: Autor

4.2.1. Obtenção das características hidráulicas do reservatório de Mogi-Guaçu

A localização precisa dos pontos de amostragem foi obtida por meio da associação de receptor GPS de alta precisão do modelo GS20 com antena AT 201 da *Leica Geosystems* instalado juntamente ao ADCP de 1.200 kHz. O ADCP foi instalado ao lado da embarcação com sensores direcionados para baixo, aproximadamente, à 40 cm de profundidade (Figura 30).

Utilizando como princípio o Efeito Doppler, as medidas realizadas com ADCPs permitem o cálculo da direção média do escoamento e desta maneira projetar as velocidades em um plano normal à essa direção. Essa projeção, por sua vez, permite também o cálculo da descarga líquida. Em resumo, os ADCPs fornecem dados hidráulicos de largura, profundidade, área total da seção, velocidade, descarga líquida, entre outras informações.

Na Figura 31 estão localizadas as seções transversais onde foi realizada a travessia com o ADCP coletando dados ao longo de toda a seção, respectivamente para a primeira campanha e segunda campanha.

Figura 30 – Esquema de montagem do ADCP junto da antena do GPS na parte interna do catamarã (Esquerda); e destaque para o ADCP sem estar submerso (Direita)

Fonte: FIPAI (2015)

Figura 31 – Seções transversais e locais de amostragem de perfis verticais.

Fonte: FIPAI (2015)

As medições foram feitas com 2 a 4 repetições na mesma seção para obtenção de um valor médio, lembrando que o ADCP não consegue medir toda a seção transversal. Há uma pequena faixa logo abaixo do aparelho e locais junto ao fundo da seção, onde há interferência da reflexão do sinal. No entanto, o próprio ADCP emprega algoritmos para estimar as vazões acima e abaixo da sua zona de medição, corrigindo tal limitação. Vale lembrar que na segunda campanha, por existirem macrófitas impedindo o acesso ao ponto 20, as medições foram realizadas no ponto 19 (Figura 32).

Figura 32 – Macrófitas junto à barragem durante o experimento de campo 2 (março de 2014).

Fonte: FIPAI (2015)

4.2.2. Amostragens de sedimentos em suspensão e turbidez

As amostragens de sedimentos em suspensão e turbidez foram realizadas utilizando dois tipos de equipamentos: amostradores a *laser* (sonda LISST-100X e sonda multiparâmetro YSI 6600) e um amostrador instantâneo horizontal (Garrafa *Van Dorn*).

A sonda LISST-100X realiza medidas de concentração de sedimentos em unidades volumétricas ($\mu\text{L.L}^{-1}$) e tamanho das partículas em (10^{-3} mm) agrupadas em 32 classes granulométricas. É um equipamento que está sendo empregado recentemente no País para a medição da concentração e granulometria de sedimentos em suspensão *in situ*, com maior velocidade e menor volume de amostras (SEQUOIA, 2013). Segundo MALVERN PANALYTICAL (2018), as principais vantagens desta técnica são a ampla faixa dinâmica, medições rápidas com respostas instantâneas, alta produtividade das amostras, além de estar coberta pela International Standardization Organization – ISO 13320 (ISO, 2009). Assim, as medições se tornam eficientes e seguras, reduzindo o tempo parado em cada vertical, e permitindo maior aquisição de dados.

Já a sonda multiparâmetro YSI 6600 é um equipamento automático capaz de medir *in situ* parâmetros de qualidade de água como oxigênio dissolvido, condutividade, temperatura, pH, profundidade e turbidez (YSI, 2012). Vale lembrar que para esse estudo foram utilizados apenas os dados de turbidez e temperatura.

A sonda LISST-100X foi instalada juntamente com uma sonda multiparâmetro do modelo YSI 6600 (Figura 33). Para facilitar a localização dos pontos sob o talvegue do canal principal de escoamento, o ADPC (1200 kHz) e o GPS também foram utilizados, permitindo

obtenção da profundidade em tempo real, identificando-se, assim, com precisão, a localização dos pontos a serem amostrados.

Figura 33 – Proteção da sonda multiparâmetro e LISST-100X para amostragem

Fonte: FIPAI (2015)

Ao mesmo tempo, utilizou-se a Garrafa *Van Dorn* conforme recomendações de Agriculture, Commerce, Defense, Interior Departments (1978). Trata-se de um amostrador instantâneo horizontal cilíndrico equipado com válvulas nas extremidades que podem ser fechadas subitamente para reter a amostra em qualquer profundidade (SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION, 1963) – Figura 34. Segundo Carvalho (2008), é um dos amostradores mais utilizados nos estudos limnológicos e de qualidade de água em lagos e reservatórios, pois permite a coleta de amostras pontuais de água e material em suspensão onde não há quase nenhuma velocidade de corrente.

Figura 34 – Amostrador de sedimentos em suspensão (Garrafa *Van Dorn*)

Fonte: Autor

O procedimento de coleta de dados consistiu em realizar medições simultâneas com o barco ancorado cada ponto do perfil longitudinal, do início do reservatório até a barragem, visando otimização do tempo. As sondas juntas eram baixadas por toda coluna d'água, metro a metro, para medições da concentração volumétrica de sedimentos em suspensão, turbidez e temperatura. Para cada ponto amostrado também foram realizadas medidas à aproximadamente 15cm de profundidade representando a superfície, e o mais próximo do fundo do reservatório cuidando para não houvesse ressuspensão de sedimento (Figura 35).

Figura 35 – Amostragens de sedimentos e turbidez: superfície (Esquerda); Equipamentos submersos (Direita)

Fonte: Autor

A LISST-100X foi configurada para amostrar concentração a cada 5 segundos durante o período de 1 minuto, dados esses que foram salvos no *toughbook* para posterior organização, tabulação e obtenção de valores médios (Figura 36).

Figura 36 – Destaque aos computadores (*toughbooks*) armazenando em tempo real os dados de concentração e turbidez medidos pelas sondas

Fonte: Autor

Isso permitiu que paralelamente fossem coletadas com a garrafa *Van Dorn* amostras de água-sedimento em galões de polietileno de cinco litros devidamente identificadas com o ponto, profundidade e data de amostragem que posteriormente foram encaminhadas ao laboratório. Tais amostras foram coletadas à aproximadamente 1 metro de profundidade, e próximo ao fundo (mínimo 0,5 m de distância do leito na medida anterior a medição do fundo). Destaca-se que as coletas foram feitas no mesmo tempo e profundidades que as sondas realizavam as leituras justamente para possibilitar a calibração e comparação com a LISST-100X e a sonda multiparâmetro.

4.2.3. Análises de Laboratório

As amostras coletadas foram encaminhadas para laboratório do Núcleo de Hidrometria (CRHEA/EESC/USP) e a determinação da concentração de sedimentos em suspensão foi feita pelo Método gravimétrico seguindo as normas e procedimentos propostos pela NBR 10.664/1989 da Associação Brasileira De Normas Técnicas – ABNT (1989) e “*Standard methods for examination of water and wastewater*” da American Public Health Association – APHA (1995) – Figura 37.

Inicialmente, realizou-se a limpeza e calcinação dos filtros de fibra de vidro (47 mm de diâmetro e 0,5 μ m de porosidade), processo na qual o filtro é deixado na Mufla por 1,5h à 450°C. Após os filtros esfriarem, eles foram pesados em balança analítica, anotando-se peso (P1) do filtro. Com o filtro devidamente pronto, um volume conhecido (V) para cada amostra foi filtrado com o uso de bomba à vácuo (Figura 38).

Figura 37 – Amostras encaminhadas ao Núcleo de Hidrometria (CRHEA/USP)

Figura 38 – Método de filtração destacando bomba à vácuo utilizado no processo

Fonte: Autor

O resíduo da filtração, retido no filtro, foi levado à estufa, onde permaneceu cerca de uma hora, em temperatura entre 100 e 105°C para não queimar certos minerais. Após esse período, os filtros com o sedimento foram deixados no dessecador para esfriarem e posteriormente foram pesados (P2). O procedimento de pesagem dos filtros secos + cadinho foi realizado 3 vezes para obter a estabilidade do peso, garantindo maior confiança nos resultados. Tal estabilidade acontece quando a diferença entre as pesagens é inferior a $\pm 0,0005\text{g}$.

Assim, por diferença obteve-se a massa de sedimento retida no filtro e se calculou a concentração de sedimentos em suspensão pelo método de filtração (CSS) (Equação 58).

$$CSS = \frac{P1-P2}{V} \quad (58)$$

Em que:

CSS = Concentração de sólidos em suspensão $[\text{g.L}^{-1}]$;

P1 = Massa do material filtrado mais o filtro $[\text{g}]$;

P2 = Massa do filtro $[\text{g}]$;

V = Volume filtrado da amostra $[\text{L}]$.

4.3. Metodologia aplicada no desenvolvimento da Ferramenta Computacional – NH *Sediment and Statistic*

A ferramenta computacional (NH *Sediment and Statistic*) foi desenvolvida em linguagem de programação *Visual Basic for Applications* (VBA). Trata-se de uma implementação da linguagem *Visual Basic* da Microsoft a todos os aplicativos do pacote Office (Word, Excel, Access, entre outros). Optou-se por esse tipo de linguagem pela riqueza e flexibilidade nas funcionalidades, e principalmente pela grande disponibilidade e facilidade de acesso, interface amigável e intuitiva para os usuários, incluindo interatividade com bancos de dados Access®.

Para distinguir os objetivos da ferramenta, foram desenvolvidos módulos distintos: o hidrossedimentológico e o estatístico. A modularização, além de fornecer ao usuário uma ferramenta bem objetiva e organizada por áreas distintas, torna os códigos do programa menores e de fácil correção e manutenção futura devido algum erro ou até mesmo economizando memória do computador.

O módulo hidrossedimentológico foi subdividido em dois módulos respectivamente para o cálculo da descarga sólida em suspensão e para a estimativa da descarga sólida total pelo método simplificado de Colby (1957). Já o módulo estatístico foi subdividido em outros cinco módulos: Teste Kolmogorov-Smirnov para normalidade, Teste paramétrico de variâncias, Teste paramétrico de médias, teste não-paramétrico de medianas e cálculo de parâmetros estatísticos.

A seguir serão abordadas as metodologias empregadas para a codificação de cada um dos métodos ou testes utilizados na ferramenta computacional.

4.3.1. Implementação do cálculo da descarga sólida em suspensão em VBA

O método utilizado na ferramenta computacional para cálculo da descarga sólida em suspensão está baseado no Método apresentado por Agriculture, Commerce, Defense And Interior Departments (1978). De acordo com Carvalho (2008), a descarga sólida em suspensão representa a maior quantidade da carga sólida do curso d'água, correspondendo entre 80 a 95% de toda a descarga sólida.

García (2008) complementa que o sedimento suspenso difere do sedimento de fundo na medida em que pode ser difundido através da coluna vertical do fluido. Enquanto o sedimento suspenso apresentar granulometria maior para não sofrer movimento browniano, os efeitos

moleculares podem ser negligenciados, sendo transportados unicamente por fluxos convectivos.

A equação que descreve a conservação em massa de sedimento de tamanho uniforme e densidade de material constante em um fluxo em um certo instante pode ser escrito simplificada por meio da Equação 59. Uma completa derivação da equação de conservação de massa para sedimento em suspensão pode ser encontrada em García (2001).

$$Q_{ss} = \int U.C.dA \quad (59)$$

Sendo:

Q_{ss} = descarga sólida em suspensão instantânea através da seção A [g.s^{-1}];

U = velocidade de partículas de sedimento através da área elementar dA [m.s^{-1}];

C = concentração de sedimentos em suspensão no volume elementar espacial [mg.L^{-1}].

dA = área elementar [m^2].

De acordo com Carvalho (2008) e Paiva, J. (2001), a descarga sólida em suspensão para amostragens com uma única análise a partir de amostra composta, mais comumente utilizada em estudos hidrossedimentológicos, pode ser simplificada conforme Equação 60.

$$Q_{ss} = 0,0864.Q.CSS \quad (60)$$

Em que:

Q_{ss} = descarga sólida em suspensão [t.dia^{-1}];

Q = descarga líquida [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$];

CSS = concentração de sedimentos em suspensão [mg.L^{-1}].

4.3.2. Implementação do cálculo de descarga sólida total em VBA

Dentre os métodos para cálculo e estimativa da descarga sólida total, optou-se pelo método simplificado de Colby (COLBY, 1957). Segundo Miranda (2015), esse método comparado ao método Einstein modificado por Colby e Hembree (1955) exige menos dados, sendo mais econômico e fácil, justamente pela redução dos trabalhos de campo e laboratório.

Colby (1957) apresentou relações da descarga sólida não medida com a velocidade média e a concentração, e verificou a possibilidade destas relações serem aplicadas com sucesso em vários tipos de cálculos de sedimentos. Sendo assim, a descarga sólida total é dada pela Equação 61.

$$Q_{st} = Q_{sm} + Q_{nm} \quad (61)$$

Sendo:

Q_{st} = descarga sólida total [t.dia⁻¹];

Q_{sm} = descarga sólida medida [t.dia⁻¹];

Q_{nm} = descarga sólida não-medida [t.dia⁻¹];

A descarga sólida medida (Q_{sm}) pode ser obtida por meio do cálculo da descarga sólida em suspensão (Equação 62). Já a descarga sólida não-medida (Q_{nm}), dada pela Equação 63, que representa integração da descarga sólida de arrasto com a descarga sólida não amostrada, é estimada com auxílio de ábacos conhecendo-se a velocidade média (m.s⁻¹), profundidade média (m), concentração medida (ppm) e da largura da seção (m) (CARVALHO, 2008).

$$Q_{sm} = 0,0864 \cdot Q \cdot CSS \quad (62)$$

$$Q_{nm} = q'_{nm} \cdot k \cdot L \quad (63)$$

Em que:

Q = descarga líquida [m³.s⁻¹];

CSS = concentração medida ou amostrada [mg.L⁻¹];

q'_{nm} = descarga sólida não medida por metro de largura do corpo hídrico [t.dia⁻¹.m⁻¹];

L = largura da seção amostrada [m];

k = fator de correção [adimensional];

Na Figura 39 está o Ábaco 1 do método simplificado de Colby (1957). Nele é possível obter a descarga sólida não medida por metro de largura do corpo hídrico a partir da velocidade média do fluxo.

Figura 39 – Ábaco 1: Obtenção da descarga sólida não medida por metro de largura do rio a partir da velocidade média

Fonte: Adaptado de Carvalho (2008) e Paiva, J. (2001)

Para obtenção de uma equação representativa para o Ábaco 1, utilizou-se o software *Engauge Digitizer* desenvolvido por Mitchell et al. (2018), que recupera pontos de dados de gráficos automaticamente, permitindo assim, a obtenção de uma equação que pudesse ser codificada em linguagem VBA. É interessante elucidar que não há trabalhos na área da hidrossedimentologia que utilizaram o software, entretanto é uma ferramenta utilizada nas diversas áreas do conhecimento como matemática e química (BENT-AL; SHAMAILOV; PATON, 2014; DOUZIECH et al., 2018; OCAYA, 2014). Na Figura 40 está o procedimento de obtenção da equação para o Ábaco 1, e que foi utilizada na programação da ferramenta,

sendo apresentada na Equação 64. Lembra-se que a validade das equações obtidas por este método foi testada com outros softwares.

Figura 40 – Obtenção de equação para o Ábaco 1 do Método simplificado de Colby (1957)

$$\log q'_{nm} = 3,340 \cdot \log V + 1,617 \quad (64)$$

Conhecendo-se a descarga sólida não medida por metro de largura (q'_{nm}), ainda é necessário a determinação do fator correção k , obtida a partir dos Ábacos 2 e 3. Na Figura 41 está apresentado o Ábaco 2 que permite a obtenção da concentração relativa (C_r) por meio da velocidade e profundidade média.

Neste caso, as equações utilizadas para codificação do Ábaco 2 foram listadas por Paiva (1988). De acordo com o autor, a concentração relativa é generalizada pela Equação 65.

$$\log C_r = A \cdot \log V + B \quad (65)$$

Sendo:

C_r = Concentração relativa [ppm = mg.L⁻¹];

A e B = Valores tabelados para obtenção de C_r dados pela Tabela 8.

Figura 41 – Ábaco 2: Obtenção da concentração relativa a partir da velocidade média e da profundidade média do curso d'água

Fonte: Adaptado de Carvalho (2008) e Paiva, J. (2001)

Tabela 8 – Valores estimados de A e B para o cálculo da concentração relativa em função da profundidade

Profundidade (p)	A	B
< 0,35	1,8066	3,2627
0,35 a 0,45	1,8365	3,1760
0,45 a 0,55	1,9111	3,1139

continua

continuação		
Profundidade (p)	A	B
0,55 a 0,65	1,9512	3,0881
0,65 a 0,75	1,9730	3,0512
0,75 a 0,85	1,9897	3,0212
0,85 a 0,95	1,8213	2,9289
0,95 a 1,10	2,0388	2,9692
1,10 a 1,30	1,9069	2,9002
1,30 a 1,50	2,1377	2,9031
1,50 a 1,70	2,1772	2,8642
1,70 a 1,90	2,1865	2,8243
1,90 a 2,50	2,2393	2,7782
2,50 a 3,50	2,2319	2,6990
3,50 a 4,50	2,4540	2,6236
4,50 a 5,50	2,5129	2,5446
5,50 a 6,50	2,5727	2,4914
6,50 a 7,50	2,6859	2,4651
7,50 a 8,50	2,6674	2,3979
8,50 a 9,50	2,7665	2,3696
9,50 a 11	2,8102	2,3224
11 a 13	2,9199	2,2304
13 a 15	3,0768	2,1303
15 a 17	3,1964	2,0414
17 a 19	3,3046	1,9590
19 a 21	3,4190	1,8554
21 a 23	3,5844	1,7661
23 a 25	3,5913	1,6532
25 a 27	3,5476	1,5341
27 a 29	3,9694	1,4639
29 a 31	4,1821	1,3441

Fonte: Paiva (1988, p.275)

Optou-se pela utilização desses valores ao invés do software anteriormente citado por apresentar mais faixas de profundidade que podem ser aplicadas na ferramenta computacional, aumentando a confiabilidade do método, e pela aplicação em trabalhos como Miranda et al. (2014) e Scapin (2005).

Após determinação da concentração relativa (C_r), a partir da Equação 66 foi possível determinar a razão de eficiência (Re) dada pela razão entre a concentração medida e a concentração relativa. Assim, por meio do Ábaco 3, pôde-se determinar o fator de correção k (Figura 42).

$$Re = CSS/C_r \quad (66)$$

Em que:

Re = razão da eficiência [adimensional];

CSS = concentração medida [mg.L^{-1}];

Cr = concentração relativa obtida por meio do Ábaco 2 [mg.L^{-1}].

Figura 42 – Ábaco 3: Obtenção do fator de correção em função da razão de eficiência

Fonte: Adaptado de Carvalho (2008) e Paiva, J. (2001)

Assim como nos ábacos anteriores, de acordo com Colby (1957), o ábaco 3 representa a ampla gama de seções transversais e concentrações medidas em diversos rios como o Mississippi, Colorado e Niobrara nos Estados Unidos. Portanto, a linha média representa localização da maioria dos 262 pontos plotados no estudo do autor, sendo assim, é a curva mais confiável para aplicação. Neste caso, utilizou-se o software *Engauge Digitizer* para determinação da equação da linha média presente no Ábaco 3 (Equação 67).

$$\log k = 0,4819 \cdot \log Re + 0,0739 \quad (67)$$

Em que:

k = fator de correção [adimensional];

Re = razão da eficiência [adimensional].

Conhecendo-se, então, o fator de correção (k) e a descarga sólida não medida unitária (q'_{nm}), pôde-se estimar a descarga sólida não medida (Q_{nm}) e posteriormente calcular a descarga sólida total (Q_{st}), em toneladas por dia.

4.3.3. Implementação do teste de normalidade

A metodologia utilizada para verificação da normalidade de um conjunto de dados amostrais foi o teste Kolmogorov-Smirnov proposto inicialmente por Kolmogorov (1933), considerando a função distribuição acumulada $F(x_i)$ apresentando distribuição normal com μ e σ^2 desconhecidos e estimados, respectivamente, por $\bar{x}$ e s^2 .

A codificação do procedimento de cálculo para a estatística D_n do teste Kolmogorov-Smirnov consistiu inicialmente na seleção do nível de significância α . Em seguida, os elementos da amostra foram classificados em ordem crescente $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$, onde $1 \leq i \leq n$ denotava ordem de classificação. Assim, para cada elemento x_i , calculou-se a distribuição empírica $F_N(x_i)$, dada pela Equação 68.

$$F_N(x_i) = i/n \quad (68)$$

Em que:

$F_N(x_i)$ = Função distribuição acumulada empírica dos dados;

i = índice que denota classificação do conjunto amostral;

n = tamanho amostral.

Além disso, calculou-se para cada elemento x_i a função distribuição acumulada $z_i = F(x_i)$. Estatisticamente z_i é a probabilidade cumulativa da distribuição normal padrão $z_i \sim N(0,1)$ para cada valor w_i obtido por meio da Equação 69. Assim, a partir do quadro da distribuição normal padrão do Anexo A, pôde-se obter z_i para seu respectivo w_i . Vale destacar que a codificação desse quadro foi realizada por meio de um comando do próprio Excel dado pela Equação 70.

$$w_i = (x_i - \bar{X})/s \quad (69)$$

$$F(x_i) = z_i = \text{WorksheetFunction.Norm_S_Inv}(w_i) \quad (70)$$

Sendo:

w_i = valor equivalente a x_i na distribuição normal padrão $N(0,1)$;

$\bar{x}$ = média amostral;

s = desvio padrão amostral;

$F(x_i)$ ou z_i = função distribuição acumulada.

Como esse teste tem como objetivo determinar máxima diferença absoluta entre a função de distribuição acumulada assumida para os dados, no caso a Normal, e a função de distribuição empírica dos dados, a estatística do teste é dada pela Equação 71. Entretanto, devido à descontinuidade de $F(x_i)$, a estatística D_n é calculada por meio das Equações 72, 73 e 74.

$$D_n = \max_x |F(x_i) - F_N(x_i)| \quad (71)$$

$$D^+ = \max_{x_{(i)}} |F(x_{(i)}) - F_N(x_{(i)})| \quad (72)$$

$$D^- = \max_{x_{(i)}} |F(x_{(i)}) - F_N(x_{(i-1)})| \quad (73)$$

$$D_n = \max(D^+, D^-) \quad (74)$$

Sendo:

$F_N(x_i)$ = Função distribuição acumulada empírica dos dados;

$F(x_i)$ = Função distribuição acumulada assumida para os dados;

$F_N(x_{i-1})$ = Elemento anterior da função distribuição acumulada empírica dos dados;

i = índice que denota classificação do conjunto amostral;

D = valor da estatística Kolmogorov-Smirnov sem correção;

D^+ e D^- = limites máximos à direita e esquerda da estatística Kolmogorov-Smirnov;

De acordo com Lilliefors (1967) o teste Kolmogorov-Smirnov proposto por Kolmogorov (1933) é válido e apresenta bons resultados quando se testa um conjunto de amostras de uma distribuição contínua especificada (Caso 1). Entretanto, segundo o mesmo autor, se um ou mais parâmetros devem ser estimado a partir da amostra, o quadro de valores críticos do teste Kolmogorov-Smirnov apresentado no Anexo B não é mais válido.

Devido a essa inconsistência, Lilliefors (1967) forneceu os valores críticos com base em simulação computacional apresentada na Tabela 9, valores estes que atendem aos critérios

aplicados na ferramenta computacional e que, portanto, foram utilizados na codificação do teste, já que para Stephens (1974), em testes de normalidade, situações com médias e variâncias desconhecidas são situações práticas mais comuns.

Tabela 9 – Valores críticos da estatística D_n apresentados por Lilliefors (1967) e utilizada na ferramenta computacional

Tamanho da amostra (n)	Nível de significância para $D_n = \max(D^+, D^-)$				
	0,20	0,15	0,10	0,05	0,01
4	0,300	0,319	0,352	0,381	0,417
5	0,285	0,299	0,315	0,337	0,405
6	0,265	0,277	0,294	0,319	0,364
7	0,247	0,258	0,276	0,300	0,348
8	0,233	0,244	0,261	0,285	0,331
9	0,223	0,233	0,249	0,271	0,311
10	0,215	0,224	0,239	0,258	0,294
11	0,206	0,217	0,230	0,249	0,284
12	0,199	0,212	0,223	0,242	0,275
13	0,190	0,202	0,214	0,234	0,268
14	0,183	0,194	0,207	0,227	0,261
15	0,177	0,187	0,201	0,220	0,257
16	0,173	0,182	0,195	0,213	0,250
17	0,169	0,177	0,189	0,206	0,245
18	0,166	0,173	0,184	0,200	0,239
19	0,163	0,169	0,179	0,195	0,235
20	0,160	0,166	0,174	0,190	0,231
25	0,149	0,153	0,165	0,180	0,203
30	0,131	0,136	0,144	0,161	0,187
Acima de 30	$0,736/\sqrt{n}$	$0,768/\sqrt{n}$	$0,805/\sqrt{n}$	$0,886/\sqrt{n}$	$1,031/\sqrt{n}$

Fonte: Adaptado de Lilliefors (1967)

Assim, utilizando-se o quadro de valores críticos para o teste de normalidade (D_{crit}) proposto por Lilliefors (1967) para um dado nível de significância α e comparando ao valor da estatística Kolmogorov-Smirnov (D_n), definiu-se os critérios de conclusão do teste conforme Equação 75.

$$Se \begin{cases} D_n \leq D_{crit} \Rightarrow H_0: F(x) = F_N(x) \Rightarrow \text{Dados normais} \\ D_n > D_{crit} \Rightarrow H_a: F(x) \neq F_N(x) \Rightarrow \text{Dados não-normais} \end{cases} \quad (75)$$

Sendo:

D_n = estatística do teste Kolmogorov-Smirnov;

D_{crit} = valor crítico para o teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov em função do tamanho da amostra e nível de significância;

$F_N(x_i)$ = Função distribuição acumulada empírica dos dados;

$F(x_i)$ = Função distribuição acumulada assumida para os dados;

Além disso, codificou-se na ferramenta computacional o cálculo do p-valor para o teste de normalidade por aproximação. De acordo com Dallal e Wilkinson (1986), a probabilidade da distribuição D_n para $D_n < 0,1$ e $5 \leq n \leq 100$ é estimada pela aproximação analítica das Equações 76 e 77.

$$pvalor = 1 - p \quad (76)$$

$$\log p = [a \cdot D_n^2 \cdot (n + 2,78019) + b \cdot D_n \cdot (n + 2,78019)^{1/2} + c + d/\sqrt{n} + e/n] \quad (77)$$

Sendo:

p = probabilidade da distribuição da estatística D_n ;

$a = -7,01256$;

$b = 2,99587$;

$c = -0,122119$;

$d = 0,974598$;

$e = 1,67997$;

n = tamanho amostral;

D_n = estatística Kolmogorov-Smirnov;

Entretanto, para situações em que a estatística $D_n \geq 0,1$, inicialmente deve-se calcular a estatística D_n modificada (D^*) apresentada por Lilliefors (1967) e confirmada por Stephens (1974), dada pela Equação 78. Yazici e Yolacan (2007) realizaram um estudo em que compararam doze tipos diferentes de teste de normalidade incluindo o teste KS original e modificado. Os autores concluíram que para distribuições simétricas com pequenas amostras, é recomendável a utilização de ambos os testes KS. Entretanto, em termos de valores críticos, os testes modificados de normalidade podem ser preferíveis aos outros, pois os valores críticos para esses são fixos e apresentam maior simplicidade em termos de cálculos, justificando a aplicação da estatística D^* .

$$D^* = D_n \cdot (\sqrt{n} - 0,01 + 0,85/\sqrt{n}) \quad (78)$$

Sendo:

D_n = estatística Kolmogorov-Smirnov;

D^* = estatística D_n modificada por Lilliefors (1967);

n = tamanho amostral.

Nesta situação, o cálculo do p-valor é diferenciado. Inicialmente foi utilizada a Equação 79 indicada por Dagnelie (1968²⁰) *apud* Molin e Abdi (1998) para fazer aproximações numéricas para os valores críticos propostos por Lilliefors (1967) em função do nível de significância e tamanho da amostra.

$$C(n, \alpha)^{-2} = A(\alpha)n + B(\alpha) \quad (79)$$

Em que:

n = tamanho da amostra;

α = significância;

$C(n, \alpha)$ = Valor crítico obtido por aproximação;

$A(\alpha)$ e $B(\alpha)$ = Coeficientes linear e angular.

Para determinar os coeficientes linear e angular da equação anterior, Molin e Abdi (1998) realizaram regressão múltipla polinomial por etapas que foi usada para derivar uma aproximação para $A(\alpha)$ e $B(\alpha)$, apresentadas, respectivamente na Equações 80 e 81²¹. Os mesmos autores ainda concluem que um polinômio de grau 6 forneceu melhor ajuste ao usar o máximo erro absoluto como critério.

$$A(\alpha) = 6,322 - 17,139(1 - \alpha) + 38,428(1 - \alpha)^2 - 45,932(1 - \alpha)^3 + 7,887(1 - \alpha)^4 + 29,793(1 - \alpha)^5 - 18,481(1 - \alpha)^6 \quad (80)$$

$$B(\alpha) = 12,940 - 53,458(1 - \alpha) + 186,924(1 - \alpha)^2 - 410,582(1 - \alpha)^3 + 517,338(1 - \alpha)^4 - 343,581(1 - \alpha)^5 + 98,123(1 - \alpha)^6 \quad (81)$$

²⁰Dagnelie, P. A propôs de l'emploi du test de Kolmogorov-Smirnov comme test de normalité. **Biom. Praxim.**, v.9, n.1, 1968, p. 3-13.

²¹Coeficientes das Equações 81 e 82 estão arredondados nesta Tese. Destaca-se aqui que as Equações foram implementadas na Ferramenta Computacional com todas as casas decimais apresentadas por Molin e Abdi (1998).

Com base nessas equações, estimaram-se todos os valores críticos da estatística D^* associados aos respectivos p-valores. Assim, nas Figuras 43 e 44 estão as regressões obtidas dessas relações, respectivamente para situações em que $0,1 \geq p\text{-valor} \geq 0,8$ ($1,035 \leq D^* \leq 0,470$) e em situações na qual $p\text{-valor} \leq 0,1$ ($D^* \geq 1,035$).

Figura 43 – Relação para estimativa do p-valor para situações com D^* entre 0,47 e 1,035

Fonte: Autor

Figura 44 – Relação para estimativa do p-valor para situações com D^* superior a 1,035

Fonte: Autor

Assim, na Equação 82 estão os critérios implementados na ferramenta computacional para a determinação do p-valor quando a estatística $D_n \geq 0,1$.

$$\begin{cases} pvalor = -3,1909D_n^3 + 10,874D_n^2 - 12,361D_n + 4,6913, \text{ para } 0,47 \leq D^* \leq 1,035 \\ pvalor = 379523 \cdot EXP(-17,82 \cdot D_n), \text{ para } D^* > 1,035 \end{cases} \quad (82)$$

4.3.4. Implementação dos testes F de Fisher-Snedecor e T de Student pareado

A implementação dos testes paramétricos F de Fisher-Snedecor e T de Student em linguagem de programação se deu com auxílio de objetos e comandos disponibilizados pelo próprio *Excel*. São testes bem conhecidos mundialmente que lidam com a comparação de variâncias e médias, sendo facilmente codificados por apresentarem distribuição bem definida conforme apresentado nas seções 3.3.2.2 e 3.3.2.3 desta tese, diferente do teste Kolmogorov-Smirnov que ainda depende de métodos de estimativa.

Desse modo, para o teste F, utilizou-se os comandos das Equações 83 e 84 na ferramenta computacional para calcular os valores críticos da distribuição F em testes bilaterais. Além disso, a estatística F com $n_1 - 1$ graus de liberdade no numerador e $n_2 - 1$ graus de liberdade no denominador foi calculada pela Equação 85.

$$F_{critE} = WorksheetFunction.F_Inv(\alpha/2, GL1, GL2) \quad (83)$$

$$F_{critD} = WorksheetFunction.F_Inv_RT(\alpha/2, GL1, GL2) \quad (84)$$

$$F = \frac{s_1^2 \sigma_2^2}{s_2^2 \sigma_1^2} \quad (85)$$

Sendo:

GL1 = graus de liberdade para a amostra da população 1;

GL2 = graus de liberdade para a amostra da população 2;

s_1^2 e s_2^2 = variâncias amostrais, respectivamente para as populações 1 e 2;

σ_1^2 e σ_2^2 = variâncias populacionais, respectivamente para as populações 1 e 2;

Comparando-se, então, os valores críticos da distribuição F para um dado α , GL1 e GL2 com o valor da estatística F, definiram-se os critérios de conclusão do teste conforme Equação 86.

$$\text{Se } \begin{cases} F \leq F_{crit E} \Rightarrow H_0: \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = 1 \text{ é verdadeira} \\ F > F_{crit D} \Rightarrow H_a: \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \neq 1 \text{ é verdadeira} \end{cases} \quad (86)$$

Em que:

F = valor da estatística F de Fisher-Snedecor;

F_{critD} : valor crítico à direita da distribuição F de Fisher-Snedecor;

F_{critE} : valor crítico à esquerda da distribuição F de Fisher-Snedecor.

Para obtenção do p -valor do teste F foi necessário previamente calcular a probabilidade da cauda direita da distribuição F (Equação 87) seguida da probabilidade acumulada da cauda esquerda da dist. F (Equação 88). Assim, por meio da Equação 89 foi possível calcular o p -valor para testes bilaterais.

$$pvalor1 = WorksheetFunction.F_Dist_RT(F, GL1, GL2) \quad (87)$$

$$pvalor2 = WorksheetFunction.F_Dist(F, GL1, GL2, True) \quad (88)$$

$$pvalor = 2 \cdot \text{Mínimo}(pvalor1, pvalor2) \quad (89)$$

A implementação do teste T de Student pareado na ferramenta computacional contou com a codificação do cálculo da estatística T dada pela Equação 90, tendo distribuição T de Student com $n - 1$ graus de liberdade. Além disso, os valores críticos para o teste T foram calculados por meio dos algoritmos presentes nas Equações 91 e 92.

$$T = \frac{\bar{D} - \mu_D}{\frac{s_D}{\sqrt{n}}} \quad (90)$$

$$t_{crit} = WorksheetFunction.T_Inv_2T(\alpha, GL1) \quad (91)$$

$$-t_{crit} = -WorksheetFunction.T_Inv_2T(\alpha, GL1) \quad (92)$$

Sendo:

$\bar{D}$ = valor da média amostral das diferenças;

μ_D = valor da média populacional das diferenças sob a hipótese nula;

s_D = valor do desvio padrão amostral das diferenças;

n = tamanho da amostra;

t_{crit} e $-t_{crit}$ = valores críticos da estatística T respectivamente para as caudas direita e esquerda.

Por fim, utilizou-se a Equação 93 para calcular o p -valor, função essa que retorna o p -valor da distribuição T de Student em função da probabilidade e dos graus de liberdade. Assim,

comparando-se, os valores críticos da distribuição T para um dado α e GL1, com o valor da estatística T, definiu-se os critérios de conclusão do teste conforme Equação 94.

$$pvalor = WorksheetFunction.T_Inv_2T(abs(T), GL1) \quad (93)$$

$$\text{Se } \begin{cases} T \leq t_{crit} \text{ ou } T \geq -t_{crit}, H_0 \mu_D = 0 \text{ é verdadeira} \\ T > t_{crit} \text{ ou } T < -t_{crit}, H_a \mu_D \neq 0 \text{ é verdadeira} \end{cases} \quad (94)$$

Em que:

GL1: graus de liberdade da amostra 1;

T: valor da estatística T de *Student* para o teste de hipótese para médias;

t_α (t_{crit}) e $-t_\alpha$ ($-t_{crit}$): valores críticos da distribuição T de Student;

μ_D = valor da média populacional das diferenças sob a hipótese nula.

4.3.5. Implementação do teste não-paramétrico Wilcoxon

Como dito anteriormente, os testes não-paramétricos, em sua maioria, estão relacionados com a classificação e ranqueamento de um conjunto de dados. Sendo assim, a estatística T^+ de Wilcoxon foi calculada pela soma do produto dos *ranks* e a respectiva variável indicadora (Equação 95). Destaca-se novamente a abordagem aqui dos testes bilaterais, sendo outros tipos de testes descritos anteriormente com maior detalhamento no item 3.3.2.4.

$$T^+ = \sum_i^n R_i \psi_i \quad (95)$$

Sendo:

R_i = *rank* pra o elemento ordenado Z_i ;

ψ_i = variável indicadora dada pela Equação (Equação 96)

$$\psi_i = \begin{cases} 1, se Z_i > 0 \\ 0, se Z_i < 0 \end{cases} \quad (96)$$

Em que:

Z_i = conjunto de dados associados a um *rank*.

A codificação do teste Wilcoxon se deu em duas etapas: a primeira considerando tamanho amostral $n \leq 50$ e a segunda para tamanho amostras $n > 50$. Em relação à primeira

etapa, se utilizou o quadro da distribuição exata da estatística T^+ apresentada no Anexo F. Neste caso, a determinação do valor crítico inferior se deu exclusivamente por meio da Equação 97.

$$t_{inf} = \text{valor tabelado do ANEXO F} \quad (97)$$

Nas situações em que se tem amostras de tamanho $n > 50$, utilizou-se a aproximação normal para o Teste Wilcoxon. Com isso, a partir de um valor médio esperado de T^+ ($E_0(T^+)$) e a variância de T^+ ($Var_0(T^+)$) calculadas pelas Equações 98 e 99, pôde-se determinar a estatística Z do teste Wilcoxon, nesta situação, por meio da Equação 100. Em seguida, estimou-se o valor crítico inferior por meio da Equação 101.

$$E(T^+|\theta = \theta_0) = \frac{n(n+1)}{4} \quad (98)$$

$$Var(T^+|\theta = \theta_0) = \frac{n(n+1)(2n+1)}{24} \quad (99)$$

$$Z = \frac{T^+ - E_0(T^+)}{\sqrt{Var_0(T^+)}} \quad (100)$$

$$t_{inf} = E(T^+) + WorksheetFunction.Norm S Inv(\alpha) \cdot \sqrt{Var(T^+)} \quad (101)$$

Em que:

$E(T^+|\theta = \theta_0)$ ou $E(T^+)$ = média da distribuição exata T^+ sob a hipótese nula;

$Var(T^+|\theta = \theta_0)$ ou $Var(T^+)$ = variância da distribuição exata T^+ sob a hipótese nula;

T^+ = valor da estatística do teste Wilcoxon;

Z = valor da estatística Z do teste Wilcoxon para $n > 50$;

t_{inf} = valor crítico inferior da distribuição exata da estatística T^+ ;

n = tamanho da amostra;

α = nível de significância de um teste estatístico.

Para ambas as situações ($n \leq 50$ ou $n > 50$), o valor crítico superior pode ser calculado por meio da Equação 102. Comparando-se, os valores críticos estimados para um dado α e tamanho de amostra, com o valor da estatística T^+ , definiu-se os critérios de conclusão do teste conforme Equação 103.

$$t_{sup} = \frac{n(n+1)}{2} - t_{inf} \quad (102)$$

$$\text{Se } \begin{cases} t_{inf} \leq T^+ \leq t_{sup}, \text{ Hipótese nula é verdadeira} \\ T^+ < t_{inf} \text{ ou } T^+ > t_{sup}, \text{ Hipótese alternativa é verdadeira} \end{cases} \quad (103)$$

Assim como na determinação dos valores críticos, a estimativa do p-valor também dependeu do tamanho da amostra. Para $n \leq 50$, a estimativa do p-valor se deu por meio das Equações 104 a 106 apresentadas por Conover (1999) seguido do código computacional da Equação 107.

$$Z_{lower} = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i + 1)}{\sqrt{n(n+1)(2n+1)/6}} \quad (104)$$

$$Z_{upper} = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - 1)}{\sqrt{n(n+1)(2n+1)/6}} \quad (105)$$

$$Z = \text{Mínimo}(Z_{lower}; Z_{upper}) \quad (106)$$

$$\text{pvalor} = \begin{cases} 2 \cdot \text{WorksheetFunction.NormSDist}(Z, \text{True}), \text{ se } Z_{lower} < Z_{upper} \\ 2 \cdot (1 - \text{WorksheetFunction.NormSDist}(Z, \text{True})), \text{ se } Z_{lower} > Z_{upper} \end{cases} \quad (107)$$

Sendo:

n = Tamanho da amostra;

R_i = Rank para determinado dado i de uma amostra;

Z = Valor da Distribuição normal padrão estimada do teste Wilcoxon;

Z_{upper} e Z_{lower} = valores intermediários de Z para cálculo do p-valor.

Entretanto, durante testes preliminares de verificação da acurácia do método, verificou-se um erro significativo principalmente para tamanhos amostrais inferiores. Por se tratar de um teste de ranqueamento, poucos estudos apresentaram equações de estimativa do p-valor para tamanhos amostrais pequenos. Yeo (2017) propôs um algoritmo em linguagem de programação R, mas a conversão para a linguagem VBA foi custosa e inviável, optando-se pela utilização de regressões para cada tamanho amostral (n) entre 4 e 10 da distribuição exata da estatística T^+ apresentada no Anexo F.

Apresenta-se, então, na Figura 45 o gráfico de contendo as regressões lineares utilizadas para estimar o p-valor respectivamente para o tamanho amostral de 7 elementos. As demais equações obtidas nas regressões utilizadas para determinação das probabilidades relacionadas à estatística T^+ para $4 \leq n \leq 10$ podem ser verificados na própria linguagem computacional do teste Wilcoxon no Anexo L. Vale destacar que foi necessária a divisão dos dados em valores

intermediários e extremos, o que em alguns casos gerou três equações para o mesmo tamanho amostral.

Figura 45 – Regressões da distribuição exata de Wilcoxon para tamanho amostral $n=7$

Já para $n > 50$, a estimativa do p-valor para testes bilaterais se deu por meio da Equação 108 conforme MINITAB INC. (2018a) seguido do código computacional apresentado na Equação 109.

$$Z = \begin{cases} \frac{T^+ - 0,5 - E(T^+)}{\sqrt{\text{Var}(T^+)}} , \text{ caso } \left(T^+ - \frac{n(n+1)}{4}\right) \geq 0 \\ \frac{T^+ + 0,5 - E(T^+)}{\sqrt{\text{Var}(T^+)}} , \text{ caso } \left(T^+ - \frac{n(n+1)}{4}\right) < 0 \end{cases} \quad (108)$$

$$\text{pvalor} = \begin{cases} 2 \cdot [1 - \text{WorksheetFunction.NormSDist}(Z, \text{True})] , \text{ se } \left(T^+ - \frac{n(n+1)}{4}\right) \geq 0 \\ 2 \cdot [\text{WorksheetFunction.NormSDist}(Z, \text{True})] , \text{ se } \left(T^+ - \frac{n(n+1)}{4}\right) < 0 \end{cases} \quad (109)$$

Sendo:

$E(T^+|\theta = \theta_0)$ ou $E(T^+)$ = média da distribuição exata T^+ sob a hipótese nula;

$\text{Var}(T^+|\theta = \theta_0)$ ou $\text{Var}(T^+)$ = variância da distribuição exata T^+ sob a hipótese nula;

T^+ = valor da estatística do teste Wilcoxon;

Z = valor da estatística Z do teste Wilcoxon para $n > 50$;

t_{inf} = valor crítico inferior da distribuição exata da estatística T^+ ;

n = tamanho da amostra;

α = nível de significância de um teste estatístico.

4.3.6. Implementação dos parâmetros estatísticos

Implementou-se parâmetros estatísticos que são utilizados para avaliação da eficiência de modelos e comparação de dados. Dentre os mais utilizados, estão os parâmetros estatísticos sugeridos por Lengnick e Fox (1994), Loague e Green (1991), Santos et al. (2012), Sentelhas et al. (1997) e Zacharias, Heatwole e Coakley (1996) tais como Coeficiente de ajuste (CA) (Equação 110), Eficiência (EF) (Equação 111), Coeficiente de massa residual (CMR) (Equação 112), Desvio do quadrado médio da raiz (RMSD) (Equação 113), erro máximo (ME) (Equação 114) e diferença média (MD) (Equação 115).

$$CA = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad (110)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (111)$$

$$CRM = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i) - \sum_{i=1}^n (P_i)]}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \quad (112)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (113)$$

$$ME = \max |O_i - P_i| \quad (114)$$

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{n} \quad (115)$$

Em que:

i = índice de O;

O_i = valor observado;

P_i = valor estimado;

$\bar{O}$ = média dos valores observados;

n = espaço amostral.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os dados que foram utilizados nos testes da ferramenta computacional, assim como na sua calibração estão apresentados nesse item. Nas Figuras 46 a 50 estão alguns dos perfis de vazão e velocidade obtidos nas medições das características hidráulicas das seções do reservatório de Mogi-Guaçu.

Figura 46 – Vazão e velocidade estimadas: Medição 2 da Seção 1 na primeira campanha (Esquerda); Medição 1 da Seção 1 na segunda campanha (Direita)

Fonte: Adaptado de FIPAI (2015)

Figura 47 – Vazão e velocidade estimadas: Medição 1 da Seção 8 na primeira campanha (Esquerda); Medição 3 da Seção 8 na segunda campanha (Direita)

Fonte: Adaptado de FIPAI (2015)

Figura 48 – Vazão e velocidade estimadas: Medição 4 da Seção 12 na primeira campanha (Esquerda); Medição 3 da Seção 12 na segunda campanha (Direita)

Fonte: Adaptado de FIPAI (2015)

Figura 49 – Vazão e velocidade estimadas: Medição 1 da Seção 16 na primeira campanha (Esquerda); Medição 3 da Seção 16 na segunda campanha (Direita)

Fonte: Adaptado de FIPAI (2015)

Figura 50 – Vazão e velocidade estimadas: Medição 3 da Seção 20 na primeira campanha (Esquerda); Medição 1 da Seção 19 na segunda campanha (Direita)

Fonte: Adaptado de FIPAI (2015)

Analisando os perfis de velocidades fica nítida a diminuição da intensidade do escoamento nas seções mais largas em ambas as campanhas. Enquanto nas seções 1, 8 e 12 se verificam velocidades nas células, em sua maioria, entre 0,05 e 0,20 m.s⁻¹, nas seções 16, 19 e 20 as velocidades das células estavam entre -0,1 e 0,1 m.s⁻¹. Vale lembrar que valores negativos de velocidade indicam que o fluxo está no sentido contrário, presente em áreas alagadas fruto de turbulências naturais dos corpos hídricos.

Os resultados das características hidráulicas estão apresentados nos Quadros 11 e 12 respectivamente para a primeira e segunda campanha. Cabe ressaltar que as medições do dia 27/01/2014 serviram para testar as configurações do ADCP e inferir o tempo para as medições, sendo assim, não foram consideradas.

Quadro 11 – Medições das características hidráulicas das seções do reservatório de Mogi-Guaçu na primeira campanha

Seção	Medição	Hora de Início	Nº de verticais	Velocidade média (m.s ⁻¹)	Largura (m)	Área total (m ²)	Descarga líquida média (m ³ .s ⁻¹)
1	S1-1	16:39:21	424	0,064	61,29	395,34	24,22
	S1-2	16:42:35	345	0,060	58,57	371,30	21,83
	S1-3	16:45:05	345	0,058	60,10	379,60	21,65
	S1-4	16:47:35	361	0,064	57,74	357,85	22,31
6	S6-1	17:12:12	229	0,086	48,02	283,67	22,64
	S6-2	17:14:09	303	0,081	49,40	306,76	22,95
	S6-3	17:16:28	235	0,086	50,41	307,62	24,93
	S6-4	17:19:05	229	0,076	51,27	320,29	22,50
8	S8-1	15:43:26	380	0,066	58,53	393,61	21,77
	S8-2	15:46:00	246	0,057	57,04	381,35	22,03
	S8-3	15:48:48	268	0,062	56,81	381,25	22,89
	S8-4	15:50:54	346	0,059	58,91	392,71	22,83
12	S12-1	14:58:09	650	0,045	117,56	731,62	27,61
	S12-2	15:02:26	725	0,040	120,81	740,76	22,76
	S12-3	15:22:16	687	0,042	118,59	732,63	24,80
	S12-4	15:27:38	760	0,038	128,80	763,30	20,76
16	S16-1	10:47:56	2346	0,013	633,36	2788,29	2,76*
	S16-2	11:07:27	2745	0,011	666,95	1843,61	7,49*
	S16-3	11:28:05	2587	0,020	669,74	1875,48	13,82*
	S16-4	12:03:20	2673	0,013	667,56	1830,79	21,77
20	S20-1	09:57:49	755	0,033	160,11	857,54	27,39
	S20-2	10:13:22	648	0,038	158,68	856,15	24,87
	S20-3	10:18:49	614	0,026	152,33	852,15	22,06
	S20-4	10:24:25	762	0,037	154,81	880,17	22,62

* Informações ignoradas nos cálculos devido à anomalia dos dados

Fonte: FIPAI (2015)

Quadro 12 – Medições das características hidráulicas das seções do reservatório de Mogi-Guaçu na segunda campanha

Seções	Medição	Hora de Início	Nº de verticais	Velocidade média (m.s ⁻¹)	Largura (m)	Área total (m ²)	Descarga líquida média (m ³ .s ⁻¹)
1	S1-1	15:50:47	144	0,051	51,31	387,07	21,09
	S1-2	15:52:35	192	0,050	54,80	408,98	16,80
	S1-3	15:55:01	186	0,051	56,83	418,43	20,45
6	S6-1	15:24:27	261	0,051	52,13	348,67	20,01
	S6-2	15:26:35	198	0,056	55,44	357,83	19,38
	S6-3	15:28:58	225	0,054	54,36	360,12	19,37
8	S8-1	14:58:50	210	0,053	58,54	402,99	20,78
	S8-2	15:00:44	172	0,053	56,93	411,59	20,72
	S8-3	15:02:53	148	0,060	57,77	410,60	24,36
12	S12-1	13:27:53	358	0,042	113,27	769,28	28,53
	S12-2	13:31:08	453	0,038	118,21	768,33	26,50
	S12-3	13:35:10	319	0,040	112,930	761,76	28,67
14	S14-1	12:26:29	1387	0,053	449,09	821,16	21,66
	S14-2	12:47:15	1263	0,054	415,49	781,23	18,36
16	S16-1	10:48:24	1947	0,022	616,41	1942,04	40,38
	S16-2	11:04:16	2629	0,024	625,81	1873,17	35,21
	S16-3	11:25:59	1662	0,021	622,87	2037,72	41,26
19	S19-1	09:25:54	1009	0,025	258,30	1584,62	24,51
	S19-2	09:34:23	1274	0,015	264,95	1571,77	23,47
	S19-3	09:45:33	852	0,018	264,92	1577,71	18,08

Fonte: FIPAI (2015)

As descargas líquidas em todas as seções apresentaram resultados similares. Em relação à seção 16, por apresentar maior largura no reservatório aliado à intensidade dos ventos que variou entre 0,219 e 0,533 m.s⁻¹ na primeira campanha, e 0,780 e 1,256 m.s⁻¹ na segunda campanha, houveram dificuldades na medição justamente pelas ondas formadas no reservatório que impediram o ADCP de ficar na vertical 100% do tempo, prejudicando a qualidade dos resultados para tal seção em ambas as campanhas. Isso aconteceu justamente pelo fato do vento prejudicar o barco a se manter na rota de medição com o equipamento na vertical, além de algumas células indicarem escoamento contrário ao fluxo normal da velocidade.

Para facilitar a utilização dos dados obtidos com o ADCP, nas Tabelas 10 e 11 estão resumidos os dados hidráulicos médios das seções específicas do reservatório da PCH de Mogi-Guaçu que foram utilizados na ferramenta computacional desenvolvida.

Tabela 10 - Características hidráulicas médias do reservatório de Mogi-Guaçu (Campanha 1)

Seção	Velocidade (m/s)	Largura (m)	Área (m ²)	Vazão (m ³ /s)
1	0,062	59,43	376,02	22,50
6	0,082	49,78	304,59	23,26
8	0,061	57,82	387,23	22,38
12	0,041	121,44	742,08	23,98
16	0,014	659,40	2084,54	14,36
20	0,034	156,48	861,50	23,18

Fonte: Autor

Tabela 11 - Características hidráulicas médias do reservatório de Mogi-Guaçu (Campanha 2)

Seção	Velocidade (m/s)	Largura(m)	Área (m ²)	Vazão (m ³ /s)
1	0,051	54,31	404,83	19,45
6	0,054	53,98	355,54	19,59
8	0,055	57,75	408,39	21,95
12	0,040	114,80	766,46	27,90
16	0,022	621,70	1950,98	38,95
19	0,019	262,72	1578,03	22,02

Fonte: Autor

Além das características hidráulicas de algumas seções do reservatório, também foram obtidos dados de concentração de sedimentos em suspensão e turbidez. Nos Quadros 13 e 14 estão os principais resultados das amostras de concentração de sedimentos em suspensão obtidas por meio do método convencional (método gravimétrico) referentes aos dias 27 e 29 de janeiro de 2014 (1ª campanha) e 20 de março de 2014 (2ª campanha), respectivamente.

Quadro 13 – Resultados das amostras de concentração de sedimentos em suspensão da primeira campanha de campo

Identificação da amostra			Filtro		Amostra + Filtro (g)	Volume utilizado (L)	Concentração de Sedimentos (g.L ⁻¹)	SS _c (mg.L ⁻¹)
Ponto	Prof. (m)	Data	ID	Massa (g)				
P1	1,0	29/01/2014	3	0,0883	0,0925	0,10	0,042	42,00
P1	6,0	29/01/2014	4	0,0868	0,0944	0,10	0,076	76,00
P1	1,0	27/01/2014	5	0,0876	0,0939	0,10	0,063	63,00
P1	7,0	27/01/2014	6	0,0887	0,0960	0,10	0,073	73,00
P6	1,0	29/01/2014	7	0,0865	0,0900	0,10	0,035	35,00
P6	7,0	29/01/2014	8	0,0884	0,0954	0,10	0,070	70,00
P8	1,0	29/01/2014	9	0,0867	0,0896	0,10	0,029	29,00
P8	7,0	29/01/2014	10	0,0866	0,0927	0,10	0,061	61,00
P11	1,0	27/01/2014	11	0,0901	0,0929	0,10	0,028	28,00
P11	7,0	27/01/2014	12	0,0878	0,0917	0,10	0,039	39,00
P12	1,0	29/01/2014	13	0,0903	0,0930	0,10	0,027	27,00
P12	8,0	29/01/2014	14	0,0912	0,0956	0,10	0,044	44,00
P14MD	1,0	27/01/2014	15	0,0875	0,0924	0,10	0,049	49,00

Identificação da amostra			Filtro		Amostra + Filtro (g)	Volume utilizado (L)	Concentração de Sedimentos (g.L ⁻¹)	SS _C (mg.L ⁻¹)
Ponto	Prof. (m)	Data	ID	Massa (g)				
P14ME	1,0	27/01/2014	16	0,0898	0,0932	0,10	0,034	34,00
P16	1,0	27/01/2014	17	0,0866	0,0905	0,10	0,039	39,00
P16	5,0	27/01/2014	18	0,0909	0,0955	0,10	0,046	46,00
P16ME	1,0	27/01/2014	19	0,0909	0,0943	0,10	0,034	34,00
P16ME	5,0	27/01/2014	20	0,0866	0,0903	0,10	0,037	37,00
P16MD	1,0	27/01/2014	21	0,0858	0,0894	0,10	0,036	36,00
P16MD	4,0	27/01/2014	22	0,0866	0,0904	0,10	0,038	38,00
P16	1,0	29/01/2014	23	0,0876	0,0906	0,10	0,030	30,00
P16	3,0	29/01/2014	24	0,0866	0,0896	0,10	0,030	30,00
P16ME	1,0	29/01/2014	25	0,0884	0,0903	0,10	0,019	19,00
P16ME	6,0	29/01/2014	26	0,0891	0,0912	0,10	0,021	21,00
P16MD	1,0	29/01/2014	27	0,0872	0,0897	0,10	0,025	25,00
P16MD	2,0	29/01/2014	28	0,0868	0,0893	0,10	0,025	25,00
P20	1,0	27/01/2014	29	0,0891	0,0915	0,10	0,024	24,00
P20	9,0	27/01/2014	30	0,0862	0,0912	0,10	0,050	50,00
P20ME	1,0	27/01/2014	31	0,0866	0,0888	0,10	0,022	22,00
P20ME	3,0	27/01/2014	32	0,0877	0,0905	0,10	0,028	28,00
P20MD	1,0	27/01/2014	33	0,0879	0,0896	0,10	0,017	17,00
P20MD	5,0	27/01/2014	34	0,0862	0,0907	0,10	0,045	45,00
P20	1,0	29/01/2014	35	0,0870	0,0889	0,10	0,019	19,00
P20	9,0	29/01/2014	36	0,0886	0,0912	0,10	0,026	26,00
P20ME	1,0	29/01/2014	37	0,0888	0,0906	0,10	0,018	18,00
P20ME	2,0	29/01/2014	38	0,0870	0,0891	0,10	0,021	21,00
P20MD	1,0	29/01/2014	39	0,0891	0,0907	0,10	0,016	16,00
P20MD	5,0	29/01/2014	40	0,0887	0,0905	0,10	0,018	18,00

Legenda: MD – Margem direita; ME – Margem esquerda

Fonte: FIPAI (2015)

Quadro 14 – Resultados das amostras de concentração de sedimentos em suspensão da segunda campanha de campo

Identificação da amostra			Filtro		Amostra + Filtro (g)	Volume utilizado (L)	Concentração de Sedimentos (g.L ⁻¹)	SS _C (mg.L ⁻¹)
Ponto	Prof. (m)	Data	ID	Massa (g)				
P1	1,0	20/03/2014	1	0,0882	0,092	0,3	0,013	12,67
P1	7,0	20/03/2014	2	0,0918	0,1	0,3	0,027	27,33
P6	1,0	20/03/2014	3	0,0882	0,0912	0,3	0,010	10,00
P6	7,0	20/03/2014	4	0,0885	0,0948	0,3	0,021	21,00
P8	1,0	20/03/2014	5	0,0876	0,0918	0,3	0,014	14,00
P8	8,0	20/03/2014	24	0,0935	0,1111	0,05	0,352	352,00
P12	1,0	20/03/2014	7	0,0903	0,0951	0,3	0,016	16,00
P12	8,0	20/03/2014	8	0,0899	0,0974	0,3	0,025	25,00
P14MD	1,0	20/03/2014	9	0,0896	0,0924	0,3	0,009	9,33
P14ME	1,0	20/03/2014	10	0,0908	0,0983	0,4	0,019	18,75
P14ME	2,0	20/03/2014	11	0,0903	0,0997	0,5	0,019	18,80
P16ME	1,0	20/03/2014	12	0,0911	0,0942	0,4	0,008	7,75
P16ME	4,0	20/03/2014	13	0,0861	0,0896	0,4	0,009	8,75
P16	1,0	20/03/2014	14	0,0861	0,0941	0,4	0,020	20,00
P16	6,0	20/03/2014	15	0,0925	0,0979	0,3	0,018	18,00

Identificação da amostra			Filtro		Amostra + Filtro (g)	Volume utilizado (L)	Concentração de Sedimentos (g.L ⁻¹)	SS _C (mg.L ⁻¹)
Ponto	Prof. (m)	Data	ID	Massa (g)				
P16MD	1,0	20/03/2014	16	0,0861	0,092	0,3	0,020	19,67
P16MD	3,0	20/03/2014	17	0,0907	0,0952	0,3	0,015	15,0
P19ME	1,0	20/03/2014	18	0,087	0,0908	0,5	0,076	7,60
P19ME	4,0	20/03/2014	19	0,092	0,095	0,4	0,075	7,50
P19	1,0	20/03/2014	20	0,0909	0,0936	0,4	0,007	6,75
P19	5,0	20/03/2014	21	0,0931	0,0987	0,4	0,014	14,00
P19MD	1,0	20/03/2014	22	0,0898	0,0931	0,5	0,007	6,60
P19MD	9,0	20/03/2014	23	0,0864	0,092	0,5	0,011	11,20

Legenda: MD – Margem direita; ME – Margem esquerda

Fonte: FIPAI (2015)

Paralelamente foram realizadas amostragens da turbidez com a sonda multiparâmetro YSI 6600 e das concentrações de sedimentos em suspensão SS_L utilizando a sonda LISST-100X. Com o intuito de buscar relacionar os dados de turbidez e SS_L com SS_C, tais dados foram tabulados, e estão apresentados nos Quadros 15 e 16.

Quadro 15 – Dados de turbidez obtidos com a sonda multiparâmetro no reservatório de Mogi-Guaçu

27/01/2014			29/01/2014			20/03/2014		
Ponto	Prof. (m)	Turbidez (NTU)	Ponto	Prof. (m)	Turbidez (NTU)	Ponto	Prof. (m)	Turbidez (NTU)
P11	1,0	81,5	P1	1,0	67,8	P1	1,0	22,9
P11	7,0	93,9	P6	1,0	62,35	P1	7,0	33,6
14MD	1,0	104,9	P8	1,0	55,9	P6	1,0	19,1
14ME	1,0	103,15	P12	1,0	58,9	P6	7,0	34,65
P16	1,0	110	P12	8,0	71,6	P8	1,0	21,8
P16	5,0	118	P16	1,0	56,45	P12	1,0	26,35
P16ME	1,0	87,5	P16	5,0	54,9	P12	8,0	40,0
P16ME	5,0	111	P16ME	1,0	56,45	P14MD	1,0	17,3
P16MD	1,0	105,3	P16ME	6,0	68,1	P14ME	1,0	29,1
P16MD	4,0	118,8	P16MD	1,0	54,9	P14ME	2,0	35,2
P20	1,0	56,45	P16MD	2,0	55,6	P16	1,0	30,4
P20	9,0	123,35	P20	1,0	54,3	P16	6,0	28,9
P20ME	1,0	60,45	P20	9,0	84,9	P16ME	1,0	13,2
P20ME	3,0	81,4	P20ME	1,0	52,5	P16ME	4,0	17,5
P20MD	1,0	51,2	P20ME	2,0	53,95	P16MD	1,0	31,2
P20MD	5,0	115,1	P20MD	1,0	53,7	P16MD	3,0	27,6
Legenda: ME = Margem Esquerda MD = Margem Direita			P20MD	5,0	72,6	P19	1,0	12,8
						P19	5,0	22,7
						P19ME	1,0	12,2
						P19ME	4,0	18,2
						P19MD	1,0	12,2
						P19MD	9,0	19,6

Fonte: Autor

Quadro 16 – Dados de SS_L obtidos com a sonda LISST-100X no reservatório de Mogi-Guaçu

27/01/2014			29/01/2014			20/03/2014		
Ponto	Prof.	SS _L	Ponto	Prof.	SS _L	Ponto	Prof.	SS _L
	(m)	(µL/L)		(m)	(µL/L)		(m)	(µL/L)
P11	1,0	55,50	P01	1,0	70,70	P1	1,0	26,20
P14ME	1,0	70,20	P06	1,0	59,90	P1	7,0	63,80
P16	5,1	67,80	P12	1,0	59,50	P6	1,1	21,20
P16ME	5,0	56,00	P12	8,0	98,30	P8	1,0	31,00
P16MD	0,9	53,90	P16	1,0	52,70	P12	1,0	40,50
P16MD	3,9	72,00	P16	4,9	50,30	P12	8,0	51,10
P20	1,0	29,40	P16MD	2,0	47,60	P14	0,9	12,40
P20MD	1,0	28,10	P16ME	1,0	27,00	P16	1,0	38,90
P20MD	5,2	75,80	P20	1,1	27,90	P16	6,0	33,60
P20ME	1,0	33,30	P20ME	1,0	19,90	P19	1,0	16,20
P20ME	3,1	46,40	P20MD	1,0	23,50	P19	5,0	25,20
Legenda: ME = Margem Esquerda MD = Margem Direita						P14ME	1,0	33,30
						P14ME	2,0	47,30
						P16MD	1,0	37,10
						P16ME	1,0	14,90
						P16ME	4,0	20,50
						P19MD	1,0	13,30
						P19MD	8,0	20,40
						P19ME	1,0	11,90
						P19ME	4,6	17,80

Fonte: Autor

Pôde-se verificar a redução da turbidez em relação as duas atividades de campo. Enquanto foi observado valor máximo de turbidez de 123,35 NTU no dia 27/01/2014, na segunda campanha foi medido 40,0 NTU. Isso se deve principalmente à redução das velocidades e descarga líquida, e a consequente diminuição do transporte de sedimentos, já que parte deles, anteriormente em suspensão, passaram a depositar no corpo hídrico. Esse mesmo comportamento foi constatado nos dados SSL obtidos com a sonda LISST-100X, o que corrobora os valores de turbidez obtidos.

Nos Quadros 17 a 19 estão os dados de temperatura obtidos com a sonda multiparâmetro YSI 6600 em várias profundidades ao longo do reservatório Mogi-Guaçu, respectivamente para os dias 27/01/2014, 29/01/2014 e 20/03/2014. Esses dados foram utilizados exclusivamente para complementar a validação dos testes estatísticos da ferramenta computacional NH *Sediment and Statistic*.

Quadro 17 – Dados de temperatura da água do reservatório de Mogi-Guaçu no dia 27/01/2014

P1 (T1A)		P5 (T5A)		P7 (T7A)		P8 (T8A)		P9 (T9A)		P12 (T12A)		P14 (T14A)		P16 (T16A)	
Prof.	T (°C)	Prof.	T (°C)	Prof.	T (°C)	Prof.	T (°C)	Prof.	T (°C)	Prof.	T (°C)	Prof.	T (°C)	Prof.	T (°C)
0,3	27,7	0,2	28,3	0,2	28,3	0,2	29,6	0,2	29,1	0,2	30,1	0,2	27,4	0,2	28,6
1,0	27,6	1,0	27,8	1,0	26,8	1,1	27,8	1,0	27,2	1,1	27,1	1,0	26,2	1,1	27,5
2,0	27,5	2,1	27,8	2,0	26,6	2,1	26,6	1,9	26,9	1,9	26,5	2,0	26,2	2,1	26,5
3,0	27,6	3,1	27,2	3,0	26,5	3,0	26,5	3,0	26,5	3,1	26,3	2,7	26,2	3,1	26,1
4,0	27,5	4,0	27,1	4,0	26,4	3,9	26,5	4,0	26,5	4,1	26,3			4,0	26,1
5,0	27,2	5,0	26,9	4,9	26,4	4,9	26,5	5,0	26,5	5,0	26,3			5,1	26,1
6,0	27,1	6,1	26,8	6,0	26,4	6,0	26,5	5,4	26,4	6,0	26,2			5,9	26,1
7,0	27,1					7,0	26,4			7,1	26,2				
						7,9	26,4			8,0	26,2				
										9,1	26,2				
										10,0	26,2				
										11,1	26,2				
										12,0	26,2				
										12,6	26,2				

Legenda dos dados testados de temperatura seguindo nomenclatura TXY:

X: Ponto amostrado;

Y: A – amostragem do dia 27/01/2014; B – amostragem do dia 29/01/2014; e C – amostragem do dia 20/03/2014.

Fonte: FIPAI (2015)

Quadro 18 – Dados de temperatura da água do reservatório de Mogi-Guaçu no dia 29/01/2014

P1 (T1B)		P6 (T6B)		P8 (T8B)		P12 (T12B)		P16 (T16B)		P20 (T20B)	
Prof.	T (°C)	Prof.	T (°C)	Prof.	T (°C)	Prof.	T (°C)	Prof.	T (°C)	Prof.	T (°C)
0,2	28,4	0,2	29,2	0,3	31,0	0,2	30,9	0,3	29,0	0,3	28,3
1,0	28,0	1,0	27,9	1,0	29,3	1,0	27,9	1,0	28,1	1,1	27,8
2,0	27,5	2,0	27,3	2,0	27,8	2,0	27,3	2,0	27,1	2,0	27,3
3,0	27,1	3,0	26,8	2,9	27,1	2,9	27,1	3,0	26,9	2,9	26,7
4,0	27,0	4,0	26,6	4,1	26,9	4,0	27,1	4,0	26,5	3,9	26,7
4,9	27,0	5,0	26,5	5,0	26,9	5,0	27,1	4,9	26,5	5,0	26,5
6,0	26,9	6,0	26,5	5,9	26,9	6,1	27,1	6,0	26,4	5,9	26,5
7,1	26,8	7,0	26,5	7,0	26,9	7,0	27,1			7,0	26,4
		7,6	26,5	7,7	26,9	8,0	27,0			8,0	26,3
						9,0	27,0			8,9	26,2
										9,9	26,2
										10,5	26,2

Legenda dos dados testados de temperatura seguindo nomenclatura TXY:

X: Ponto amostrado;

Y: B – amostragem do dia 29/01/2014.

Fonte: FIPAI (2015)

Quadro 19 – Dados de temperatura da água do reservatório de Mogi-Guaçu no dia 20/03/2014

P1 (T1C)		P6 (T6C)		P8 (T8C)		P12 (T12C)		P16 (T16C)		P19 (T19C)	
Prof.	T (°C)	Prof.	T (°C)	Prof.	T (°C)	Prof.	T (°C)	Prof.	T (°C)	Prof.	T (°C)
0,2	27,4	0,3	27,8	0,2	27,6	0,2	27,7	0,3	27,6	0,3	27,5
1,0	27,0	1,1	27,8	1,0	27,3	1,0	27,3	1,0	27,3	1,0	27,3
2,0	26,3	2,0	26,9	2,0	27,1	2,0	26,8	2,0	27,0	2,0	27,0
3,0	26,2	3,0	26,5	3,0	26,9	3,0	26,6	3,0	26,3	3,0	26,8
4,0	26,1	4,0	26,3	4,0	26,7	4,0	26,6	4,1	26,4	4,0	26,3
5,0	25,9	5,0	26,3	5,0	26,5	5,0	26,5	5,1	26,3	5,0	26,3
6,0	25,9	6,0	26,3	6,0	26,5	6,0	26,5	6,0	26,3	5,9	26,1
7,0	25,9	7,0	26,2	7,0	26,5	7,0	26,5	6,5	26,2		
		7,9	26,2	8,0	26,6	8,0	26,5				

Legenda dos dados testados de temperatura seguindo nomenclatura TXY:

X: Ponto amostrado;

Y: C – amostragem do dia 20/03/2014.

Fonte: FIPAI (2015)

Em geral, as temperaturas superficiais são superiores às demais em todos os pontos amostrados no reservatório de Mogi-Guaçu. Isso se deve à radiação solar que atinge o lago e é transformada em calor, principalmente próximo à superfície. Outra característica observada é a redução da temperatura superficial entre as campanhas, sendo as menores observadas no dia 20/03/2014. Trata-se de uma característica comum em lagos de reservatórios causada pela diminuição da radiação solar.

5.1. Simulações na Ferramenta Computacional – Módulo Hidrossedimentológico

A Ferramenta Computacional *NH Sediment and Statistic* conta com um módulo hidrossedimentológico e um estatístico que pode ser selecionado pelo usuário de acordo com seus objetivos (Figura 51). A divisão da ferramenta computacional em dois módulos distintos facilita sua aplicação e permite outros tipos de dados (não hidrossedimentológicos) sejam utilizados nos cálculos estatísticos. Neste item será abordado o módulo hidrossedimentológico que conta com métodos de cálculo da descarga sólida em suspensão e o método de Colby (1957) para estimativa da descarga sólida total (Figura 52).

Figura 51 – Tela inicial da Ferramenta Computacional *NH Sediment and Statistic*

Fonte: Autor

Figura 52 – Tela de seleção do método hidrossedimentológico

Fonte: Autor

18,96 t.dia⁻¹ para as campanhas 1 e 2, respectivamente. Com isso, infere-se que essa quantidade de sedimentos se depositou no reservatório em algum ponto, principalmente na região do delta localizado entre as seções 12 e 14. Como esperado, a redução da velocidade do fluxo no período de estiagem (campanha 2) causou maior deposição dos sedimentos em suspensão, corroborando com os dados obtidos anteriormente.

Por se tratar de um método de cálculo direto, não houve a necessidade de comparação com outro *software*, entretanto sua implementação na ferramenta computacional está relacionada com a otimização de tempo. A ferramenta computacional permite o cálculo da descarga sólida em suspensão para várias seções ao mesmo tempo, além de possibilitar ao usuário, se necessário, o cálculo de valores médios ou a soma das Qss. Toda a codificação do cálculo da descarga sólida em suspensão em *Visual Basic for Applications* se encontra no ANEXO G.

5.1.2. Estimativa da descarga sólida total

Na Figura 54 está apresentada a tela de estimativa da descarga sólida total pelo método simplificado de Colby (1957) implementada na Ferramenta Computacional NH *Sediment and Statistic*. A ferramenta possibilita que o usuário insira os dados de descarga líquida (m³.s⁻¹), velocidade média (m.s⁻¹), largura (m), profundidade média (m) e concentração média (mg.L⁻¹) nos campos destacados em amarelo, e os resultados obtidos são apresentados nos campos em cinza. Toda codificação e implementação do método de estimativa da descarga sólida total em VBA pode ser conferido no ANEXO H.

Figura 54 – Tela de estimativa da descarga sólida total pelo método simplificado de Colby (1957)

Descarga Sólida Total Método Simplificado de Colby - Colby (1957)									
n	Medição	Descarga líquida (m ³ /s)	Velocidade média (m/s)	Largura (m)	Profundidade (m)	Concentração de sedimentos em suspensão (mg/L)	Descarga Sólida medida - Qss (t/dia)	Descarga Sólida não medida - Qnm (t/dia)	Descarga Sólida total - Qst (t/dia)
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									

Comandos

Calcular (Qst)

Exportar Imagem

Voltar

Fonte: Autor

A Figura 55 ilustra a tela com os dados utilizados na ferramenta computacional para a estimativa da descarga sólida total referente à primeira campanha e a Tabela 13 apresenta o resumo contendo os respectivos resultados obtidos.

Figura 55 – Cálculo da descarga sólida total em diferentes seções (Campanha 1)

n	Medição	Descarga líquida (m³/s)	Velocidade média (m/s)	Largura (m)	Profundidade (m)	Concentração de sedimentos em suspensão (mg/L)	Descarga Sólida medida - Qss (t/dia)	Descarga Sólida não medida - Qnm (t/dia)	Descarga Sólida total - Qst (t/dia)
1	S1-1	24,22	0,064	61,29	6,450	40,855	85,493	2,796	88,289
2	S1-2	21,83	0,060	58,57	6,339	40,855	77,056	2,319	79,376
3	S1-3	21,65	0,058	60,10	6,316	40,855	76,421	2,209	78,630
4	S1-4	22,31	0,064	57,74	6,198	40,855	78,751	2,634	81,385
5	S6-1	22,64	0,086	48,02	5,907	47,324	92,570	4,495	97,065
6	S6-2	22,95	0,081	49,40	6,210	47,324	93,837	4,055	97,892
7	S6-3	24,93	0,086	50,41	6,102	47,324	101,933	4,719	106,652
8	S6-4	22,50	0,076	51,27	6,247	47,324	91,997	3,660	95,657
9	S8-1	21,77	0,066	58,53	6,725	55,269	103,957	3,946	107,903
10	S8-2	22,03	0,057	57,04	6,686	55,269	105,199	2,810	108,009
11	S8-3	22,89	0,062	56,81	6,711	55,269	109,305	3,350	112,656
12	S8-4	22,83	0,059	58,91	6,666	55,269	109,019	3,125	112,144
13	S12-1	27,61	0,045	117,56	6,223	34,622	82,590	2,287	84,877
14	S12-2	22,76	0,040	120,81	6,132	34,622	68,082	1,815	69,897
15	S12-3	24,80	0,042	118,59	6,178	34,622	74,184	1,983	76,167
16	S12-4	20,76	0,038	128,80	5,926	34,622	62,100	1,729	63,829
17	S16-4	21,77	0,013	667,56	4,402	27,557	51,833	0,515	52,348
18	S20-1	27,39	0,033	160,11	5,356	33,714	79,785	1,331	81,116
19	S20-2	24,87	0,038	158,68	5,395	33,714	72,444	1,804	74,249
20	S20-3	22,06	0,026	152,33	5,594	33,714	64,259	0,878	65,138
21	S20-4	22,62	0,037	154,81	5,685	33,714	65,890	1,935	67,826

Fonte: Autor

Tabela 13 – Síntese dos dados de descarga sólida total obtidos na Ferramenta Computacional NHSS (Campanha 1)

Seção	Medição	Descarga líquida média (m³.s⁻¹)	SS _C (mg.L⁻¹)	Descarga Sólida medida – Qss (t.dia⁻¹)	Descarga Sólida não medida – Qnm (t.dia⁻¹)	Descarga Sólida Total – Qst (t.dia⁻¹)
Seção 1 (S1)	S1-1	24,22	40,855	85,493	2,796	88,289
	S1-2	21,83		77,056	2,319	79,376
	S1-3	21,65		76,421	2,209	78,630
	S1-4	22,31		78,751	2,634	81,385
Seção 6 (S6)	S6-1	22,64	47,324	92,570	4,495	97,065
	S6-2	22,95		93,837	4,055	97,892
	S6-3	24,93		101,933	4,719	106,652
	S6-4	22,50		91,997	3,660	95,657
Seção 8 (S8)	S8-1	21,77	55,269	103,957	3,946	107,903
	S8-2	22,03		105,199	2,810	108,009
	S8-3	22,89		109,305	3,350	112,656
	S8-4	22,83		109,019	3,125	112,144
Seção 12 (S12)	S12-1	27,61	34,622	82,590	2,287	84,877
	S12-2	22,76		68,082	1,815	69,897
	S12-3	24,80		74,184	1,983	76,167
	S12-4	20,76		62,100	1,729	63,829
Seção 16 (S16)	S16-4	21,77	27,557	51,833	0,515	52,348
Seção 20 (S20)	S20-1	27,39	33,714	79,785	1,331	81,116
	S20-2	24,87		72,444	1,804	74,249
	S20-3	22,06		64,259	0,878	65,138
	S20-4	22,62		65,890	1,935	67,826

Fonte: Autor

Como é possível observar na Tabela 13, os valores de descarga sólida apresentaram valores médios nas seções do reservatório de Mogi-Guaçu variando entre 81,92 t.dia⁻¹ (Seção 1) e 72,08 t.dia⁻¹ (Seção 20). Notou-se também que o aumento da descarga sólida total principalmente na seção 8 (110,18 t.dia⁻¹) se deu devido às dragagens que aconteceram na região. Entre as seções 7 e 8 estava localizada a base de operações das dragas (Figura 56), local também onde toda areia era “lavada”, procedimento esse que acarretou na ressuspensão do sedimento, aumentando assim os valores de descarga sólida total.

Figura 56 – Ponto de "lavagem" da areia dragada

Fonte: FIPAI (2015)

Além disso, verificou-se a redução da Q_{st} nas seções 12, 16 e 20, com valores médios respectivamente de 73,69, 52,35 e 72,08 t.dia⁻¹. Isso se deu principalmente devido ao aumento na largura do reservatório onde há redução na profundidade se identificando a formação de um delta de deposição de sedimento. Nessas seções as classes de maior granulometria se depositaram reduzindo a quantidade de sedimentos sendo transportados.

Visando à comparação e verificação da variação temporal da Q_{st} no reservatório de Mogi-Guaçu, a tela com os dados utilizados na ferramenta computacional para a estimativa da descarga sólida total referente à segunda campanha está ilustrada na Figura 57 e na Tabela 14 está apresentado um resumo contendo os respectivos resultados obtidos.

Figura 57 – Cálculo da descarga sólida total em diferentes seções (Campanha 2)

n	Medição	Descarga líquida (m³/s)	Velocidade média (m/s)	Largura (m)	Profundidade (m)	Concentração de sedimentos em suspensão (mg/L)	Descarga Sólida medida - Qss (t/dia)	Descarga Sólida não medida - Qnm (t/dia)	Descarga Sólida total - Qst (t/dia)
1	S1-1	21,09	0,051	51,31	7,544	26,064	47,493	1,456	48,948
2	S1-2	16,80	0,050	54,80	7,463	26,064	37,832	1,420	39,252
3	S1-3	20,45	0,051	56,83	7,363	26,064	46,051	1,537	47,588
4	S6-1	20,01	0,051	52,13	6,688	28,984	50,109	1,483	51,593
5	S6-2	19,38	0,056	55,44	6,454	28,984	48,532	1,599	50,131
6	S6-3	19,37	0,054	54,36	6,625	28,984	48,507	1,748	50,255
7	S8-1	20,78	0,053	58,54	6,884	21,698	38,957	1,573	40,530
8	S8-2	20,72	0,053	56,93	7,230	21,698	38,844	1,530	40,374
9	S8-3	24,36	0,060	57,77	7,107	21,698	45,668	2,024	47,692
10	S12-1	28,53	0,042	113,27	6,792	21,159	52,157	1,829	53,986
11	S12-2	26,50	0,038	118,21	6,500	21,159	48,446	1,252	49,698
12	S12-3	28,67	0,040	112,93	6,745	21,159	52,413	1,642	54,056
13	S16-1	40,38	0,022	616,41	3,151	32,788	114,392	1,032	115,424
14	S16-2	35,21	0,024	625,81	2,993	32,788	99,746	1,286	101,032
15	S16-3	41,26	0,021	622,87	3,272	32,788	116,885	0,934	117,819
16	S19-1	24,51	0,025	258,30	6,135	13,359	28,290	0,875	29,164
17	S19-2	23,47	0,015	264,95	5,932	13,359	27,089	0,293	27,382
18	S19-3	18,08	0,018	264,92	5,955	13,359	20,868	0,437	21,305

Fonte: Autor

Tabela 14 – Síntese dos dados obtidos na Ferramenta Computacional NHSS (Campanha 2)

Seções	Medição	Descarga líquida média (m³.s⁻¹)	SS _C (mg.L⁻¹)	Descarga Sólida medida – Qss (t.dia⁻¹)	Descarga Sólida não medida – Qnm (t.dia⁻¹)	Descarga Sólida Total – Qst (t.dia⁻¹)
Seção 1 (S1)	S1-1	21,09	26,06	47,493	1,456	48,948
	S1-2	16,8		37,832	1,420	39,252
	S1-3	20,45		46,051	1,537	47,588
Seção 6 (S6)	S6-1	20,01	28,98	50,109	1,483	51,593
	S6-2	19,38		48,532	1,599	50,131
	S6-3	19,37		48,507	1,748	50,255
Seção 8 (S8)	S8-1	20,78	21,69	38,957	1,573	40,530
	S8-2	20,72		38,844	1,530	40,374
	S8-3	24,36		45,668	2,024	47,692
Seção 12 (S12)	S12-1	28,53	21,16	52,157	1,829	53,986
	S12-2	26,5		48,446	1,252	49,698
	S12-3	28,67		52,413	1,642	54,056
Seção 16 (S16)	S16-1	40,38	32,79	114,392	1,032	115,424
	S16-2	35,21		99,746	1,286	101,032
	S16-3	41,26		116,885	0,934	117,819
Seção 19 (S19)	S19-1	24,51	13,36	28,290	0,875	29,164
	S19-2	23,47		27,089	0,293	27,382
	S19-3	18,08		20,868	0,437	21,305

Fonte: Autor

Neste caso, pôde-se observar que valores médios de descarga sólida total variaram entre 25,95 t.dia⁻¹ (Seção 19) e 111,43 t.dia⁻¹ (Seção 16). Os valores de Q_{st} apresentados na Tabela 22 são significativamente inferiores aos dados obtidos na campanha 1, justamente por se

verificar descargas líquidas e concentrações de sedimentos em suspensão menores. Além disso, essa característica era esperada devido a campanha 2 estar associada ao período de estiagem do ano hidrológico.

Vale destacar que as altas Q_{st} obtidas na seção 16 estão relacionadas com as vazões maiores mensuradas. Acredita-se que esse aumento da vazão está relacionado com as dificuldades nas medições das características hidráulicas da seção com o ADCP, já que a intensidade do vento dificultou a obtenção de dados. Apesar disso, as estimativas de descarga sólida total pelo método simplificado de Colby (1957) obtidas com a Ferramenta computacional *NH Sediment and Statistic* estão consistentes entre as duas campanhas.

5.1.3. Verificação dos resultados de descarga sólida total obtidos na ferramenta computacional – *NH Sediment and Statistic*

Para uma avaliação completa dos resultados de descarga sólida de total obtidos pela ferramenta computacional *NH Sediment and Statistic*, tais resultados foram comparados a outras duas ferramentas computacionais: WinTSR (ROSA; BERLING, 2002) e *NH Sediment* (MIRANDA, 2015). Nas Figuras 58 e 59 estão apresentadas, respectivamente, as telas dos programas WinTSR e *NH Sediment* utilizados com os dados de entrada e principais resultados obtidos para o método simplificado de Colby.

Figura 58 – Tela inicial do software WinTSR

The screenshot shows the WinTSR software interface. At the top, the title bar reads 'MÉTODO DE COLBY 1957'. Below the title bar, there are several input fields and a dropdown menu. The dropdown menu is set to 'COLBY (1957)'. Below it, there are three radio buttons for 'Sistema de Unidades': 'Sistema Internacional' (selected), 'Sistema Inglês', and 'Sistema Inglês'. To the right of these, there are two input fields: 'Local' with the value 'SB-2' and 'Data' with the value 'Campanha 1'. Below these, there are five input fields for river parameters: 'Largura da superfície livre do rio' (57.04 m), 'Velocidade média da superfície d'água' (0.057 m/s), 'Profundidade hidráulica do rio' (6.69 m), 'Vazão líquida do rio' (22.03 m³/s), and 'Concentração de sedimentos em suspensão' (55.27 ppm). On the right side of the interface, there is a vertical toolbar with icons for 'Sobre...', 'Calcular', 'Limpar', 'Abrir', 'Salvar', 'Copiar', and 'Sair'. Below the input fields, there is a section titled 'CÁLCULO DE SEDIMENTOS DE FUNDO, MÉTODO DE COLBY 1957'. This section contains a list of input data and the calculated results. The input data includes: 'Local da leitura.....: SB-2', 'Data da coleta dos dados.....: Campanha 1', and 'Sistema de unidades adotado.....: Sistema Internacional de Unidades'. The calculated results include: 'Largura da superfície d'água.....: 57,04 m.', 'Velocidade média.....: 0,057 m/s.', 'Profundidade hidráulica do Rio.....: 6,69 m.', 'Vazão líquida do Rio.....: 22,03 m³/s.', and 'Concentração de sedimentos finos...: 55,27 ppm.'. At the bottom of the section, the total sediment transport is calculated as 'Total de Sedimentos de Fundo Transportado: 107,715335 Ton/dia'.

Fonte: Adaptado de Rosa e Berling (2002)

Figura 59 – Tela inicial da Ferramenta Computacional NH *Sediment*

Fonte: Adaptado de Miranda (2015)

Os resultados obtidos a partir das simulações nestes dois softwares (WinTSR e NH *Sediment*), assim como a comparação com os dados da Ferramenta Computacional (NH *Sediment and Statistic* – NHSS) estão apresentados nas Tabelas 15 a 18.

Tabela 15 – Comparações entre os valores de descarga sólida total (Qst) obtidos na Ferramenta Computacional NHSS e no software WinTSR (Campanha 1)

Seção	Qst - NHSS (t.dia ⁻¹)	Qst - WinTSR (t.dia ⁻¹)	Diferença entre Qst (WinTSR e NHSS) (t.dia ⁻¹)	Diferença entre Qst (WinTSR e NHSS) (%)
S1-1	88,289	88,006	-0,283	-0,32%
S1-2	79,376	79,140	-0,236	-0,30%
S1-3	78,630	78,402	-0,228	-0,29%
S1-4	81,385	81,119	-0,266	-0,33%
S6-1	97,065	96,641	-0,424	-0,44%

Continua

Continuação				
Seção	Qst - NHSS (t.dia ⁻¹)	Qst - WinTSR (t.dia ⁻¹)	Diferença entre Qst (WinTSR e NHSS) (t.dia ⁻¹)	Diferença entre Qst (WinTSR e NHSS) (%)
S6-2	97,892	97,504	-0,388	-0,40%
S6-3	106,652	106,206	-0,446	-0,42%
S6-4	95,657	95,301	-0,356	-0,37%
S8-1	107,903	107,502	-0,401	-0,37%
S8-2	108,009	107,715	-0,294	-0,27%
S8-3	112,656	112,311	-0,345	-0,31%
S8-4	112,144	111,819	-0,325	-0,29%
S12-1	84,877	84,637	-0,240	-0,28%
S12-2	69,897	69,703	-0,194	-0,28%
S12-3	76,167	75,957	-0,210	-0,28%
S12-4	63,829	63,642	-0,187	-0,29%
S16-4	52,348	52,292	-0,056	-0,11%
S20-1	81,116	80,964	-0,152	-0,19%
S20-2	74,249	74,052	-0,197	-0,27%
S20-3	65,138	65,029	-0,109	-0,17%
S20-4	67,826	67,611	-0,215	-0,32%

Fonte: Autor

Tabela 16 – Comparações entre os valores de descarga sólida total (Qst) obtidos na Ferramenta Computacional NHSS e na Ferramenta NH *Sediment* (Campanha 1)

Seção	Qst - NHSS (t.dia ⁻¹)	Qst - NH <i>Sediment</i> (t.dia ⁻¹)	Diferença entre Qst (NH <i>Sediment</i> e NHSS) (t.dia ⁻¹)	Diferença entre Qst (NH <i>Sediment</i> e NHSS) (%)
S1-1	88,289	88,918	0,629	0,71%
S1-2	79,376	79,920	0,544	0,68%
S1-3	78,630	79,160	0,530	0,67%
S1-4	81,385	81,978	0,593	0,72%
S6-1	97,065	97,900	0,835	0,85%
S6-2	97,892	98,680	0,788	0,80%
S6-3	106,652	107,528	0,876	0,81%
S6-4	95,657	96,401	0,744	0,77%
S8-1	107,903	108,832	0,929	0,85%
S8-2	108,009	108,733	0,724	0,67%
S8-3	112,656	113,477	0,821	0,72%
S8-4	112,144	112,933	0,789	0,70%
S12-1	84,877	85,503	0,626	0,73%
S12-2	69,897	70,427	0,530	0,75%
S12-3	76,167	76,732	0,565	0,74%

Continua

Continuação

Seção	Qst - NHSS (t.dia ⁻¹)	Qst - NH <i>Sediment</i> (t.dia ⁻¹)	Diferença entre Qst (NH <i>Sediment</i> e NHSS) (t.dia ⁻¹)	Diferença entre Qst (NH <i>Sediment</i> e NHSS) (%)
S12-4	63,829	64,348	0,519	0,81%
S16-4	52,348	52,579	0,231	0,44%
S20-1	81,116	81,533	0,417	0,51%
S20-2	74,249	74,776	0,527	0,71%
S20-3	65,138	65,453	0,315	0,48%
S20-4	67,826	68,413	0,587	0,86%

Fonte: Autor

Ao comparar os valores de Q_{st} obtidos pela ferramenta computacional desenvolvida com o WinTSR foi possível verificar baixa diferença percentual entre os aplicativos, com média de -0,30%. Já em relação ao NH *Sediment*, constatou-se diferença percentual média de 0,71% para a primeira campanha. Apesar da maior diferença entre as ferramentas NH *Sediment and Statistic* e NH *Sediment*, em ambos os casos essa diferença é mínima e não compromete estudos futuros do transporte de sedimentos na região.

Tabela 17 – Comparações entre os valores de descarga sólida total (Q_{st}) obtidos na Ferramenta Computacional NHSS e no software WinTSR (Campanha 2)

Seção	Qst - NHSS (t.dia ⁻¹)	Qst - WinTSR (t.dia ⁻¹)	Diferença entre Qst (WinTSR e NHSS) (t.dia ⁻¹)	Diferença entre Qst (WinTSR e NHSS) (%)
S1-1	48,948	48,792	-0,156	-0,32%
S1-2	39,252	39,102	-0,150	-0,38%
S1-3	47,588	47,425	-0,163	-0,34%
S6-1	51,593	51,434	-0,159	-0,31%
S6-2	50,131	49,969	-0,162	-0,32%
S6-3	50,255	50,071	-0,184	-0,37%
S8-1	40,530	40,377	-0,153	-0,38%
S8-2	40,374	40,225	-0,149	-0,37%
S8-3	47,692	47,500	-0,192	-0,41%
S12-1	53,986	53,798	-0,188	-0,35%
S12-2	49,698	49,571	-0,127	-0,26%
S12-3	54,056	53,885	-0,171	-0,32%
S16-1	115,424	115,488	0,064	0,06%
S16-2	101,032	101,106	0,074	0,07%
S16-3	117,819	117,879	0,060	0,05%
S19-1	29,164	29,073	-0,091	-0,31%
S19-2	27,382	27,350	-0,032	-0,12%
S19-3	21,305	21,257	-0,048	-0,22%

Fonte: Autor

Tabela 18 – Comparações entre os valores de descarga sólida total (Qst) obtidos na Ferramenta Computacional NHSS e na Ferramenta NH *Sediment* (Campanha 2)

Seção	Qst - NHSS (t.dia ⁻¹)	Qst - NH Sediment (t.dia ⁻¹)	Diferença entre Qst (NH Sediment e NHSS) (t.dia ⁻¹)	Diferença entre Qst (NH Sediment e NHSS) (%)
S1-1	48,948	49,327	0,379	0,77%
S1-2	39,252	39,622	0,370	0,93%
S1-3	47,588	47,984	0,396	0,83%
S6-1	51,593	51,978	0,385	0,74%
S6-2	50,131	50,510	0,379	0,75%
S6-3	50,255	50,694	0,439	0,87%
S8-1	40,530	40,920	0,390	0,95%
S8-2	40,374	40,753	0,379	0,93%
S8-3	47,692	48,156	0,464	0,96%
S12-1	53,986	54,503	0,517	0,95%
S12-2	49,698	50,059	0,361	0,72%
S12-3	54,056	54,533	0,477	0,88%
S16-1	115,424	115,777	0,353	0,30%
S16-2	101,032	101,456	0,424	0,42%
S16-3	117,819	118,146	0,327	0,28%
S19-1	29,164	29,465	0,301	1,02%
S19-2	27,382	27,507	0,125	0,45%
S19-3	21,305	21,478	0,173	0,81%

Fonte: Autor

Em relação às comparações envolvendo dados da campanha 2, notou-se que, assim como na campanha 1, as diferenças de Q_{st} entre os softwares foi mínima, com valores médios de -0,26% e 0,75%, respectivamente em relação ao WinTSR e NH *Sediment*.

No Quadro 20 estão apresentadas as comparações das descargas sólidas englobando as duas campanhas classificadas em ordem crescente em relação ao Q_{st} obtido na ferramenta computacional desenvolvida. Além disso, adotou-se o WinTSR como *software* padrão de comparação devido sua ampla utilização em estudos de Scapin, Paiva e Beling (2007), Santos et al. (2012), Miranda (2015).

Desse modo, foi possível observar que a ferramenta computacional NH *Sediment and Statistic* apresentou valores de descarga sólida total condizentes aos outros *softwares*. As comparações com o WinTSR mostraram que o programa desenvolvido NHSS forneceu melhores resultados que a ferramenta NH *Sediment*, já que a máxima diferença percentual entre WinTSR e NHSS foi -0,44% enquanto entre WinTSR e NH *Sediment* foi -1,38%. Apesar disso,

os resultados entre todos os *softwares* são satisfatórios e cumprem o objetivo de estimar a descarga sólida total com máxima confiança.

Ressalta-se, por fim, a ferramenta computacional NH *Sediment and Statistic* permite o cálculo da Q_{st} de várias seções/pontos em um único *click* enquanto no WinTSR a obtenção desse parâmetro é unitária de seção em seção. Além disso, diferentemente do WinTSR e NH *Sediment* que são softwares voltados à hidrossedimentologia, a ferramenta computacional NH *Sediment and Statistic* é um software multidisciplinar que também realiza cálculos estatísticos.

Quadro 20 – Comparações das descargas sólidas totais para as duas campanhas

Medição	Qst - NHSS [t.dia ⁻¹]	Qst - WinTSR [t.dia ⁻¹]	Qst - NH Sediment [t.dia ⁻¹]	Diferença entre WinTSR e NHSS [t.dia ⁻¹]	Diferença entre NH Sediment e NHSS [t.dia ⁻¹]	Diferença entre WinTSR e NH Sediment [t.dia ⁻¹]	Diferença entre WinTSR e NHSS (%)	Diferença entre NH Sediment e NHSS (%)	Diferença entre WinTSR e NH Sediment (%)
A2-S19-3	21,30	21,26	21,48	-0,05	0,17	-0,22	-0,22%	0,81%	-1,04%
A2-S19-2	27,38	27,35	27,51	-0,03	0,13	-0,16	-0,12%	0,45%	-0,57%
A2-S19-1	29,16	29,07	29,47	-0,09	0,30	-0,39	-0,31%	1,02%	-1,35%
A2-S1-2	39,25	39,10	39,62	-0,15	0,37	-0,52	-0,38%	0,93%	-1,33%
A2-S8-2	40,37	40,23	40,75	-0,15	0,38	-0,53	-0,37%	0,93%	-1,31%
A2-S8-1	40,53	40,38	40,92	-0,15	0,39	-0,54	-0,38%	0,95%	-1,34%
A2-S1-3	47,59	47,43	47,98	-0,16	0,40	-0,56	-0,34%	0,83%	-1,18%
A2-S8-3	47,69	47,50	48,16	-0,19	0,46	-0,66	-0,41%	0,96%	-1,38%
A2-S1-1	48,95	48,79	49,33	-0,16	0,38	-0,53	-0,32%	0,77%	-1,10%
A2-S12-2	49,70	49,57	50,06	-0,13	0,36	-0,49	-0,26%	0,72%	-0,98%
A2-S6-2	50,13	49,97	50,51	-0,16	0,38	-0,54	-0,32%	0,75%	-1,08%
A2-S6-3	50,25	50,07	50,69	-0,18	0,44	-0,62	-0,37%	0,87%	-1,24%
A2-S6-1	51,59	51,43	51,98	-0,16	0,39	-0,54	-0,31%	0,74%	-1,06%
A1-S16-4	52,35	52,29	52,58	-0,06	0,23	-0,29	-0,11%	0,44%	-0,55%
A2-S12-1	53,99	53,80	54,50	-0,19	0,52	-0,70	-0,35%	0,95%	-1,31%
A2-S12-3	54,06	53,89	54,53	-0,17	0,48	-0,65	-0,32%	0,88%	-1,20%
A1-S12-4	63,83	63,64	64,35	-0,19	0,52	-0,71	-0,29%	0,81%	-1,11%
A1-S20-3	65,14	65,03	65,45	-0,11	0,32	-0,42	-0,17%	0,48%	-0,65%
A1-S20-4	67,83	67,61	68,41	-0,21	0,59	-0,80	-0,32%	0,86%	-1,19%
A1-S12-2	69,90	69,70	70,43	-0,19	0,53	-0,72	-0,28%	0,75%	-1,04%
A1-S20-2	74,25	74,05	74,78	-0,20	0,53	-0,72	-0,27%	0,71%	-0,98%
A1-S12-3	76,17	75,96	76,73	-0,21	0,56	-0,78	-0,28%	0,74%	-1,02%

Medição	Qst - NHSS [t.dia⁻¹]	Qst - WinTSR [t.dia⁻¹]	Qst - NH Sediment [t.dia⁻¹]	Diferença entre WinTSR e NHSS [t.dia⁻¹]	Diferença entre NH Sediment e NHSS [t.dia⁻¹]	Diferença entre WinTSR e NH Sediment [t.dia⁻¹]	Diferença entre WinTSR e NHSS (%)	Diferença entre NH Sediment e NHSS (%)	Diferença entre WinTSR e NH Sediment (%)
A1/S1-3	78,63	78,40	79,16	-0,23	0,53	-0,76	-0,29%	0,67%	-0,97%
A1/S1-2	79,38	79,14	79,92	-0,24	0,54	-0,78	-0,30%	0,68%	-0,99%
A1-S20-1	81,12	80,96	81,53	-0,15	0,42	-0,57	-0,19%	0,51%	-0,70%
A1/S1-4	81,38	81,12	81,98	-0,27	0,59	-0,86	-0,33%	0,72%	-1,06%
A1-S12-1	84,88	84,64	85,50	-0,24	0,63	-0,87	-0,28%	0,73%	-1,02%
A1/S1-1	88,29	88,01	88,92	-0,28	0,63	-0,91	-0,32%	0,71%	-1,04%
A1-S6-4	95,66	95,30	96,40	-0,36	0,74	-1,10	-0,37%	0,77%	-1,15%
A1/S6-1	97,06	96,64	97,90	-0,42	0,84	-1,26	-0,44%	0,85%	-1,30%
A1/S6-2	97,89	97,50	98,68	-0,39	0,79	-1,18	-0,40%	0,80%	-1,21%
A2-S16-2	101,03	101,11	101,46	0,07	0,42	-0,35	0,07%	0,42%	-0,35%
A1-S6-3	106,65	106,21	107,53	-0,45	0,88	-1,32	-0,42%	0,81%	-1,24%
A1-S8-1	107,90	107,50	108,83	-0,40	0,93	-1,33	-0,37%	0,85%	-1,24%
A1-S8-2	108,01	107,72	108,73	-0,29	0,72	-1,02	-0,27%	0,67%	-0,95%
A1-S8-4	112,14	111,82	112,93	-0,32	0,79	-1,11	-0,29%	0,70%	-1,00%
A1-S8-3	112,66	112,31	113,48	-0,34	0,82	-1,17	-0,31%	0,72%	-1,04%
A2-S16-1	115,42	115,49	115,78	0,06	0,35	-0,29	0,06%	0,30%	-0,25%
A2-S16-3	117,82	117,88	118,15	0,06	0,33	-0,27	0,05%	0,28%	-0,23%

Legenda da nomenclatura AX-SY-Z das medições:

X: 1 – Atividade de campo 1 (Campanha 1); e 2 – Atividade de campo 2 (Campanha 2).

Y: Identificação da seção amostrada;

Z: Identificação do número de medição

Fonte: Autor

5.2. Simulações na Ferramenta Computacional – Módulo Estatístico

Nessa seção serão apresentadas simulações no módulo estatístico desenvolvido na ferramenta computacional, que conta com métodos de estatística básica e uma opção para determinação dos parâmetros estatísticos. Em relação à primeira opção, está apresentada na Figura 60 a tela de seleção dos testes de inferência estatística que busca generalizações sobre uma população através de evidências fornecidas por uma amostra retirada desta população. Neste caso, o usuário tem opção de realizar o teste Kolmogorov-Smirnov (Teste de normalidade), teste de variâncias, teste de médias e o teste não-paramétrico Wilcoxon para medianas.

Figura 60 – Tela de seleção do módulo estatístico (Esquerda); Tela de seleção do teste estatístico (Direita)

Fonte: Autor

5.2.1. Proposta de metodologia para utilização do módulo estatístico da Ferramenta computacional NHSS

Após as atividades de campo e processamento dos dados de concentração e turbidez, buscou-se verificar a existência de uma relação funcional entre concentração de sedimentos em

suspensão obtidos convencionalmente (SS_C) com a concentração de sólidos suspensos medidos com a sonda LISST-100X (SS_L) e turbidez mensurada com a sonda multiparâmetro. Ressalta-se que todo procedimento descrito a seguir foi adaptado para os dados obtidos nesta tese, porém pode ser adequada a qualquer outro estudo que envolva a comparação de métodos medição ou variáveis.

Para facilitar a compreensão dos critérios adotados para realização dos testes envolvendo a ferramenta computacional, dividiram-se os dados em dois cenários distintos. Os dados de turbidez (NTU) e SS_C (mg.L^{-1}) foram englobados no Cenário 1 (C1), enquanto que no Cenário 2 (C2) estão incluídos os dados de sólidos suspensos SS_C (mg.L^{-1}) e os respectivos SS_L obtidos pela sonda LISST-100X ($\mu\text{L.L}^{-1}$).

Destaca-se aqui que, apesar dos dados de SS_C estarem presentes em ambos os cenários, tais dados não são iguais, justificando a adoção de dois cenários distintos. Todo procedimento de organização dos dados visando o estabelecimento de uma relação funcional está apresentado na Figura 61. Assim, foi possível obter a estimativa de sólidos suspensos (SS_E), em mg.L^{-1} , para cada um dos cenários apontados anteriormente seja a partir da turbidez ou de SS_L .

Figura 61 – Fluxograma do processo de organização dos dados de sólidos suspensos e turbidez obtidos

Em seguida, os dados de sólidos suspensos estimados foram comparados com os dados reais (medidos). Esse procedimento de comparação envolveu o cálculo de resíduos entre os dados por meio da Equação 116, seguido de testes de normalidade para verificar a validade das regressões lineares que culminaram nos dados estimados (Figura 62).

$$\text{Resíduo} = SS_C - SS_E \quad (116)$$

Em que:

SS_C = concentração de sólidos suspensos medidos convencionalmente [mg.L^{-1}];

SS_E = concentração de sólidos suspensos estimados [mg.L^{-1}].

Figura 62 – Fluxograma da metodologia adotada para verificação das Regressões lineares

Fonte: Autor

Esse procedimento foi realizado justamente porque tanto nas regressões lineares quanto nas múltiplas, as suposições do modelo precisam ser validadas para que os resultados sejam confiáveis. Para que uma regressão linear seja apropriada, algumas suposições devem ser

verdadeiras: variáveis serem independentes, variância do erro constante, não existirem *outliers* influentes, e a principal de todas, resíduos apresentando distribuição normal – Resíduos $\sim N(0,1)$ (PORTAL ACTION, 2018d).

Verificada a distribuição normal dos resíduos e a validade das regressões lineares, adotou-se a metodologia apresentada no fluxograma da Figura 63. Neste caso, realizou-se o teste de normalidade para os dados de cada um dos métodos de cada cenário. Para conjuntos de dados normais, aplicaram-se os testes paramétricos F de Fisher-Snedecor seguido do teste T de Student pareado. Já para os dados não-normais, aplicou-se o teste não-paramétrico Wilcoxon pareado, permitindo, assim, em ambas as situações verificar a igualdade ou não dos dados medidos e estimados, e a aplicabilidade do método de estimativa.

Figura 63 – Fluxograma da metodologia aplicada na realização dos testes estatísticos paramétricos e não-paramétricos

5.2.2. Aplicação do módulo estatístico da ferramenta computacional NHSS

Inicialmente para realização dos procedimentos estatísticos necessários, os dados de concentração de sedimentos em suspensão e turbidez foram agrupados em pares apresentados nos Quadros 21 e 22 objetivando a verificação de uma relação funcional entre as variáveis do estudo. Os dados apresentados correspondem às coletas de campo realizadas nos dias 27 e 29 de janeiro de 2014 (1ª campanha) e 20 de março de 2014 (2ª campanha).

Vale lembrar que os dados de turbidez (NTU) e SS_C ($mg.L^{-1}$) foram englobados no Cenário 1 (C1), enquanto que no Cenário 2 (C2) estão incluídos os dados de sólidos suspensos SS_C ($mg.L^{-1}$) e os respectivos SS_L obtidos pela sonda LISST-100X ($\mu L.L^{-1}$).

Quadro 21 – Dados de turbidez e SS_C (Cenário 1 – C1)

27/01/2014				29/01/2014				20/03/2014			
Ponto	Prof. (m)	Turbidez (NTU)	SS_C (mg/L)	Ponto	Prof. (m)	Turbidez (NTU)	SS_C (mg/L)	Ponto	Prof. (m)	Turbidez (NTU)	SS_C (mg/L)
P11	1,0	81,5	28,00	P1	1,0	67,8	42,00	P1	1,0	22,9	12,67
P11	7,0	93,9	39,00	P6	1,0	62,35	35,00	P1	7,0	33,6	27,33
14MD	1,0	104,9	49,00	P8	1,0	55,9	29,00	P6	1,0	19,1	10,00
14ME	1,0	103,15	34,00	P12	1,0	58,9	27,00	P6	7,0	34,65	21,00
P16	1,0	110	39,00	P12	8,0	71,6	44,00	P8	1,0	21,8	14,00
P16	5,0	118	46,00	P16	1,0	56,45	30,00	P12	1,0	26,35	16,00
P16ME	1,0	87,5	34,00	P16	5,0	54,9	30,00	P12	8,0	40	25,00
P16ME	5,0	111	37,00	P16ME	1,0	56,45	19,00	P14MD	1,0	17,3	9,33
P16MD	1,0	105,3	36,00	P16ME	6,0	68,1	21,00	P14ME	1,0	29,1	18,75
P16MD	4,0	118,8	38,00	P16MD	1,0	54,9	25,00	P14ME	2,0	35,2	18,80
P20	1,0	56,45	24,00	P16MD	2,0	55,6	25,00	P16	1,0	30,4	20,00
P20	9,0	123,35	50,00	P20	1,0	54,3	19,00	P16	6,0	28,9	18,00
P20ME	1,0	60,45	22,00	P20	9,0	84,9	26,00	P16ME	1,0	13,2	7,75
P20ME	3,0	81,4	28,00	P20ME	1,0	52,5	18,00	P16ME	4,0	17,5	8,75
P20MD	1,0	51,2	17,00	P20ME	2,0	53,95	21,00	P16MD	1,0	31,2	19,67
P20MD	5,0	115,1	45,00	P20MD	1,0	53,7	16,00	P16MD	3,0	27,6	15,00
				P20MD	5,0	72,6	18,00	P19	1,0	12,8	6,75
								P19	5,0	22,7	5,0
								P19ME	1,0	12,2	1,0
								P19ME	4,0	18,2	7,50
								P19MD	1,0	12,2	6,60
								P19MD	9,0	19,6	11,20

Legenda:

ME = Margem Esquerda

MD = Margem Direita

Fonte: Autor

Quadro 22 – Dados de turbidez e SS_C (Cenário 2 – C2)

27/01/2014				29/01/2014				20/03/2014			
Ponto	Prof.	CSSL	CSSv	Ponto	Prof.	CSSL	CSSv	Ponto	Prof.	CSSL	CSSv
	(m)	($\mu\text{L/L}$)	(mg/L)		(m)	($\mu\text{L/L}$)	(mg/L)		(m)	($\mu\text{L/L}$)	(mg/L)
P11	1,0	55,50	28,00	P01	1,0	70,70	42,00	P1	1,0	26,20	12,70
P14ME	1,0	70,20	34,00	P06	1,0	59,90	35,00	P1	7,0	63,80	27,30
P16	5,1	67,80	46,00	P12	1,0	59,50	27,00	P6	1,1	21,20	10,00
P16ME	5,0	56,00	37,00	P12	8,0	98,30	44,00	P8	1,0	31,00	14,00
P16MD	0,9	53,90	25,00	P16	1,0	52,70	30,00	P12	1,0	40,50	16,00
P16MD	3,9	72,00	38,00	P16	4,9	50,30	30,00	P12	8,0	51,10	25,00
P20	1,0	29,40	24,00	P16MD	2,0	47,60	25,00	P14	0,9	12,40	9,30
P20MD	1,0	28,10	17,00	P16ME	1,0	27,00	19,00	P16	1,0	38,90	20,00
P20MD	5,2	75,80	45,00	P20	1,1	27,90	19,00	P16	6,0	33,60	18,00
P20ME	1,0	33,30	22,00	P20ME	1,0	19,90	18,00	P19	1,0	16,20	6,80
P20ME	3,1	46,40	28,00	P20MD	1,0	23,50	16,00	P19	5,0	25,20	14,00
								P14ME	1,0	33,30	18,80
								P14ME	2,0	47,30	18,80
								P16MD	1,0	37,10	19,70
								P16ME	1,0	14,90	7,80
								P16ME	4,0	20,5	8,80
								P19MD	1,0	13,30	6,60
								P19MD	8,0	20,40	11,20
								P19ME	1,0	11,90	7,60
								P19ME	4,6	17,80	7,50

Legenda:

ME = Margem Esquerda

MD = Margem Direita

Fonte: Autor

A relação funcional entre Turbidez (NTU) *versus* SS_C (mg.L⁻¹) e SS_L ($\mu\text{L.L}^{-1}$) *versus* SS_C (mg.L⁻¹) é linear conforme descrito na seção 3.2.2 desta tese, portanto se testou a regressão linear para os dois cenários. Para isso, pares de dados foram organizados por data de amostragem, setor do reservatório ou considerando todos os pontos amostrados em dois cenários distintos.

O intuito dessa divisão foi justamente encontrar melhores resultados na relação, otimizando assim a realização dos testes programados na ferramenta desenvolvida. Os critérios de organização e separação dos dados estão apresentados nos Quadros 23 e 24, respectivamente, para os Cenários 1 e 2.

Quadro 23– Critérios de divisão dos dados de Turbidez e SS_C (Cenário 1)

Método de Organização dos dados para a Cenário 1		Legenda
Organização dos dados por data de amostragem	27/01/2014	C1-1A
	29/01/2014	C1-1B
	20/03/2014	C1-1C
Organização dos dados por setor do reservatório	Setor 1 (P1, P6, P8)	C1-2
	Setor 2 (P11, P12, P14)	
	Setor 3 (P16)	
	Setor 4 (P19 e P20)	
Organização dos dados considerando todos os pontos		C1-3

Fonte: Autor

Quadro 24 – Critérios de divisão dos dados de SS_L e SS_C (Cenário 2)

Método de Organização dos dados para a Cenário 2		Legenda
Organização por data de amostragem	27/01/2014	C2-1A
	29/01/2014	C2-1B
	20/03/2014	C2-1C
Organização por setor do reservatório	Setor 1 (P1, P6, P8)	C2-2
	Setor 2 (P11, P12, P14)	
	Setor 3 (P16)	
	Setor 4 (P19 e P20)	
Organização considerando todos os pontos		C2-3

Fonte: Autor

Destaca-se aqui que na organização dos dados por setor do reservatório se levou em consideração características como proximidade dos pontos, largura da seção e influências externas como as dragagens realizadas em alguns pontos do reservatório. O “Setor 1” se refere aos pontos do reservatório onde a concentração de sedimentos é maior pelo fato da velocidade do rio ser ainda relativamente alta, permitindo que areia, mesmo com maior granulometria, ainda esteja em suspensão.

Já o “Setor 2” está relacionado aos pontos do reservatório onde a atividade de dragagem gera influência na concentração de sedimentos em suspensão. É importante destacar que não é fixo o local de extração de areia, mas nos dias das medições, as atividades estavam ocorrendo com maior intensidade entre os pontos 10 e 14. Os pontos com maior largura de seção onde há redução da velocidade e consequente deposição do sedimento de maior granulometria foram englobados no “Setor 3”, sendo neste caso considerados todas as medições do ponto 16. Por fim, “Setor 4” é a região que apresenta velocidade mínima, às proximidades da barragem, onde se inicia a deposição de sedimentos finos como siltes e argilas.

Sendo assim, apresentam-se todas regressões lineares para cada critério de organização dos dados do Cenário 1. Na Figura 64 estão apresentadas as correlações por dia de amostragem. Nota-se que o cenário C1-1C apresentou melhores resultados com R^2 igual a 0,91, entretanto, um estudo mais aprofundado dos dados deve ser feito já que neste dia os valores de concentração foram inferiores aos outros dois dias. Logo, utilizar essa correlação poderá superestimar concentrações mais altas.

A relação linear do Cenário C1-1B apresentou coeficiente de determinação (R^2) aproximadamente igual a 0,11, considerado muito baixo. Neste caso, esse cenário foi desconsiderado dos testes estatísticos seguintes. Acredita-se que isso aconteceu devido a influência das dragagens que estavam mais intensas no dia 29/01, prejudicando alguns resultados principalmente entre os pontos 6 e 12.

Figura 64 – Correlações entre Turbidez e SS_C em relação ao dia de amostragem (Cenário 1)

Legenda: A) Cenário C1-1A; B) Cenário C1-1B; e C) Cenário C1-1C

Fonte: Autor

Na Figura 65 estão apresentadas as correlações para os setores do reservatório. Com exceção do setor 2 com R^2 aproximado de 0,77, os demais setores apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,87, consideradas correlações boas.

Por fim, a relação entre turbidez e SS_C considerando todos os pontos forneceu um R^2 igual a 0,79 (Figura 66). Comparando tais coeficientes de determinação com outros estudos, verifica-se valores bem próximos com os da literatura. Rügner et al. (2013) apresenta diferentes

estudos correlacionando concentração de sedimentos em suspensão e turbidez com R^2 superiores a 0,86. Já para Tomazoni et al. (2005), o R^2 variou entre 0,73 e 0,94, enquanto que no estudo de Daphne, Utumo e Keneth (2011) a relação entre turbidez e SS_C forneceu R^2 de aproximadamente 0,81.

Figura 65 - Correlações entre Turbidez e SS_C em relação ao setor do reservatório de Mogi-Guaçu (Cenário 1)

Legenda: A) Setor 1; B) Setor 2; C) Setor 3; e D) Setor 4
Fonte: Autor

Figura 66 – Correlações entre Turbidez e SS_C em relação ao setor do reservatório de Mogi-Guaçu (Cenário 1)

Fonte: Autor

O mesmo procedimento anterior foi aplicado para o Cenário 2. Nesse caso, tendo em vista que SS_L e SS_C possuem relação linear, sendo a densidade como fator de correlação, aplicou-se também regressão linear para as cinco situações distintas: Cenários C2-1A, C2-1B, C2-1C, C2-2 e C2-3.

Trabalhos como Czuba et al. (2015) e Williams, Walling e Leeks (2007) citam a maior segurança na aplicação de regressões lineares como método de estimativa da concentração de sedimentos em suspensão, justificando a aplicação desse procedimento. Como dito anteriormente, visa-se encontrar o melhor método de estimativa a partir de outro parâmetro, neste caso, a concentração volumétrica de sedimentos em suspensão, em $\mu L.L^{-1}$.

Conforme Figura 67, nas regressões lineares por data de amostragem, a medição do dia 20/03/2014 também apresentou melhor correlação com R^2 igual a 0,85, entretanto é duvidoso sua utilização justamente pela faixa de concentrações limitada.

Na Figura 68 são apresentadas as correlações para os setores do reservatório: Setor 1 (P01, P06 e P08), Setor 2 (P11, P12 e P14); Setor 3 (P16) e Setor 4 (P19 e P20). Novamente as correlações se apresentaram boas com coeficientes de determinação R^2 superiores a 0,89 em todos os setores. Por fim, correlacionando SS_L e SS_C considerando todos os pontos, obteve-se um coeficiente de determinação R^2 igual a 0,86 (Figura 69).

Figura 67 – Correlações entre SS_L e SS_C em relação ao dia de amostragem (Cenário 2)

Legenda: A) Cenário C2-1A; B) Cenário C2-1B; e C) Cenário C2-1C

Fonte: Autor

Figura 68 – Correlações entre SS_L e SS_C em relação ao setor do reservatório de Mogi-Guaçu (Cenário 2)

Legenda: A) Setor 1; B) Setor 2; C) Setor 3; e D) Setor 4

Fonte: Autor

Figura 69 – Correlações entre SS_L e SS_C em relação ao setor do reservatório de Mogi-Guaçu (Cenário 2)

Fonte: Autor

Dados resultados obtidos das regressões lineares, nos Quadros 25 e 26 é apresentado o resumo das equações de obtenção da concentração de sedimentos em suspensão estimados (SS_E) e coeficientes de determinação obtidos para cada um dos cenários propostos.

Quadro 25– Coeficientes de determinação (R^2) e as respectivas equações de cálculo do SS_E para o Cenário 1

Regressão linear aplicada para o Cenário 1		Legenda	R^2	Equação
Regressão por data de amostragem	27/01/2014	C1-1A	0,8158	$SS_E = 0,3760 \cdot \text{Turb} - 0,3916$
	29/01/2014	C1-1B	0,1025	$SS_E = 0,2975 \cdot \text{Turb} + 8,0640$
	20/03/2014	C1-1C	0,9067	$SS_E = 0,7026 \cdot \text{Turb} - 2,4640$
Regressão por setor do reservatório	Setor 1 (P1, P6, P8)	C1-2	0,9129	$SS_E = 0,5607 \cdot \text{Turb} + 1,5792$
	Setor 2 (P11, P12, P14)		0,7764	$SS_E = 0,3352 \cdot \text{Turb} + 7,9113$
	Setor 3 (P16)		0,8760	$SS_E = 0,2797 \cdot \text{Turb} + 8,2617$
	Setor 4 (P19 e P20)		0,9111	$SS_E = 0,3409 \cdot \text{Turb} + 1,7356$
Regressão considerando todos os pontos		C1-3	0,7900	$SS_E = 0,3179 \cdot \text{Turb} + 6,3009$

Fonte: Autor

Quadro 26 – Coeficientes de determinação (R^2) e as respectivas equações de obtenção de SS_E para o Cenário 2

Regressão linear aplicada para o Cenário 2		Legenda	R^2	Equação
Regressão por data de amostragem	27/01/2014	C2-1A	0,7333	$SS_E = 0,5752 \cdot SS_L$
	29/01/2014	C2-1B	0,7409	$SS_E = 0,5360 \cdot SS_L$
	20/03/2014	C2-1C	0,8490	$SS_E = 0,4772 \cdot SS_L$
Regressão por setor do reservatório	Setor 1 (P1, P6, P8)	C2-2	0,9063	$SS_E = 0,5278 \cdot SS_L$
	Setor 2 (P11, P12, P14)		0,9380	$SS_E = 0,4636 \cdot SS_L$
	Setor 3 (P16)		0,8947	$SS_E = 0,5224 \cdot SS_L$
	Setor 4 (P19 e P20)		0,9233	$SS_E = 0,6277 \cdot SS_L$
Regressão considerando todos os pontos		C2-3	0,8589	$SS_E = 0,5377 \cdot SS_L$

Fonte: Autor

Com base nessas informações, as concentrações de sedimentos em suspensão estimadas (SS_E) foram calculadas para cada um dos cenários. Para complementar a avaliação desses resultados, a concentração de sedimentos em suspensão medido (SS_C) está classificada em ordem crescente. Esses quadros foram apresentados justamente para ilustrar as diferenças de estimativas entre os cenários.

Além disso, antes da aplicação de qualquer teste estatístico nos dados de concentração de sedimentos em suspensão medido e estimados para cada um dos cenários, deve-se validar as regressões lineares. Para isso, foi necessário a obtenção dos resíduos de cada estimativa, ou seja, a diferença entre SS_C e SS_E . Sendo assim, a partir desses dados apresentados nos Quadros 27 e 28, pôde-se iniciar os testes estatísticos na Ferramenta Computacional NH *Sediment and Statistic*.

Quadro 27 – Dados medidos e estimados de concentração de sedimentos em suspensão e os respectivos resíduos para o Cenário 1

N.	Data	Ponto	Prof. (m)	Turb. (NTU)	Concentração de sólidos suspensos (mg.L ⁻¹)					Resíduos = SS _C – SS _E			
					MEDIDO (SS _C)	ESTIMADO (SS _E)				R-C1-1A	R-C1-1C	R-C1-2	R-C1-3
						C1-1A	C1-1C	C1-2	C1-3				
1	20/03/2014	P19MD	1,0	12,20	6,6	4,2	6,1	5,9	10,2	2,4	0,5	0,7	-3,6
2	20/03/2014	P19	1,0	12,80	6,8	4,4	6,5	6,1	10,4	2,3	0,2	0,7	-3,6
3	20/03/2014	P19ME	4,0	18,20	7,5	6,5	10,3	7,9	12,1	1,0	-2,8	-0,4	-4,6
4	20/03/2014	P19ME	1,0	12,20	7,6	4,2	6,1	5,9	10,2	3,4	1,5	1,7	-2,6
5	20/03/2014	P16ME	1,0	13,20	7,8	4,6	6,8	12,0	10,5	3,2	0,9	-4,2	-2,7
6	20/03/2014	P16ME	4,0	17,50	8,8	6,2	9,8	13,2	11,9	2,6	-1,1	-4,4	-3,1
7	20/03/2014	P14MD	1,0	17,30	9,3	6,1	9,7	13,7	11,8	3,2	-0,4	-4,4	-2,5
8	20/03/2014	P6	1,0	19,10	10,0	6,8	11,0	12,3	12,4	3,2	-1,0	-2,3	-2,4
9	20/03/2014	P19MD	9,0	19,60	11,2	7,0	11,3	8,4	12,5	4,2	-0,1	2,8	-1,3
10	20/03/2014	P1	1,0	22,90	12,7	8,2	13,6	14,4	13,6	4,5	-1,0	-1,7	-0,9
11	20/03/2014	P8	1,0	21,80	14,0	7,8	12,9	13,8	13,2	6,2	1,1	0,2	0,8
12	20/03/2014	P19	5,0	22,70	14,0	8,1	13,5	9,5	13,5	5,9	0,5	4,5	0,5
13	20/03/2014	P16MD	3,0	27,60	15,0	10,0	16,9	16,0	15,1	5,0	-1,9	-1,0	-0,1
14	20/03/2014	P12	1,0	26,35	16,0	9,5	16,0	16,7	14,7	6,5	0,0	-0,7	1,3
15	29/01/2014	P20MD	1,0	53,70	16,0	19,8	35,3	20,0	23,4	-3,8	-19,3	-4,0	-7,4
16	27/01/2014	P20MD	1,0	51,20	17,0	18,9	33,5	19,2	22,6	-1,9	-16,5	-2,2	-5,6
17	20/03/2014	P16	6,0	28,90	18,0	10,5	17,8	16,3	15,5	7,5	0,2	1,7	2,5
18	29/01/2014	P20ME	1,0	52,50	18,0	19,3	34,4	19,6	23,0	-1,3	-16,4	-1,6	-5,0
19	29/01/2014	P20MD	5,0	72,60	18,0	26,9	48,5	26,5	29,4	-8,9	-30,5	-8,5	-11,4
20	20/03/2014	P14ME	1,0	29,10	18,8	10,6	18,0	17,7	15,6	8,2	0,8	1,1	3,2
21	20/03/2014	P14ME	2,0	35,20	18,8	12,8	22,3	19,7	17,5	6,0	-3,5	-0,9	1,3
22	29/01/2014	P16ME	1,0	56,45	19,0	20,8	37,2	24,1	24,2	-1,8	-18,2	-5,1	-5,2
23	29/01/2014	P20	1,0	54,30	19,0	20,0	35,7	20,2	23,6	-1,0	-16,7	-1,2	-4,6
24	20/03/2014	P16MD	1,0	31,20	19,7	11,3	19,5	17,0	16,2	8,3	0,2	2,7	3,5
25	20/03/2014	P16	1,0	30,40	20,0	11,0	18,9	16,8	16,0	9,0	1,1	3,2	4,0
26	20/03/2014	P6	7,0	34,65	21,0	12,6	21,9	21,0	17,3	8,4	-0,9	0,0	3,7
27	29/01/2014	P16ME	6,0	68,10	21,0	25,2	45,4	27,3	27,9	-4,2	-24,4	-6,3	-6,9
28	29/01/2014	P20ME	2,0	53,95	21,0	19,9	35,4	20,1	23,5	1,1	-14,4	0,9	-2,5
29	27/01/2014	P20ME	1,0	60,45	22,0	22,3	40,0	22,3	25,5	-0,3	-18,0	-0,3	-3,5
30	27/01/2014	P20	1,0	56,45	24,0	20,8	37,2	21,0	24,2	3,2	-13,2	3,0	-0,2

N.	Data	Ponto	Prof. (m)	Turb. (NTU)	Concentração de sólidos suspensos (mg.L ⁻¹)					Resíduos = SS _C - SS _E			
					MEDIDO (SS _C)	ESTIMADO (SS _E)				R-C1-1A	R-C1-1C	R-C1-2	R-C1-3
						C1-1A	C1-1C	C1-2	C1-3				
31	20/03/2014	P12	8,0	40,00	25,0	14,6	25,6	21,3	19,0	10,4	-0,6	3,7	6,0
32	29/01/2014	P16MD	1,0	54,90	25,0	20,3	36,1	23,6	23,8	4,7	-11,1	1,4	1,2
33	29/01/2014	P16MD	2,0	55,60	25,0	20,5	36,6	23,8	24,0	4,5	-11,6	1,2	1,0
34	29/01/2014	P20	9,0	84,90	26,0	31,5	57,2	30,7	33,3	-5,5	-31,2	-4,7	-7,3
35	29/01/2014	P12	1,0	58,90	27,0	21,8	38,9	27,7	25,0	5,2	-11,9	-0,7	2,0
36	20/03/2014	P1	7,0	33,60	27,3	12,2	21,1	20,4	17,0	15,1	6,2	6,9	10,3
37	27/01/2014	P11	1,0	81,50	28,0	30,3	54,8	35,2	32,2	-2,3	-26,8	-7,2	-4,2
38	27/01/2014	P20ME	3,0	81,40	28,0	30,2	54,7	29,5	32,2	-2,2	-26,7	-1,5	-4,2
39	29/01/2014	P8	1,0	55,90	29,0	20,6	36,8	32,9	24,1	8,4	-7,8	-3,9	4,9
40	29/01/2014	P16	1,0	56,45	30,0	20,8	37,2	24,1	24,2	9,2	-7,2	5,9	5,8
41	29/01/2014	P16	5,0	54,90	30,0	20,3	36,1	23,6	23,8	9,7	-6,1	6,4	6,2
42	27/01/2014	P14ME	1,0	103,15	34,0	38,4	70,0	42,5	39,1	-4,4	-36,0	-8,5	-5,1
43	27/01/2014	P16ME	1,0	87,50	34,0	32,5	59,0	32,7	34,1	1,5	-25,0	1,3	-0,1
44	29/01/2014	P6	1,0	62,35	35,0	23,1	41,3	36,5	26,1	11,9	-6,3	-1,5	8,9
45	27/01/2014	P16MD	1,0	105,30	36,0	39,2	71,5	37,7	39,8	-3,2	-35,5	-1,7	-3,8
46	27/01/2014	P16ME	5,0	111,00	37,0	41,3	75,5	39,3	41,6	-4,3	-38,5	-2,3	-4,6
47	27/01/2014	P16MD	4,0	118,80	38,0	44,3	81,0	41,5	44,1	-6,3	-43,0	-3,5	-6,1
48	27/01/2014	P11	7,0	93,90	39,0	34,9	63,5	39,4	36,2	4,1	-24,5	-0,4	2,8
49	27/01/2014	P16	1,0	110,00	39,0	41,0	74,8	39,0	41,3	-2,0	-35,8	0,0	-2,3
50	29/01/2014	P1	1,0	67,80	42,0	25,1	45,2	39,6	27,9	16,9	-3,2	2,4	14,1
51	29/01/2014	P12	8,0	71,60	44,0	26,5	47,8	31,9	29,1	17,5	-3,8	12,1	14,9
52	27/01/2014	P20MD	5,0	115,10	45,0	42,9	78,4	41,0	42,9	2,1	-33,4	4,0	2,1
53	27/01/2014	P16	5,0	118,00	46,0	44,0	80,4	41,3	43,8	2,0	-34,4	4,7	2,2
54	27/01/2014	P14MD	1,0	104,90	49,0	39,1	71,2	43,1	39,6	9,9	-22,2	5,9	9,4
55	27/01/2014	P20	9,0	123,35	50,0	46,0	84,2	43,8	45,5	4,0	-34,2	6,2	4,5

Fonte: Autor

Quadro 28 – Comparação dos dados medidos e estimados de concentração de sedimentos em suspensão para o Cenário 2

N.	Data	Ponto	Prof. (m)	SS _L (μL.L ⁻¹)	Concentração de sólidos suspensos (mg.L ⁻¹)						Resíduos = SS _C – SS _E				
					MEDIDO (SS _C)	ESTIMADO (SS _E)					R-C2-1A	R-C2-1B	R-C2-1C	R-C2-2	R-C2-3
						C2-1A	C2-1B	C2-1C	C2-2	C2-3					
1	20/03/2014	P19MD	1,0	13,3	6,6	7,7	7,1	6,3	8,3	7,2	-1,05	-0,53	0,25	-1,75	-0,55
2	20/03/2014	P19	1,0	16,2	6,8	9,3	8,7	7,7	10,2	8,7	-2,52	-1,88	-0,93	-3,37	-1,91
3	20/03/2014	P19ME	1,0	11,9	6,8	6,8	6,4	5,7	7,5	6,4	-0,04	0,42	1,12	-0,67	0,40
4	20/03/2014	P16ME	1,0	14,9	7,8	8,6	8,0	7,1	7,8	8,0	-0,77	-0,19	0,69	0,02	-0,21
5	20/03/2014	P16ME	4,0	20,5	8,8	11,8	11,0	9,8	10,7	11,0	-2,99	-2,19	-0,98	-1,91	-2,22
6	20/03/2014	P14	0,9	12,4	9,3	7,1	6,6	5,9	5,7	6,7	2,17	2,65	3,38	3,55	2,63
7	20/03/2014	P6	1,1	21,2	10,0	12,2	11,4	10,1	11,2	11,4	-2,19	-1,36	-0,12	-1,19	-1,40
8	20/03/2014	P19MD	8,0	20,4	11,2	11,7	10,9	9,7	12,8	11,0	-0,53	0,27	1,47	-1,61	0,23
9	20/03/2014	P1	1,0	26,2	12,7	15,1	14,0	12,5	13,8	14,1	-2,37	-1,34	0,20	-1,13	-1,39
10	20/03/2014	P19	5,0	25,2	14,0	14,5	13,5	12,0	15,8	13,6	-0,50	0,49	1,97	-1,82	0,45
11	20/03/2014	P19ME	4,6	17,8	14,0	10,2	9,5	8,5	11,2	9,6	3,76	4,46	5,51	2,83	4,43
12	20/03/2014	P8	1,0	31,0	14,0	17,8	16,6	14,8	16,4	16,7	-3,83	-2,62	-0,79	-2,36	-2,67
13	20/03/2014	P12	1,0	40,5	16,0	23,3	21,7	19,3	18,8	21,8	-7,30	-5,71	-3,33	-2,78	-5,78
14	29/01/2014	P20MD	1,0	23,5	16,0	13,5	12,6	11,2	14,8	12,6	2,48	3,40	4,79	1,25	3,36
15	27/01/2014	P20MD	1,0	28,1	17,0	16,2	15,1	13,4	17,6	15,1	0,84	1,94	3,59	-0,64	1,89
16	20/03/2014	P16	6,0	33,6	18,0	19,3	18,0	16,0	17,6	18,1	-1,33	-0,01	1,97	0,45	-0,07
17	29/01/2014	P20ME	1,0	19,9	18,0	11,4	10,7	9,5	12,5	10,7	6,55	7,33	8,50	5,51	7,30
18	20/03/2014	P14ME	1,0	33,3	18,8	19,2	17,8	15,9	15,4	17,9	-0,35	0,95	2,91	3,36	0,89
19	20/03/2014	P14ME	2,0	47,3	18,8	27,2	25,4	22,6	21,9	25,4	-8,41	-6,55	-3,77	-3,13	-6,63
20	29/01/2014	P16ME	1,0	27,0	19,0	15,5	14,5	12,9	14,1	14,5	3,47	4,53	6,12	4,90	4,48
21	29/01/2014	P20	1,1	27,9	19,0	16,0	15,0	13,3	17,5	15,0	2,95	4,05	5,69	1,49	4,00
22	20/03/2014	P16MD	1,0	37,1	19,7	21,3	19,9	17,7	19,4	19,9	-1,64	-0,19	2,00	0,32	-0,25
23	20/03/2014	P16	1,0	38,9	20,0	22,4	20,9	18,6	20,3	20,9	-2,38	-0,85	1,44	-0,32	-0,92
24	27/01/2014	P20ME	1,0	33,3	22,0	19,2	17,8	15,9	20,9	17,9	2,85	4,15	6,11	1,10	4,09
25	27/01/2014	P20	1,0	29,4	24,0	16,9	15,8	14,0	18,5	15,8	7,09	8,24	9,97	5,55	8,19
26	20/03/2014	P12	8,0	51,1	25,0	29,4	27,4	24,4	23,7	27,5	-4,39	-2,39	0,62	1,31	-2,48
27	29/01/2014	P16MD	2,0	47,6	25,0	27,4	25,5	22,7	24,9	25,6	-2,38	-0,51	2,29	0,13	-0,59
28	29/01/2014	P16MD	0,9	53,9	25,0	31,0	28,9	25,7	28,2	29,0	-6,00	-3,89	-0,72	-3,16	-3,98
29	29/01/2014	P12	1,0	59,5	27,0	34,2	31,9	28,4	27,6	32,0	-7,22	-4,89	-1,39	-0,58	-4,99
30	20/03/2014	P1	7,0	63,8	27,3	36,7	34,2	30,4	33,7	34,3	-9,40	-6,90	-3,15	-6,37	-7,01

N.	Data	Ponto	Prof. (m)	SSL (µL.L ⁻¹)	Concentração de sólidos suspensos (mg.L ⁻¹)						Resíduos = SS _C – SS _E				
					MEDIDO (SS _C)	ESTIMADO (SS _E)									
						C2-1A	C2-1B	C2-1C	C2-2	C2-3	R-C2-1A	R-C2-1B	R-C2-1C	R-C2-2	R-C2-3
31	27/01/2014	P11	1,0	55,5	28,0	31,9	29,7	26,5	25,7	29,8	-3,92	-1,75	1,52	2,27	-1,84
32	27/01/2014	P20ME	3,1	46,4	28,0	26,7	24,9	22,1	29,1	24,9	1,31	3,13	5,86	-1,13	3,05
33	29/01/2014	P16	1,0	52,7	30,0	30,3	28,2	25,1	27,5	28,3	-0,31	1,75	4,85	2,47	1,66
34	29/01/2014	P16	4,9	50,3	30,0	28,9	27,0	24,0	26,3	27,0	1,07	3,04	6,00	3,72	2,95
35	27/01/2014	P14ME	1,0	70,2	34,0	40,4	37,6	33,5	32,5	37,7	-6,38	-3,63	0,50	1,46	-3,75
36	29/01/2014	P06	1,0	59,9	35,0	34,5	32,1	28,6	31,6	32,2	0,55	2,89	6,42	3,38	2,79
37	27/01/2014	P16ME	5,0	56,0	37,0	32,2	30,0	26,7	29,3	30,1	4,79	6,98	10,28	7,75	6,89
38	27/01/2014	P16MD	3,9	72,0	38,0	41,4	38,6	34,4	37,6	38,7	-3,41	-0,59	3,64	0,39	-0,71
39	29/01/2014	P01	1,0	70,7	42,0	40,7	37,9	33,7	37,3	38,0	1,33	4,10	8,26	4,68	3,98
40	29/01/2014	P12	8,0	98,3	44,0	56,5	52,7	46,9	45,6	52,9	-12,54	-8,69	-2,91	-1,57	-8,86
41	27/01/2014	P20MD	5,2	75,8	45,0	43,6	40,6	36,2	47,6	40,8	1,40	4,37	8,83	-2,58	4,24
42	27/01/2014	P16	5,1	67,8	46,0	39,0	36,3	32,4	35,4	36,5	7,00	9,66	13,65	10,58	9,54

Fonte: Autor

5.2.3. Teste Kolmogorov-Smirnov para Normalidade dos Resíduos

Na Figura 70 está apresentada a tela da ferramenta computacional NHSS para realização do teste de normalidade dos dados destacando o painel de controle. Nela o usuário insere os dados que se deseja testar normalidade, seleciona o nível de significância, obtendo como resultados principais o valor da estatística Kolmogorov-Smirnov (KS), o p-valor e a conclusão para o teste, ou seja, conjunto de dados Normal ou Não-Normal.

Figura 70 – Tela para realização do teste Kolmogorov-Smirnov para normalidade destacando a área com os resultados

Teste de Normalidade (Kolmogorov-Smirnov)

Dados de entrada

Nível de significância
☐ 0,10 ☐ 0,05 ☐ 0,01

Comandos principais
 Ok
 Limpar Tela
 Voltar

Resultados
 Estatística Dn
 P-valor
 Conclusão

Resultados Preliminares

n	Dados ordenados	Fn (x) empírico	F(x)	$D^+ = F(x_{(i)}) - F_n(x_{(i)}) $	$D^- = F(x_{(i)}) - F_n(x_{(i-1)}) $	Dn	Dcrit
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							
30							
31							

Resultados
 Estatística Dn
 P-valor
 Conclusão

Fonte: Autor

Cabe destacar que a seguir serão apresentados apenas os resultados das simulações da ferramenta, logo, o código da programação para tal teste se encontra no Anexo I.

Após a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão para cada cenário, foi necessário aplicar a análise dos resíduos para que as suposições do modelo linear ajustado seja validado e forneça resultados confiáveis. Para isso, o teste de normalidade foi aplicado para cada um dos conjuntos de dados de resíduos: R-C1-1A, R-C1-1C, R-C1-2 e R-C1-3 para o cenário 1, e R-C2-1A, R-C2-1B, R-C2-1C, R-C2-2, R-C2-3 para o cenário 2.

As Figuras 71 e 72 mostram a tela com os resultados do teste de normalidade com 95% de confiança (ou 5% de significância), respectivamente aos resíduos R-C1-1A, R-C2-1A.

Figura 71 – Teste de Normalidade aplicado aos Resíduos R-C1-1A destacando os principais resultados da Ferramenta NHSS

Teste de Normalidade (Kolmogorov-Smirnov)		Resultados Preliminares							
Dados de entrada	Nível de significância ● 0,10 ● 0,05 ● 0,01	n	Dados ordenados	Fn (x) empírico	F(x)	D ⁺ = F (x _(i)) - Fn (x _(i))	D ⁻ = F (x _(i)) - Fn (x _(i-1))	Dn	Dcrit
2,404		1	-8,91	0,01818	0,01543	0,00276	0,01543	0,05800	0,1195
2,329		2	-6,28	0,03636	0,04465	0,00829	0,02647		
1,048		3	-5,53	0,05455	0,05838	0,00384	0,02202		
3,404		4	-4,39	0,07273	0,08544	0,01271	0,03089		
3,178		5	-4,34	0,09091	0,08677	0,00414	0,01404		
2,562		6	-4,21	0,10909	0,09043	0,01866	0,00048		
3,217		7	-3,80	0,12727	0,10283	0,02444	0,00626		
3,210		8	-3,20	0,14545	0,12284	0,02261	0,00443		
4,222		9	-2,25	0,16364	0,15989	0,00375	0,01444		
4,451		10	-2,21	0,18182	0,16150	0,02032	0,00214		
6,195		11	-1,97	0,20000	0,17227	0,02773	0,00954		
5,856		12	-1,86	0,21818	0,17718	0,04101	0,02282		
5,014		13	-1,83	0,23636	0,17836	0,05800	0,03982		
6,484		14	-1,35	0,25455	0,20137	0,05318	0,03500		
-3,800		15	-1,03	0,27273	0,21764	0,05509	0,03691		
-1,860		16	-0,34	0,29091	0,25466	0,03625	0,01807		
7,525		17	1,05	0,30909	0,33819	0,02910	0,04728		
-1,348		18	1,11	0,32727	0,34191	0,01464	0,03282		
-8,906		19	1,49	0,345	0,36698	0,02152	0,03971		
8,200		20	2,02	0,364	0,40254	0,03890	0,05708		
5,956		21	2,11	0,382	0,40867	0,02685	0,04503		
-1,834		22	2,33	0,400	0,42333	0,02333	0,04151		
-1,025		23	2,40	0,418	0,42851	0,01033	0,02851		
8,330		24	2,56	0,436	0,43933	0,00297	0,02115		
8,961		25	3,17	0,455	0,48132	0,02677	0,04495		
8,363		26	3,18	0,473	0,48215	0,00943	0,02761		
-4,214		27	3,21	0,491	0,48436	0,00655	0,01163		
1,106		28	3,22	0,509	0,48483	0,02426	0,00608		
-0,338		29	3,40	0,527	0,49792	0,02935	0,01117		
3,166		30	4,01	0,545	0,54026	0,00519	0,01299		
10,352		31	4,09	0,564	0,54534	0,01829	0,00011		
4,749		32	4,22	0,582	0,55481	0,02700	0,00882		
4,486		33	4,45	0,600	0,57061	0,02939	0,01121		
-5,531		34	4,49	0,618	0,57300	0,04518	0,02700		
5,245		35	4,75	0,636	0,59098	0,04538	0,02720		
15,088		36	5,01	0,655	0,60888	0,04567	0,02748		
-2,252		37	5,25	0,673	0,62432	0,04841	0,03022		
-2,215		38	5,86	0,691	0,66414	0,02677	0,00859		
8,373		39	5,96	0,709	0,67049	0,03860	0,02041		
9,166		40	6,19	0,727	0,68545	0,04182	0,02364		
9,749		41	6,48	0,745	0,70319	0,04227	0,02409		
-4,393		42	7,53	0,764	0,76293	0,00071	0,01747		
1,492		43	8,20	0,782	0,79781	0,01599	0,03417		
11,948		44	8,33	0,800	0,80417	0,00417	0,02236		
-3,201		45	8,36	0,818	0,80576	0,01242	0,00576		
-4,344		46	8,37	0,836	0,80624	0,03013	0,01194		
-6,277		47	8,96	0,855	0,83323	0,02132	0,00314		
4,085		48	9,17	0,873	0,84204	0,03068	0,01250		
-1,968		49	9,75	0,891	0,86539	0,02552	0,00734		
16,899		50	9,95	0,909	0,87283	0,03627	0,01808		
17,470		51	10,35	0,927	0,88691	0,04036	0,02218		
2,114		52	11,95	0,945	0,93183	0,01363	0,00456		
2,024		53	15,09	0,964	0,97927	0,01563	0,03382		
9,949		54	16,90	0,982	0,99076	0,00894	0,02712		
4,012		55	17,47	1,000	0,99297	0,00703	0,01115		

Fonte: Autor

Figura 72 – Teste de Normalidade aplicado aos Resíduos R-C2-1A destacando os principais resultados da Ferramenta NHSS

Fonte: Autor

Pôde-se observar que os testes de normalidade dos resíduos R-C1-1A e R-C2-1A apresentaram p-valores de 0,9900 e 0,9936, respectivamente. Os valores são superiores ao nível de significância de 0,05, logo, não se rejeita a hipótese nula de normalidade dos dados em ambos os casos. Cabe destacar que, caso o usuário opte por não usar o p-valor para levantar conclusões sobre o teste, tem-se a opção de comparar a estatística D_n com o valor crítico para o nível de significância (D_{crit}), valor esse tabelado (Tabela 9, p.117). Para esses casos, se $D_n > D_{crit}$, há evidências para rejeição da hipótese nula, ou seja, rejeita-se a hipótese de normalidade dos dados.

Também estão exemplificados os resultados do teste de normalidade para o conjunto de dados do Resíduo R-C1-1C e do Resíduo R-C2-1C, apresentados respectivamente nas Figuras 73 e 74.

Figura 73 – Teste de Normalidade aplicado aos Resíduos R-C1-1C destacando os principais resultados da Ferramenta NHSS

Teste de Normalidade (Kolmogorov-Smirnov)

Dados de entrada

Nível de significância
☐ 0,10 ☐ 0,05 ☐ 0,01

Comandos principais
 Ok
 Limpar Tela
 Voltar

Resultados
 Estatística D_n 0,1801
 P-valor 1,25E-05
 Conclusão NÃO-NORMAL

Resultados Preliminares

n	Dados ordenados	F _n (x) empírico	F(x)	$D^+ = F(x_{(n)}) - F_n(x_{(n)}) $	$D^- = F(x_{(n)}) - F_n(x_{(n-1)}) $	D_n	Dcrit
1	-43,00	0,01818	0,01397	0,00421	0,01397	0,18010	0,1195
2	-38,50	0,03636	0,03070	0,00567	0,01252		
3	-36,00	0,05455	0,04564	0,00891	0,00928		
4	-35,80	0,07273	0,04705	0,02568	0,00749		
5	-35,50	0,09091	0,04924	0,04167	0,02349		
6	-34,40	0,10909	0,05795	0,05114	0,03296		
7	-34,20	0,12727	0,05965	0,06762	0,04944		
8	-33,40	0,14545	0,06688	0,07858	0,06040		
9	-31,20	0,16364	0,09023	0,07341	0,05522		
10	-30,50	0,18182	0,09881	0,08301	0,06483		
11	-26,80	0,20000	0,15408	0,04592	0,02774		
12	-26,70	0,21818	0,15581	0,06237	0,04419		
13	-25,00	0,23636	0,18725	0,04912	0,03093		
14	-24,50	0,25455	0,19719	0,05735	0,03917		
15	-24,40	0,27273	0,19922	0,07351	0,05533		
16	-22,20	0,29091	0,24690	0,04401	0,02583		
17	-19,30	0,30909	0,31803	0,00894	0,02712		
18	-18,20	0,32727	0,34710	0,01983	0,03801		
19	-18,00	0,345	0,35249	0,00704	0,02522		
20	-16,70	0,364	0,38821	0,02457	0,04276		
21	-16,50	0,382	0,39380	0,01198	0,03016		
22	-16,40	0,400	0,39660	0,00340	0,01478		
23	-14,40	0,418	0,45359	0,03541	0,05359		
24	-13,20	0,436	0,48833	0,05197	0,07015		

Obs.: Tela recortada para destacar apenas os resultados

Fonte: Autor

Figura 74 – Teste de Normalidade aplicado aos Resíduos R-C2-1C destacando os principais resultados da Ferramenta NHSS

Teste de Normalidade (Kolmogorov-Smirnov)

Dados de entrada

Nível de significância
☐ 0,10 ☐ 0,05 ☐ 0,01

Comandos principais
 Ok
 Limpar Tela
 Voltar

Resultados
 Estatística D_n 0,11338
 P-valor 0,1931
 Conclusão NORMAL

Resultados Preliminares

n	Dados ordenados	F _n (x) empírico	F(x)	$D^+ = F(x_{(n)}) - F_n(x_{(n)}) $	$D^- = F(x_{(n)}) - F_n(x_{(n-1)}) $	D_n	Dcrit
1	-3,77	0,02381	0,04911	0,02530	0,04911	0,11338	0,1367
2	-3,33	0,04762	0,06137	0,01375	0,03756		
3	-3,15	0,07143	0,06699	0,00443	0,01937		
4	-2,91	0,09524	0,07493	0,02031	0,00350		
5	-1,39	0,11905	0,14342	0,02438	0,04819		
6	-0,98	0,14286	0,16767	0,02481	0,04862		
7	-0,93	0,16667	0,17091	0,00425	0,02806		
8	-0,79	0,19048	0,17969	0,01079	0,01302		
9	-0,72	0,21429	0,18440	0,02988	0,00607		
10	-0,12	0,23810	0,22688	0,01121	0,01260		
11	0,20	0,26190	0,25097	0,01094	0,01287		
12	0,25	0,28571	0,25539	0,03033	0,00652		
13	0,50	0,30952	0,27544	0,03408	0,01027		
14	0,62	0,33333	0,28499	0,04835	0,02454		
15	0,69	0,35714	0,29129	0,06586	0,04205		
16	1,12	0,38095	0,32894	0,05201	0,02820		
17	1,44	0,40476	0,35765	0,04711	0,02330		
18	1,47	0,42857	0,36026	0,06831	0,04450		
19	1,52	0,452	0,36493	0,08746	0,06365		
20	1,97	0,476	0,40757	0,06862	0,04481		
21	1,97	0,500	0,40838	0,09162	0,06781		
22	2,00	0,524	0,41043	0,11338	0,08957		
23	2,29	0,548	0,43848	0,10914	0,08533		
24	2,91	0,571	0,49983	0,07160	0,04779		

Obs.: Tela editada para destacar apenas os resultados

Fonte: Autor

Para o teste KS do resíduo R-C1-1C, verificou-se o valor da estatística D_n de 0,1801. Sabendo que valor crítico para $n=55$ e $\alpha=0,05$ é $D_{crit}=0,1195$, e que $D_n > D_{crit}$, pôde-se concluir que os tais resíduos não seguem distribuição normal. Além disso, temos que o p-valor aproximadamente igual a zero, sendo inferior ao nível de significância de 0,05. Logo, temos absoluta certeza da não-normalidade desses resíduos. Já para o teste do resíduo R-C2-1C, de acordo com os resultados fornecidos pela ferramenta, com p-valor igual a 0,1931 superior ao nível de significância de 0,05, temos evidências da normalidade desses resíduos.

Devido a quantidade de simulações realizadas, está sintetizado na Tabela 19 todos os resultados do teste de normalidade para os resíduos anteriormente apresentados.

Tabela 19 – Resultados do Teste Kolmogorov-Smirnov para normalidade dos Resíduos

Cenário	Resíduos testados	Resultados da Ferramenta NHSS para o teste de Normalidade			
		Estatística KS (Dn)	Valor crit (Dcrit)	p-valor	Conclusão
C1	R-C1-1A	0,0578	0,1195	0,9182	Normal
	R-C1-1C	0,1801	0,1195	1,25E-05	Não-normal
	R-C1-2	0,0663	0,1195	0,7921	Normal
	R-C1-3	0,1177	0,1195	0,0554	Normal
C2	R-C2-1A	0,0837	0,1367	0,9936	Normal
	R-C2-1B	0,0748	0,1367	0,9917	Normal
	R-C2-1C	0,1134	0,1367	0,1929	Normal
	R-C2-2	0,1048	0,1367	0,2876	Normal
	R-C2-3	0,0723	0,1367	0,9912	Normal

Fonte: Autor

Com exceção dos resíduos R-C1-1C, todos apresentaram distribuição não-normal. Logo, a regressão linear obtida do cenário C1-1C (regressão considerando os dados de 20/03/2014) não é válida, ou seja, não é apropriada para os testes seguintes. Então, com base nesses resultados, o cenário C1-1C foi desconsiderado. Nessas situações, pode-se transformar os dados por meio de normalizações logarítmicas, angulares, hiperbólicas de primeiro grau, entre outros, buscando formas de obter com um conjunto de dados normais. Entretanto, não é o objetivo deste trabalho e não será abordada nesta tese.

5.2.4. Teste Kolmogorov-Smirnov para Normalidade dos dados de concentração de sedimentos em suspensão medidos (SS_C) e estimados (SS_E)

Após a verificação da validade das regressões lineares anteriormente apresentadas, pôde-se iniciar o procedimento de comparação dos valores de concentração de sedimentos em suspensão medidos (SS_C) com os estimados (SS_E). Para isso, foi necessário a avaliação da normalidade dos SS_E obtidos para cada um dos cenários válidos, e seus respectivos SS_C. Sendo assim, nas Figuras 75 e 76 estão apresentados os resultados da normalidade, respectivamente, dos dados de SS_C para o Cenário 1 e SS_C para o Cenário 2.

Figura 75 – Teste de normalidade aplicado ao SS_C do Cenário 1 destacando os resultados obtidos na Ferramenta NHSS

Fonte: Autor

Podemos verificar que os dados de SS_C do Cenário 1 seguem distribuição normal já que o p-valor obtido de 0,0768 é superior ao nível de significância aplicado de 0,05. Além disso, D_n é inferior ao D_{crit}, corroborando com a afirmação anterior. Em relação aos dados de SS_C do Cenário 2, também ficou evidenciado distribuição normal pelos mesmos motivos: p-valor maior que o nível de significância e D_n menor que o valor crítico D_{crit}.

Os testes de normalidade realizados com a Ferramenta Computacional NHSS para todos os dados estimados e medidos de concentração de sedimentos em suspensão estão sintetizados na Tabela 20, mostrando os p-valores, valores de estatística D_n e valores críticos para todos os testes realizados para ambos os cenários.

Figura 76 – Teste de normalidade aplicado ao SS_C do Cenário 2 destacando os resultados obtidos na Ferramenta NHSS

Fonte: Autor

Tabela 20 – Resultados do Teste Kolmogorov-Smirnov para normalidade dos dados de concentração de sedimentos em suspensão medidos e estimados

Cenário	Dados testados	Resultados da Ferramenta NHSS para o teste de Normalidade			
		Estatística KS (D)	Valor crit (Dcrit)	p-valor	Conclusão
C1	SS _C C1	0,1139	0,1195	0,0726	Normal
	SS _E C1-1A	0,1191	0,1195	0,0501	Normal
	SS _E C1-2	0,1208	0,1195	0,0440	Não-Normal
	SS _E C1-3	0,1190	0,1195	0,0503	Normal
C2	SS _C C2	0,1283	0,1367	0,0837	Normal
	SS _E C2-1A	0,1301	0,1367	0,0742	Normal
	SS _E C2-1B	0,1301	0,1367	0,0742	Normal
	SS _E C2-1C	0,1301	0,1367	0,0742	Normal
	SS _E C2-2	0,1062	0,1367	0,2703	Normal
	SS _E C2-3	0,1301	0,1367	0,0742	Normal

Fonte: Autor

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que a maioria dos conjuntos de dados apresentam distribuição normal. Esta distribuição é uma das mais importantes na inferência

estatística, possuindo como características a curva simétrica em relação ao eixo vertical passando pela média μ , desvio-padrão σ e a moda em $x=\mu$, além de servir de aproximação para o cálculo de outras distribuições.

Para Nascimento et al. (2015), a normalidade dos dados é uma das suposições utilizadas para determinar que tipo de teste estatístico será empregado, e muitos dos procedimentos estatísticos são testes paramétricos, os quais requerem que os dados sejam retirados de uma população normalmente distribuída. Afinal, a utilização de um teste paramétrico quando os dados apresentam distribuição não-normal pode levar a resultados não apropriados.

Além disso, verificou-se que apenas o conjunto de dados SS_E do cenário C1-2 (estimados a partir das equações por setor do reservatório) apresentou distribuição não-normal devido seu p-valor ser inferior ao nível de significância. Dados que não se revelem aderentes à distribuição normal devem ser tratados com cautela. Sendo assim, com base nesses resultados, pôde-se definir os caminhos estatísticos a se adotar para comparação dos dados medidos e estimados.

Com base nessas informações, aplicou-se testes de variâncias e médias/medianas para comparação dos dados medidos e estimados, e, por conseguinte a definição do melhor método para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão. Vale lembrar que para dados normais se aplicou o teste paramétrico de variâncias F de Fisher-Snedecor seguido do teste de médias T de Student. Já para o conjunto de dados não-normais, devido a inexistência de curva simétrica em relação ao eixo vertical passado pela média μ ou a existência de variância σ^2 , utilizou-se o teste não paramétrico Wilcoxon.

5.2.5. Teste de comparação das variâncias das concentrações de sedimentos medidas e estimadas (Teste F de Fisher-Snedecor)

Na Figura 77 está apresentada a tela do módulo estatístico para o teste de variância F de Fisher-Snedecor implementada na Ferramenta Computacional NH *Sediment and Statistic*. A ferramenta possibilita que o usuário insira os conjuntos dados aos quais se deseja testar a variância nos campos destacados em amarelo, contando também com botões de opção para seleção do tipo de teste de variância, o nível de significância e o critério de hipótese alternativa que deseja.

Em relação aos tipos de teste de variância, tem-se opção para uma variância (teste Qui-Quadrado) o qual não foi utilizado nesse procedimento adotado na tese. Esse tipo de teste é

utilizado quando se deseja verificar se a variância de um grupo de dados apresenta valor igual à uma determinada variância hipotética, não sendo aplicável diretamente aos dados disponíveis.

Já o teste para duas variâncias (Teste F de Fisher-Snedecor) é utilizado para comparar as variâncias entre dois conjuntos de dados, útil para os dados de concentração de sedimentos em suspensão medidos e estimados. Sendo assim, toda codificação e implementação do teste de variância F, em VBA, pode ser conferida no ANEXO J ao final desta tese.

Figura 77 – Tela inicial do módulo estatístico para Teste de variância da Ferramenta Computacional NHSS

Teste de Variância
(Teste Qui-Quadrado ou Teste F)

n ₁	Conjunto de Dados de entrada 1	n ₂	Conjunto de Dados de entrada 2
1		1	
2		2	
3		3	
4		4	
5		5	
6		6	
7		7	
8		8	
9		9	
10		10	
11		11	
12		12	
13		13	
14		14	
15		15	
16		16	
17		17	
18		18	
19		19	
20		20	
21		21	
22		22	
23		23	
24		24	
25		25	
26		26	

Principais comandos

Tipo de Teste

☐ Uma Variância (Teste X²)

☒ Duas Variâncias (Teste F)

Nível de significância

☐ 0,01 ☒ 0,05 ☐ 0,10

Hipótese nula

Ho ?

Hipótese alternativa

☒ Diferente

☐ Menor que ?

☐ Maior que

Outros comandos

Fonte: Autor

Para o cenário 1, as variâncias das concentrações medidas SS_C C1 foram comparadas às variâncias das concentrações estimadas SS_E C1-1A e SS_E C1-3, e para o cenário 2, compararam-se variâncias das concentrações medidas SS_C C2 com as das concentrações estimadas SS_E C1-1A, SS_E C1-1B, SS_E C1-1C, SS_E C1-2 e SS_E C1-3.

Em todos os testes aplicados foi considerado nível de significância de 5%, e os seguintes critérios de hipóteses: H_0 – As variâncias são iguais; e H_a – As variâncias são diferentes,

lembrando que essas opções são comumente utilizadas nas mais diversas áreas do conhecimento.

A Figura 78 apresenta o resultado do teste F ao se compararem as variâncias dos dados de concentração SS_C C1 e SS_E C1-1A. O p-valor de 0,7142 é superior ao nível de significância de 0,05, indicando que a Hipótese nula é verdadeira. Também se verificou que a estatística F de 0,9047 para essa situação está entre os valores críticos 0,5833 e 1,7145, corroborando a igualdade das variâncias entre os conjuntos de dados.

Figura 78 – Aplicação do teste F para comparação dos dados de concentração SS_C C1 e SS_E C1-1A ilustrando os resultados fornecidos pela ferramenta computacional NHSS

Teste de Variância
(Teste Qui-Quadrado ou Teste F)

n_1	Conjunto de Dados de entrada 1	n_2	Conjunto de Dados de entrada 2
1	6,600	1	4,196
2	6,750	2	4,421
3	7,500	3	6,452
4	7,600	4	4,196
5	7,750	5	4,572
6	8,750	6	6,188
7	9,330	7	6,113
8	10,000	8	6,790
9	11,200	9	6,978
10	12,670	10	8,219
11	14,000	11	7,805
12	14,000	12	8,144
13	15,000	13	9,986
14	16,000	14	9,516
15	16,000	15	19,800
16	17,000	16	18,860
17	18,000	17	10,475
18	18,000	18	19,348
19	18,000	19	26,906
20	18,750	20	10,550
21	18,800	21	12,844
22	19,000	22	20,834
23	19,000	23	20,025
24	19,670	24	11,340
25	20,000	25	11,039
26	21,000	26	12,637
27	21,000	27	25,214
28	21,000	28	19,894
29	22,000	29	22,338
30	24,000	30	20,834
31	25,000	31	14,648
32	25,000	32	20,251
33	25,000	33	20,514
34	26,000	34	31,531
35	27,000	35	21,755
36	27,330	36	12,242
37	28,000	37	30,252
38	28,000	38	30,215
39	29,000	39	20,627

Principais comandos

Tipo de Teste

☐ Uma Variância (Teste X^2)

☒ Duas Variâncias (Teste F)

Nível de significância

☐ 0,01 ☒ 0,05 ☐ 0,10

Hipótese nula

H_0 1,00 ?

Hipótese alternativa

☐ Diferente

☐ Menor que

☒ Maior que

Calcular

Outros comandos

Limpar

Voltar

Resultados do Teste da Variância

Teste F de Snedecor

Dados de cálculo

Desvio amostral 1 11,7562 Desvio amostral 2 12,3598

Tamanho da Amostra 1 55 Tamanho da Amostra 2 55

Graus de liberdade 1 54 Graus de liberdade 2 54

Nível de significância 0,05

Hipótese Nula As variâncias são iguais

Hipótese Alternativa As variâncias são diferentes

Resultados

Estatística F 0,9047

F crítico Esquerda 0,5833 F crítico Direita 1,7145

p-valor 0,7142

Conclusão Aceita-se Hipótese Nula H_0

Ok

Fonte: Autor

Na Figura 79 estão ilustrados os resultados da comparação das variâncias entre SS_C do cenário 2 *versus* SS_E C2-1A e SS_E C2-1B. Para esses testes se obteve p-valores iguais a 0,6047 e 0,9452, respectivamente. Logo, conclui-se que as variâncias são iguais para ambos os casos.

Figura 79 – Resultados do teste de variâncias para $SS_C C2$ versus $SS_E C2-1A$ (Esquerda) e $SS_C C2$ versus $SS_E C2-1B$ (Direita)

Resultados do Teste da Variância

Teste F de Snedecor

Dados de cálculo

Desvio amostral 1: 11,0616; Desvio amostral 2: 11,9994 (Esquerda) / 11,1817 (Direita)

Tamanho da Amostra 1: 42; Tamanho da Amostra 2: 42

Graus de liberdade 1: 41; Graus de liberdade 2: 41

Hipótese Nula: As variâncias são iguais

Hipótese Alternativa: As variâncias são diferentes

Resultados

Estadística F: 0,8498 (Esquerda) / 0,9786 (Direita)

F crítico Esquerda: 0,5375; F crítico Direita: 1,8604

Nível de significância: 0,05; p-valor: 0,6047 (Esquerda) / 0,9452 (Direita)

Conclusão: Aceita-se Hipótese Nula H_0

Ok

Fonte: Autor

Então, apresenta-se na Tabela 21 todos os resultados de teste F de Fisher-Snedecor para comparação de variâncias dos dados de concentração medidos e estimados obtidos na Ferramenta computacional NHSS, respectivamente para os cenários 1 e 2.

Tabela 21 – Resumo dos resultados do teste F obtidos na Ferramenta Computacional NHSS

Dados testados		Resultados do teste F na Ferramenta computacional NHSS				
Conjunto 1	Conjunto 2	Estatística F	F crit Esq	Fcrit Dir	p-valor	Conclusão
$SS_C C1$	$SS_E C1-1A$	0,9047	0,5833	1,7145	0,7142	Variâncias iguais
$SS_C C1$	$SS_E C1-3$	1,2656	0,5833	1,7145	0,3895	Variâncias iguais
$SS_C C2$	$SS_E C2-1A$	0,8498	0,5375	1,8604	0,6047	Variâncias iguais
$SS_C C2$	$SS_E C2-1B$	0,9786	0,5375	1,8604	0,9452	Variâncias iguais
$SS_C C2$	$SS_E C2-1C$	1,2347	0,5375	1,8604	0,5027	Variâncias iguais
$SS_C C2$	$SS_E C2-2$	1,1472	0,5375	1,8604	0,6622	Variâncias iguais
$SS_C C2$	$SS_E C2-3$	0,9725	0,5375	1,8604	0,9292	Variâncias iguais

Fonte: Autor

Com isso se verificou que todos os conjuntos de concentrações estimadas apresentam variâncias iguais às concentrações medidas, com p-valores superiores a 0,3895 em todos os casos. Utiliza-se esse teste para verificar se as diferenças entre as amostras são reais ou casuais, sendo a primeira causada por diferenças significativas nas populações e a segunda decorrentes apenas da variabilidade amostral. Portanto, com variâncias iguais, constata-se que a variação

entre as concentrações medidas e estimadas são decorrentes exclusivamente da variabilidade amostral.

5.2.6. Teste de comparação das médias e medianas

Comparadas as variâncias entre os conjuntos de dados, seguiu-se para análise estatísticas das médias/medianas de cada um dos conjuntos de dados de concentração de sedimentos em suspensão utilizando os módulos estatísticos implementados na ferramenta computacional NH *Sediment and Statistic*. Para os conjuntos de dados normais, utilizou-se o teste paramétrico T de Student (Figura 80) e para os conjuntos de dados não-normais, o teste Wilcoxon (Figura 81). Além disso, toda codificação e implementação dos testes T de Student e Wilcoxon podem ser avaliados, respectivamente, nos Anexos K e L.

Em ambos os testes, assim como nos testes de variâncias, o usuário insere os dados nas quais deseja avaliar nos campos destacados em amarelo, seleciona o tipo de teste T ou Wilcoxon indicado para seu estudo, seleciona o nível de significância e os critérios de hipóteses. Além disso, com exceção dos testes de amostra única na qual o valor de hipótese nula é inserido pelo usuário, nos outros tipos de testes o valor de hipótese nula é fixado em zero, conforme seções 3.3.2.3 e 3.3.2.4.

Figura 80 – Tela do Teste paramétrico de médias da Ferramenta Computacional NHSS

Teste de Médias
(Teste T de Student)

n ₁	Conjunto de Dados de entrada 1	n ₂	Conjunto de Dados de entrada 2
1		1	
2		2	
3		3	
4		4	
5		5	
6		6	
7		7	
8		8	
9		9	
10		10	
11		11	
12		12	
13		13	
14		14	
15		15	
16		16	
17		17	
18		18	
19		19	
20		20	
21		21	
22		22	
23		23	
24		24	
25		25	
26		26	
27		27	
28		28	
29		29	
30		30	
31		31	
32		32	
33		33	
34		34	
35		35	

Comandos principais

Tipo de Teste T

☐ Amostra Única

☐ Amostras Independentes com variâncias iguais

☐ Amostras Independentes com variâncias diferentes

☒ Pareado

Nível de Significância

☒ 0,01

☐ 0,05

☐ 0,10

Hipótese Nula

Ho: ?

Crítérios da Hipótese Alternativa

☒ Diferente

☐ Maior que ?

☐ Menor que

Comandos adicionais

Fonte: Autor

Figura 81 – Tela do teste não-paramétrico de medianas da Ferramenta Computacional NHSS

Teste de Wilcoxon
(Teste não paramétrico de medianas)

n_1	Conjunto de Dados de entrada 1	n_2	Conjunto de Dados de entrada 2
1		1	
2		2	
3		3	
4		4	
5		5	
6		6	
7		7	
8		8	
9		9	
10		10	
11		11	
12		12	
13		13	
14		14	
15		15	
16		16	
17		17	
18		18	
19		19	
20		20	
21		21	
22		22	
23		23	
24		24	
25		25	
26		26	
27		27	
28		28	
29		29	
30		30	

Comandos principais

Tipo de Teste W

☐ Amostra Única ($n1$)

☐ Amostras Independentes (Wilcoxon-Mann-Witney)

☒ Pareado

Nível de Significância

☐ 0,10

☒ 0,05

☐ 0,01

Hipótese Nula

H_0 0,0 ?

Crêrios da Hipótese Alternativa

☒ Diferente

☐ Maior

☐ Menor

Calcular

Comandos adicionais

Voltar

Limpar Tela

Fonte: Autor

Neste estudo se aplicou o Teste T Pareado para dados normais e teste Wilcoxon pareado para dados não-normais, na qual se testou a hipótese nula de que a diferença média entre as concentrações medidas (SS_C) e estimadas (SS_E) é igual a zero. Trata-se de uma forma de avaliar a eficiência do método na estimativa da concentração de sedimentos em suspensão. Além disso, diferentemente dos demais tipos de testes T e Wilcoxon, os testes pareados servem para comparar dois métodos, o que requereu pares de dados (SS_C , SS_E), sendo apropriado para o estudo estatístico.

Para os dados normais, compararam-se as médias das concentrações medidas SS_C C1 e SS_C C2, respectivamente, com as médias das concentrações estimadas do cenário 1 e 2, à 5% de significância. Já o conjunto SS_E C1-2 (não-normal) teve sua mediana comparada com à mediana do conjunto de dados medidos SS_C C1 também à 5% de significância. Vale relembrar que tanto para o teste T pareado quanto para o teste Wilcoxon pareado se optou por testes bilaterais, com os seguintes critérios de hipóteses: H_0 – A média/mediana das diferenças é igual a zero; e H_a – A média/mediana das diferenças é diferente de zero.

Apresenta-se na Figura 82 a aplicação do teste T pareado para comparação das médias dos dados de concentração SS_C C1 e SS_E C1-1A destacando os resultados fornecidos pela ferramenta computacional NHSS. Nela se verificou média e desvio padrão das diferenças igual

a, respectivamente, 3,434 mg.L⁻¹ e 5,716 mg.L⁻¹. Além disso, constatou-se valor estatística T igual a 4,459, que é muito superior ao valor crítico do teste para o nível de significância de 5% e 54 graus de liberdade. Disso, tem-se evidências para a rejeição da hipótese nula, permitindo afirmar que a média das diferenças entre os dados medidos (SS_C C1) e estimados (SS_E C1-1A) é estatisticamente diferente de zero.

Figura 82 – Aplicação do teste T pareado para comparação das médias dos dados de concentração SS_C C1 e SS_E C1-1A ilustrando os resultados fornecidos pela ferramenta computacional NHSS

Teste de Médias (Teste T de Student)

n ₁	Conjunto de Dados de entrada 1	n ₂	Conjunto de Dados de entrada 2
1	6,600	1	4,196
2	6,750	2	4,421
3	7,500	3	6,452
4	7,600	4	4,196
5	7,750	5	4,572
6	8,750	6	6,188
7	9,330	7	6,113
8	10,000	8	6,790
9	11,200	9	6,978
10	12,670	10	8,219
11	14,000	11	7,805
12	14,000	12	8,144
13	15,000	13	9,986
14	16,000	14	9,516
15	16,000	15	19,800
16	17,000	16	18,860
17	18,000	17	10,475
18	18,000	18	19,348
19	18,000	19	26,906
20	18,750	20	10,550
21	18,800	21	12,844
22	19,000	22	20,834
23	19,000	23	20,025
24	19,670	24	11,340
25	20,000	25	11,039
26	21,000	26	12,697
27	21,000	27	25,214
28	21,000	28	19,894
29	22,000	29	22,338
30	24,000	30	20,834
31	25,000	31	14,648
32	25,000	32	20,251
33	25,000	33	20,514
34	26,000	34	31,531

Comandos principais

Tipo de Teste T:

- ☐ Amostra Única
- ☐ Amostras Independentes com variâncias iguais
- ☐ Amostras Independentes com variâncias diferentes
- ☒ Pareado

Nível de Significância:

- ☐ 0,01
- ☒ 0,05
- ☐ 0,10

Hipótese Nula:

H₀ 0,0 ?

Críticas da Hipótese Alternativa:

- ☒ Diferente
- ☐ Maior que ?
- ☐ Menor que

Calcular

Comandos adicionais

Voltar

Limpar Tela

Resultados Teste T

Pareado

Dados de cálculo

Média das diferenças: 3,434

Desvio Padrão das diferenças: 5,716

Tamanho da Amostra: 55

Graus de liberdade: 54

Hipótese Nula: Igual a 0,0

Hipótese Alternativa: Diferente de 0,0

Resultados

Estatística T: 4,459

-t crítico: -2,0049 +t crítico: 2,0049

Nível de Significância: 0,05 p-valor: 4,25E-05

Conclusão: Rejeita-se Hipótese Nula H₀

Ok

Obs.: Editado para destacar os resultados

Fonte: Autor

A partir desse resultado se pode afirmar que as estimativas obtidas da regressão linear entre os dados de concentração de sedimentos em suspensão e turbidez para o dia 27/01/2014 não são satisfatórias, e se aplicadas, fornecerão um erro significativo. Portanto, o método de estimativa de concentração de sedimentos em suspensão a partir do Cenário C1-1A não é apropriado.

Já na Figura 83 estão ilustrados os resultados do teste Wilcoxon pareado visando a comparação dos dados de concentração SS_C C1 e SS_E C1-2, na qual se obteve mediana das diferenças entres os pares de dados medidos e estimados de -0,3430 mg.L⁻¹.

Figura 83 – Aplicação do teste Wilcoxon pareado para comparação das medianas dos dados de concentração SS_C C1 e SS_E C1-2 ilustrando os resultados fornecidos pela ferramenta computacional NHSS

Teste de Wilcoxon
(Teste não paramétrico de medianas)

n_1	Conjunto de Dados de entrada 1	n_2	Conjunto de Dados de entrada 2
1	6,600	1	5,895
2	6,750	2	6,099
3	7,500	3	7,940
4	7,600	4	5,895
5	7,750	5	11,954
6	8,750	6	13,156
7	9,330	7	13,710
8	10,000	8	12,289
9	11,200	9	8,417
10	12,670	10	14,419
11	14,000	11	13,802
12	14,000	12	9,474
13	15,000	13	15,981
14	16,000	14	16,744
15	16,000	15	20,042
16	17,000	16	19,190
17	18,000	17	16,345
18	18,000	18	19,633
19	18,000	19	26,485
20	18,750	20	17,666
21	18,800	21	19,710
22	19,000	22	24,051
23	19,000	23	20,246
24	19,670	24	16,988
25	20,000	25	16,765
26	21,000	26	21,007
27	21,000	27	27,309
28	21,000	28	20,127
29	22,000	29	22,343
30	24,000	30	20,979
31	25,000	31	21,319
32	25,000	32	23,617
33	25,000	33	23,813
34	26,000	34	30,678
35	27,000	35	27,655
36	27,330	36	20,419
37	28,000	37	35,230
38	28,000	38	29,485

Comandos principais

Tipo de Teste W

- ☐ Amostra Única (n_1)
- ☐ Amostras Independentes (Wilcoxon-Mann-Witney)
- ☒ Pareado

Nível de Significância

- ☐ 0,10
- ☒ 0,05
- ☐ 0,01

Hipótese Nula

H_0

Crêrios da Hipótese Alternativa

- ☒ Diferente
- ☐ Maior
- ☐ Menor

Comandos adicionais

Resultados Teste Wilcoxon

Teste Wilcoxon Pareado

Dados de cálculo

Mediana das Diferenças

Tamanho da Amostra

Hipótese Nula

Hipótese Alternativa

Resultados

Estatística T

T crítico Inferior

T crítico Superior

Nível de Significância

p-Valor

Conclusão

Fonte: Autor

Foi possível verificar que a estatística T^+ de Wilcoxon foi 749, e os valores críticos inferior e superior foram, respectivamente 536 e 1004 à 5% de significância. Nota-se que a valor T^+ está entre os valores críticos, logo a hipótese nula “ H_0 – A mediana das diferenças é igual a zero” é verdadeira, que também é confirmada pelo p-valor de 0,8636 superior ao nível de significância 0,05.

Com isso, pode-se afirmar que a mediana das diferenças entre os dados do conjunto SS_C C1 e SS_E C1-2 são estatisticamente iguais. Isso significa que as estimativas obtidas da regressão linear dos dados de concentração de sedimentos em suspensão e turbidez considerando os setores do reservatório de Mogi-Guaçu foram satisfatórias, e podem ser utilizadas como método confiável de estimativa de sólidos suspensos a partir de dados de turbidez. Nas Tabelas 22 e 23 estão as sínteses dos resultados obtidos, respectivamente, pelo teste T pareado e pelo teste Wilcoxon pareado na ferramenta computacional.

Tabela 22 – Resumo dos resultados do teste T de Student obtidos na Ferramenta Computacional NHSS

Dados testados		Estatística	-Tcrit	+Tcrit	p-valor	Conclusão
Conjunto 1	Conjunto 2	T				
SS _C C1	SS _E C1-1A	4,4559	-2,0049	2,0049	0,00004	Conjuntos de dados diferentes
SS _C C1	SS _E C1-3	-0,0016	-2,0049	2,0049	0,99876	Conjuntos de dados iguais
SS _C C2	SS _E C2-1A	-1,5737	-2,0195	2,0195	0,12323	Conjuntos de dados iguais
SS _C C2	SS _E C2-1B	0,8300	-2,0195	2,0195	0,41137	Conjuntos de dados iguais
SS _C C2	SS _E C2-1C	4,6680	-2,0195	2,0195	0,00003	Conjuntos de dados diferentes
SS _C C2	SS _E C2-2	1,4210	-2,0195	2,0195	0,16288	Conjuntos de dados iguais
SS _C C2	SS _E C2-3	0,7203	-2,0195	2,0195	0,47545	Conjuntos de dados iguais

Fonte: Autor

Tabela 23 – Resumo dos resultados do teste Wilcoxon obtidos na Ferramenta Computacional NHSS

Dados testados		Estatística	-Tcrit	+Tcrit	p-valor	Conclusão
Conjunto 1	Conjunto 2	T ⁺				
SS _C C1	SS _E C1-2	749	536,07	1003,93	0,8636	Conjuntos de dados iguais

Fonte: Autor

A partir desta série de testes estatísticos envolvendo o teste Kolmogorov-Smirnov para normalidade, teste F de Fisher-Snedecor para comparação das variâncias, teste T de Student para comparação das médias e teste Wilcoxon para comparação de medianas, pôde-se verificar quais relações funcionais entre Turbidez (NTU) *versus* SS_C (mg.L⁻¹) e SS_L (μL.L⁻¹) *versus* SS_C (mg.L⁻¹) geraram melhores estimativas SS_E.

Para ambos os cenários 1 e 2, constatou-se que os métodos de regressão linear considerando os setores do reservatório (C1-2 e C2-2) e considerando todos os pontos amostrados (C1-3 e C2-3) geraram estimativas de concentração estatisticamente iguais aos respectivos dados medidos, com 5% de significância.

Constatou-se também que os dados de concentração de sedimentos em suspensão estimados SS_E C1-1A e SS_E C2-1C não são estatisticamente iguais aos dados medidos SS_C C1 e SS_C C2, respectivamente. Logo, as equações de estimativa de concentração de sedimentos em suspensão por data de amostragem geraram resultados menos confiáveis, recomendando-se a não utilização desses métodos. Além disso, conforme Quadro 29 é possível verificar que os dados de concentração volumétrica fornecidos pela sonda LISST (Cenário 2) forneceram melhores estimativas que os dados de turbidez fornecidos pela sonda multiparâmetro (Cenário 1).

Quadro 29 – Recomendações dos métodos de estimativa da concentração de sedimentos em suspensão

Método de Regressão linear aplicado		Cenário	Equação de estimativa da concentração de sedimentos em suspensão	Avaliação do método de estimativa
Regressão por data de amostragem	27/01/2014	C1-1A	$SS_E = 0,3760 \cdot Turb - 0,3916$	Não recomendado
	29/01/2014	C1-1B	$SS_E = 0,2975 \cdot Turb + 8,0640$	Não recomendado
	20/03/2014	C1-1C	$SS_E = 0,7026 \cdot Turb - 2,4640$	Não recomendado
Regressão por setor do reservatório	Setor 1 (P1, P6, P8)	C1-2	$SS_E = 0,5607 \cdot Turb + 1,5792$	Recomendado
	Setor 2 (P11, P12, P14)		$SS_E = 0,3352 \cdot Turb + 7,9113$	
	Setor 3 (P16)		$SS_E = 0,2797 \cdot Turb + 8,2617$	
	Setor 4 (P19 e P20)		$SS_E = 0,3409 \cdot Turb + 1,7356$	
Regressão considerando todos os pontos		C1-3	$SS_E = 0,3179 \cdot Turb + 6,3009$	Recomendado
Regressão por data de amostragem	27/01/2014	C2-1A	$SS_E = 0,5752 \cdot SS_L$	Recomendado
	29/01/2014	C2-1B	$SS_E = 0,5360 \cdot SS_L$	Recomendado
	20/03/2014	C2-1C	$SS_E = 0,4772 \cdot SS_L$	Não recomendado
Regressão por setor do reservatório	Setor 1 (P1, P6, P8)	C2-2	$SS_E = 0,5278 \cdot SS_L$	Recomendado
	Setor 2 (P11, P12, P14)		$SS_E = 0,4636 \cdot SS_L$	
	Setor 3 (P16)		$SS_E = 0,5224 \cdot SS_L$	
	Setor 4 (P19 e P20)		$SS_E = 0,6277 \cdot SS_L$	
Regressão considerando todos os pontos		C2-3	$SS_E = 0,5377 \cdot SS_L$	Recomendado

Fonte: Autor

A maioria dos métodos de estimativa do Cenário 1 não são recomendados. Enquanto o cenário C1-1A apresentou estimativas estatisticamente diferentes dos valores reais, os cenários C1-1B e C1-1C foram rejeitados, respectivamente, devido ao baixo coeficiente de determinação da regressão linear e devido não validade da regressão linear que forneceu resíduos com distribuição não-normal. Em compensação, no Cenário 2, apenas C2-1C apresentou estimativas estatisticamente diferentes dos valores reais.

5.2.7. Determinação do melhor método de estimativa por meio de índices estatísticos

Apesar da possibilidade de utilização de alguns cenários para a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão, visando a determinação do melhor método de estimativa, utilizou-se a aplicação de parâmetros estatísticos.

Na Figura 84 está apresentada a tela de cálculos dos índices estatísticos, onde o usuário pode inserir nas células destacadas em amarelo, dados medidos ou observados e os respectivos dados estimados.

Figura 84 – Tela inicial da planilha de cálculo dos parâmetros estatísticos

The interface is titled "Parâmetros estatísticos". It features a main table with the following structure:

n	Dados Observados (Branco)	Dados Estimados (Comparados)
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		

To the right of the table is a sidebar titled "Comandos principais" containing three buttons: "Voltar", "Limpar Tela", and "Calcular".

On the left, a smaller window titled "Testes estatísticos" is shown, containing a menu with "Estatística básica" and "Parâmetros Estatísticos" (the latter is highlighted with a red box). Below the menu are two tabs: "Janela Principal" and "Tutorial".

Fonte: Autor

Então, para cada um dos cenários avaliados como “recomendados” na estimativa da concentração de sedimentos em suspensão, avaliaram-se os dados medidos e estimados por meio do cálculo dos parâmetros Coeficiente de ajuste (CA), Eficiência (EF), Coeficiente de massa residual (CRM), Raiz do Erro Quadrático Médio (RSME), Erro médio (MD) e Erro máximo (ME). Todo código da programação envolvendo os cálculos desses parâmetros se encontram no Anexo M.

Ilustram-se nas Figuras 85 e 86 os resultados obtidos por meio da Ferramenta Computacional NHSS para os cenários C1 e C2. Já na Tabela 24 está apresentada a síntese dos resultados para efeito de comparação.

Figura 85 – Resultados de índices estatísticos para o Cenário 1

Legenda: SS_C C1 x SS_E C1-2 (Esquerda) e SS_C C1 x SS_E C1-3 (Direita)

Fonte: Autor

Figura 86 – Resultados de índices estatísticos para o Cenário 2

Legenda: SS_C C2 x SS_E C2-1A (A); SS_C C2 x SS_E C2-1B (B); SS_C C2 x SS_E C2-2 (C); SS_C C2 x SS_E C2-3 (D)

Fonte: Autor

Tabela 24 - Resultados dos parâmetros estatísticos aplicados sintetizados

Comparação	Parâmetros estatísticos					
	CA	EF	CMR	RSME	ME (mg.L ⁻¹)	MD (mg.L ⁻¹)
SS _C C1 x SS _E C1-2	1,135	0,881	-0,00005	4,016	12,10	3,10
SS _C C1 x SS _E C1-3	1,265	0,790	-0,00005	5,337	14,90	4,26
SS _C C2 x SS _E C2-1A	0,843	0,834	-0,0477	4,446	12,54	3,42
SS _C C2 x SS _E C2-1B	0,976	0,859	0,02372	4,108	9,66	3,22
SS _C C2 x SS _E C2-2	1,141	0,906	0,03252	3,343	10,58	2,53
SS _C C2 x SS _E C2-3	0,971	0,859	0,02062	4,106	9,54	3,23

Fonte: Autor

Em relação ao coeficiente de ajuste (CA), valores próximos a 1,0 apresentam melhores estimativas, sendo assim, os cenários C1-2, C2-1B e C2-3 apresentaram melhores resultados. A eficiência (EF), índice estatístico que avalia a linearidade dos valores observados, e as diferenças entre os valores observados e estimados, apresentou valores superiores a 0,790. Entretanto, destaca-se que os cenários C1-2, C2-1B, C2-2 e C2-3 apresentaram maiores eficiências nas estimativas.

Aplicando-se o coeficiente de massa residual nos valores medidos e estimados de concentração, percebe-se que, com exceção dos cenários C1-2, C1-3 e C2-1A, os demais tendem a subestimar a concentração ($CRM > 0$). Especificamente os cenários C1-2 e C1-3 apresentaram o CMR mais próximo de zero. Já em relação à raiz do erro quadrático médio (RSME), verificaram-se valores semelhantes, com destaque ao cenário C2-2 que apresentou o menor valor. Lembra-se que melhores estimativas geram valores de RSME iguais a zero.

Além disso, apesar das diferenças médias (MD) bem semelhantes, os cenários C2-1B, C2-2 e C2-3 apresentaram menores erros máximos (ME). Isso indica que o maior erro máximo nas estimativas desses cenários foi respectivamente 9,66, 10,58 e 9,54 mg.L⁻¹.

Portanto, analisando a Tabela 24 anteriormente apresentada, constata-se que para o cenário envolvendo estimativas da concentração a partir da turbidez, C1-2 apresentou melhores estimativas. Já para o cenário em que se estimaram as concentrações a partir dos dados volumétricos da sonda LISST, C2-2 e C2-3 forneceram os melhores parâmetros estatísticos.

A escolha de método de estimativa nesse caso dependerá exclusivamente da disponibilidade de equipamentos e recursos para campanhas. Logo se o gestor responsável pela PCH Mogi-Guaçu possuir apenas sonda multiparâmetro, C1-2 será útil e gerará estimativas satisfatórias, otimizando tempo e mão-de-obra. O mesmo critério vale se o gestor dispuser de uma sonda LISST. Neste último caso, visando a otimização de tempo, recomenda-se a utilização do cenário C2-3 que considera todos os pontos amostrados, pois além de facilitar na tabulação dos dados, trabalha-se apenas com uma equação de estimativa, obtendo concentrações estimadas tão boas quanto as estimadas por setor do reservatório.

Em resumo, o uso da sonda LISST-100X e da sonda multiparâmetro para a medição de sedimentos em suspensão é viável. Sua utilização possibilita a obtenção de maior número de dados do que os obtidos por meio do emprego de técnicas convencionais, possibilitando análise mais completa do reservatório e reduzindo significativamente o trabalho de campo, laboratório e escritório, permitindo o estudo da concentração e transporte do sedimento em suspensão.

5.3. Verificação dos resultados dos testes estatísticos obtidos na ferramenta computacional – NH *Sediment and Statistic*

Para a verificação dos resultados das estatísticas e p-valores obtidos pelas simulações na ferramenta computacional NH *Sediment and Statistic* para os testes estatísticos e comparação dos dados obtidos, utilizou-se o *software* livre R 3.5.1 (THE R FOUNDATION, 2018) e o *software* MINITAB 18 (MINITAB INC, 2018b). Optou-se pela comparação com dois outros

Tabela 25 – Síntese dos resultados do teste de normalidade para o Cenário 3 obtidos por meio da ferramenta computacional NHSS

Dados testados*	Tamanho amostral (n)	Resultados da Ferramenta NHSS para o teste de Normalidade			
		Estatística KS (Dn)	Valor crit (Dcrit)	p-valor	Conclusão
T1A	8	0,2013	0,2850	0,4271	Normal
T5A	7	0,2170	0,3000	0,3937	Normal
T7A	7	0,3285	0,3000	0,0198	Não-Normal
T8A	9	0,4123	0,2710	3,28E-06	Não-Normal
T9A	7	0,2843	0,3000	0,0889	Normal
T12A	14	0,3833	0,2270	6,85E-07	Não-Normal
T14A	4	0,4274	0,3810	0,0087	Não-Normal
T16A	7	0,3093	0,3000	0,0407	Não-Normal
T1B	8	0,2954	0,2850	0,0376	Não-Normal
T6B	9	0,2968	0,2710	0,0199	Não-Normal
T8B	9	0,3422	0,2710	0,0008	Não-Normal
T12B	10	0,3978	0,2580	1,11E-05	Não-Normal
T16B	7	0,2672	0,3000	0,1391	Normal
T20B	12	0,2570	0,2420	0,0261	Não-Normal
T1C	8	0,2621	0,2850	0,1102	Normal
T6C	9	0,3136	0,2710	0,0093	Não-Normal
T8C	9	0,1795	0,2710	0,5355	Normal
T12C	9	0,3294	0,2710	0,0017	Não-Normal
T16C	8	0,3321	0,2850	0,0037	Não-Normal
T19C	7	0,2214	0,3000	0,3643	Normal

* Dados testados de temperatura seguindo nomenclatura TXY

X: Ponto amostrado;

Y: A – amostragem do dia 27/01/2014; B – amostragem do dia 29/01/2014; e C – amostragem do dia 20/03/2014

Fonte: Autor

Com base nesses resultados, para realização dos testes paramétricos (F de Fisher e T de Student) e não-paramétricos (Wilcoxon), definiu-se pares de dados de temperatura com o mesmo tamanho amostral para serem avaliados com um nível de significância de 5% quanto a igualdade da variância, média e mediana apresentados no Quadro 30.

Quadro 30 – Pares de dados do Cenário 3 aplicados aos testes paramétricos e não-paramétricos

Dados Normais testados		Dados Não-Normais testados	
Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 1	Conjunto 2
T1A	T1C	T7A	T16A
T5A	T9A	T1B	T16C
T5A	T16B	T8B	T8A
T5A	T19C	T6C	T12C
T16B	T19C	T8B	T12C

Fonte: Autor

Em relação aos testes paramétricos, realizou-se o teste F de Fisher-Snedecor para a comparação das variâncias dos conjuntos de dados de temperatura. Na Figura 88 estão apresentados os resultados das comparações de variâncias entre os pares de temperatura T1A x T1C, T5A x T9A e T5A x T16B. Além disso, na Tabela 26 estão resumidos todos os resultados de teste F de Fisher-Snedecor para os dados de temperatura no reservatório de Mogi-Guaçu obtidos na Ferramenta computacional NHSS, assim como a conclusão do teste.

Figura 88 – Resultados da comparação de variâncias obtidos com a ferramenta NHSS:

The figure shows three side-by-side screenshots of the 'Resultados do Teste da Variância' (Variance Test Results) window in the NHSS software. Each window is titled 'Teste F de Snedecor' and contains the following information:

- Dados de cálculo (Calculation Data):**
 - Desvio amostral 1 (Sample Standard Deviation 1): 0,2371 (Left), 0,5891 (Middle), 0,5891 (Right)
 - Desvio amostral 2 (Sample Standard Deviation 2): 0,5786 (Left), 0,9570 (Middle), 0,9608 (Right)
 - Tamanho da Amostra 1 (Sample Size 1): 8 (Left), 7 (Middle), 7 (Right)
 - Tamanho da Amostra 2 (Sample Size 2): 8 (Left), 7 (Middle), 7 (Right)
 - Graus de liberdade 1 (Degrees of Freedom 1): 7 (Left), 6 (Middle), 6 (Right)
 - Graus de liberdade 2 (Degrees of Freedom 2): 7 (Left), 6 (Middle), 6 (Right)
 - Hipótese Nula (Null Hypothesis): As variâncias são iguais (Variances are equal)
 - Hipótese Alternativa (Alternative Hypothesis): As variâncias são diferentes (Variances are different)
- Resultados (Results):**
 - Estatística F (F Statistic): 0,1679 (Left), 0,3790 (Middle), 0,3759 (Right)
 - F crítico Esquerda (Left Critical F): 0,2002 (Left), 0,1718 (Middle), 0,1718 (Right)
 - F crítico Direita (Right Critical F): 4,9949 (Left), 5,8198 (Middle), 5,8198 (Right)
 - Nível de significância (Significance Level): 0,05 (Left), 0,05 (Middle), 0,05 (Right)
 - p-valor (p-value): 0,0312 (Left), 0,2628 (Middle), 0,2590 (Right)
 - Conclusão (Conclusion): Rejeita-se Hipótese Nula Ho (Reject Null Hypothesis Ho) (Left), Aceita-se Hipótese Nula Ho (Accept Null Hypothesis Ho) (Middle and Right)

Legenda: T1A x T1C (Esquerda); T5A x T9A (Meio); e T5A x T16B (Direita)

Fonte: Autor

Tabela 26 – Síntese dos resultados do teste F obtidos na Ferramenta Computacional NHSS para os dados normais do Cenário 3

Dados testados		Resultados do teste F na Ferramenta computacional NHSS				
Conjunto 1	Conjunto 2	Estatística F	F crit Esq	Fcrit Dir	p-valor	Conclusão
T1A	T1C	0,1679	0,2002	4,9949	0,0312	Variâncias diferentes
T5A	T9A	0,3790	0,1718	5,8198	0,2628	Variâncias iguais
T5A	T16B	0,3759	0,1718	5,8198	0,2590	Variâncias iguais
T5A	T19C	1,2928	0,1718	5,8198	0,7631	Variâncias iguais
T16B	T19C	3,4390	0,1718	5,8198	0,1583	Variâncias iguais

Legenda: Dados testados de temperatura seguindo nomenclatura TXY

X: Ponto amostrado;

Y: A – amostragem do dia 27/01/2014; B – amostragem do dia 29/01/2014; e C – amostragem do dia 20/03/2014

Fonte: Autor

Neste caso, apenas as temperaturas do ponto P1 no dia 27/01/2014 (T1A) apresentaram variâncias diferentes às temperaturas do ponto P1 no dia 20/03/2014 (T1C). Isso aconteceu pelo fato das temperaturas T1C variarem de aproximadamente de 27 a 25°C ao longo da coluna d'água, enquanto para T1A, as temperaturas se mantiveram aproximadamente constantes.

Em seguida, realizou-se o teste de comparação das médias dos dados normais e medianas dos dados não-normais. Para exemplificar, nas Figuras 89 e 90 estão, respectivamente alguns testes T pareado e Wilcoxon pareado aplicados aos conjuntos de dados de temperatura. A síntese dos resultados e a conclusão do teste estão apresentadas nas Tabelas 27 e 28, respectivamente, para comparação das médias e medianas dos conjuntos de dados.

Figura 89 – Alguns resultados da comparação de médias obtidos com a ferramenta computacional NHSS para o cenário 3

Comparação	Média das diferenças	Desvio Padrão das diferenças	Tamanho da Amostra	Graus de liberdade	Estatística T	-t crítico	+t crítico	Nível de Significância	p-valor	Conclusão
T1A x T1C (Esquerda)	1,077	0,408	8	7	7,4721	-2,3646	2,3646	0,05	0,0001	Rejeita-se Hipótese Nula Ho
T5A x T9A (Meio)	0,421	0,532	7	6	2,0929	-2,4469	2,4469	0,05	0,0813	Não se Rejeita Hipótese Nula Ho
T5A x T16B (Direita)	0,207	0,471	7	6	1,1627	-2,4469	2,4469	0,05	0,2891	Não se Rejeita Hipótese Nula Ho

Legenda: T1A x T1C (Esquerda); T5A x T9A (Meio); e T5A x T16B (Direita)

Fonte: Autor

Figura 90 – Alguns resultados da comparação de medianas obtidos com a ferramenta computacional NHSS para o cenário 3

Comparação	Mediana das Diferenças	Tamanho da Amostra	Estatística T	T crítico Inferior	T crítico Superior	Nível de Significância	p-Valor	Conclusão
T7A x T16A (Esquerda)	0,2800	7	16,000	3,0	25,0	0,05	0,7511	Não se rejeita Hipótese nula Ho
T1B x T16C (Meio)	0,6350	8	36,000	4,0	32,0	0,05	0,0010	Rejeita-se Hipótese nula Ho
T8B x T8A (Direita)	0,4400	9	45,000	6,0	39,0	0,05	0,0073	Rejeita-se Hipótese nula Ho

Legenda: T7A x T16A (Esquerda); T1B x T16C (Meio); e T8B x T8A (Direita)

Fonte: Autor

Tabela 27 – Síntese dos resultados do teste T de Student obtidos na Ferramenta Computacional NHSS para os dados normais do Cenário 3

Dados testados		Resultados do teste T de Student na Ferramenta computacional NHSS				
Conjunto 1	Conjunto 2	Estatística T	-Tcrit	+Tcrit	p-valor	Conclusão
T1A	T1C	7,4721	-2,3646	2,3646	0,00014	Conjunto de dados diferentes
T5A	T9A	2,0929	-2,4469	2,4469	0,08127	Conjuntos de dados iguais
T5A	T16B	1,1627	-2,4469	2,4469	0,28910	Conjuntos de dados iguais
T5A	T19C	10,8381	-2,4469	2,4469	0,00004	Conjuntos de dados diferentes
T16B	T19C	2,2465	-2,4469	2,4469	0,06576	Conjuntos de dados iguais

Legenda: Dados testados de temperatura seguindo nomenclatura TXY

X: Ponto amostrado;

Y: A – amostragem do dia 27/01/2014; B – amostragem do dia 29/01/2014; e C – amostragem do dia 20/03/2014

Fonte: Autor

Tabela 28 – Síntese dos resultados do teste Wilcoxon obtidos na Ferramenta Computacional NHSS para os dados não-normais do Cenário 3

Dados testados		Resultados do teste Wilcoxon na Ferramenta computacional NHSS				
Conjunto 1	Conjunto 2	Estatística T ⁺	-Tcrit	+Tcrit	p-valor	Conclusão
T7A	T16A	16,000	3,000	25,000	0,4469	Conjuntos de dados iguais
T1B	T16C	36,000	4,000	32,000	0,0499	Conjuntos de dados diferentes
T8B	T8A	45,000	6,000	39,000	0,0330	Conjuntos de dados diferentes
T6C	T12C	14,000	6,000	39,000	0,07671	Conjuntos de dados iguais
T8B	T12C	45,000	6,000	39,000	0,0330	Conjuntos de dados diferentes

Legenda: Dados testados de temperatura seguindo nomenclatura TXY

X: Ponto amostrado;

Y: A – amostragem do dia 27/01/2014; B – amostragem do dia 29/01/2014; e C – amostragem do dia 20/03/2014

Fonte: Autor

5.3.2. Verificação da acurácia do teste de normalidade

Nas Figuras 91 e 92 estão apresentados, respectivamente, as telas com os resultados do teste de normalidade para o resíduo R-C1-1A obtidos por meio do *software* R e Minitab.

Figura 91 – Resultados do teste de normalidade para o resíduo R-C1-1A obtidos pelo software R

Fonte: Adaptado de The R foundation (2018)

Figura 92 – Resultados do teste de normalidade para o resíduo R-C1-1A obtidos pelo software Minitab

Fonte: Adaptado de Minitab Inc (2018b)

Notou-se para ambos os resultados dos resíduos testados valores de estatística Kolmogorov-Smirnov (D_n) iguais a 0,057844 e 0,058, respectivamente para os programas R e

Continuação									
SSE C2-3	0,0742	0,0763	0,074	0,00213	-0,00020	0,00233	2,79%	-0,27%	3,05%
SSC C1	0,0768	0,0726	0,076	-0,00420	-0,00080	-0,00340	-5,79%	-1,05%	-4,68%
SSC C2	0,0837	0,0798	0,082	-0,00391	-0,00170	-0,00221	-4,90%	-2,07%	-2,77%
T9A	0,0889	0,0867	0,086	-0,00222	-0,00290	0,00068	-2,56%	-3,37%	0,78%
T1C	0,1102	0,1085	0,102	-0,00170	-0,00820	0,00650	-1,57%	-8,04%	5,99%
T16B	0,1391	0,1331	0,133	-0,00600	-0,00610	0,00010	-4,51%	-4,59%	0,08%
R-C2-1C	0,1929	0,1970	> 0,15	0,00410	N/A	N/A	2,08%	N/A	N/A
SSE C2-2	0,2703	0,2827	> 0,15	0,01240	N/A	N/A	4,39%	N/A	N/A
R-C2-2	0,2876	0,2970	> 0,15	0,00940	N/A	N/A	3,16%	N/A	N/A
T19C	0,3643	0,3762	> 0,15	0,01190	N/A	N/A	3,16%	N/A	N/A
T5A	0,3937	0,4076	> 0,15	0,01390	N/A	N/A	3,41%	N/A	N/A
T1A	0,4271	0,4361	> 0,15	0,00900	N/A	N/A	2,06%	N/A	N/A
T8C	0,5355	0,5515	> 0,15	0,01600	N/A	N/A	2,90%	N/A	N/A
R-C1-1A	0,9900	0,9182	> 0,15	-0,07180	N/A	N/A	-7,82%	N/A	N/A
R-C2-3	0,9912	0,8417	> 0,15	-0,14950	N/A	N/A	-17,76%	N/A	N/A
R-C2-1B	0,9917	0,7994	> 0,15	-0,19230	N/A	N/A	-24,06%	N/A	N/A
R-C1-2	0,9921	0,7921	> 0,15	-0,20000	N/A	N/A	-25,25%	N/A	N/A
R-C2-1A	0,9936	0,6533	> 0,15	-0,34030	N/A	N/A	-52,09%	N/A	N/A
Média dos valores absolutos				0,02857	0,00366	0,00378	20,85%	10,06%	11,41%

Legenda: (*) O software R não realiza o teste de normalidade para amostras com $n \leq 4$

N/A: Não se aplica

Fonte: Autor

A comparação entre os valores obtidos de estatística Dn para a ferramenta computacional e os dois softwares utilizados foram muito semelhantes, sendo que a maior variação (diferença) foi de -0,837% para o conjunto de dados SS_E C2-3. Para as demais comparações, constatou-se uma diferença média absoluta de 0,21% e 0,16% quando comparado a ferramenta desenvolvida, respectivamente, com os *softwares* R e Minitab. Também é interessante notar que essa diferença média absoluta entre a ferramenta e o R foi inferior que a diferença entre o R e Minitab, mostrando a que os resultados estão satisfatórios.

Apesar dos valores Dn obtidos pela Ferramenta NHSS estarem ordenados, não se constatou padrão de diferença percentual. Em outras palavras, há erros maiores e menores distribuídos uniformemente entre os resultados. Isso indica que os resultados da estatística Kolmogorov-Smirnov (Dn) para o teste de normalidade, fornecidos pela Ferramenta computacional, são consistentes e válidos.

Já em relação aos p-valores obtidos, constatou-se uma tendência nas diferenças dos resultados entre a ferramenta NHSS e o *software* R. Pôde notar, para p-valores inferiores a 0,0093, um incremento considerável nas diferenças percentuais entres os resultados chegando a 100%. Além disso, o mesmo comportamento foi constatado para p-valores superiores a

0,5355, onde se verificou uma diferença percentual de até -52%. Devido a essas diferenças maiores nos extremos, constatou-se uma diferença média absoluta entre NHSS e R de 20,85%.

Entretanto, ao analisar especificamente os p-valores obtidos no Minitab, é possível verificar que os programadores do *software* limitaram o fornecimento dessa informação. Para p-valores inferiores a 0,01 e superiores 0,15, os resultados são representados, respectivamente, como as desigualdades $<0,01$ e $>0,15$. Então, aplicando-se esse tipo de critério na apresentação dos resultados fornecidos pela ferramenta computacional, a diferença média entre NHSS e R cairia para 4,14% considerando apenas os p-valores entre 0,01 e 0,15.

É importante destacar que o principal objetivo do p-valor é servir como parâmetro de comparação com os níveis de significância 0,01, 0,05 e 0,10, que permitem a determinação da hipótese verdadeira para o teste. Níveis de significância muito maiores equivalem a testes com baixa confiança estatística ($\text{Significância} = 0,05 \Leftrightarrow \text{Confiança} = 0,95$), portanto, as informações de p-valores muito acima de 0,15 ou muito abaixo de 0,01 vão fornecer a mesma conclusão para qualquer nível de significância exposto anteriormente.

Por fim, a variação do p-valor não afetará a conclusão do teste de normalidade da ferramenta computacional *NH Sediment and Statistic* tendo em vista que a programação e levantamento da conclusão depende exclusivamente dos valores críticos tabelados D_{crit} e dos valores de estatística Kolmogorov-Smirnov (D_n), conforme Figura 93, onde $D_n < D_{crit}$ indicam dados Normais e $D_n > D_{crit}$ indicam dados Não-Normais.

Figura 93 - Parte do código do teste de normalidade referente à conclusão do teste

```

Sheets("Tela3").TB_EstatisticaKS.Value = Dn
Sheets("Tela3").TB_pvalue.Value = pvalue

If Dn < Dcrit Then
  Sheets("Tela3").TB_Conclusao.Value = "NORMAL"
Else
  Sheets("Tela3").TB_Conclusao.Value = "NÃO-NORMAL"
End If
Cells(6, 15).Select
End Sub

```

Fonte: Autor

5.3.3. Verificação da acurácia do teste F de Fisher-Snedecor

Nas Figuras 94 e 95 estão apresentados os resultados do teste F para os conjuntos de dados SS_C C1 e SS_E C1-1A obtidos, respectivamente, por meio dos *softwares* R e Minitab.

Figura 94 – Resultados do teste F para os dados SS_C C1 vs. SS_E C1-1A obtidos pelo software R

```

RGui (64-bit)
Arquivo  Editar  Visualizar  Misc  Pacotes  Janelas  Ajuda

R Console
> a<-c(6.6,6.8,7.5,7.6,7.8,8.8,9.3,10.0,11.2,12.7,14.0,14.0,15.0,16.0,16.0,17.0)
> b<-c(4.2,4.4,6.5,4.2,4.6,6.2,6.1,6.8,7.0,8.2,7.8,8.1,10.0,9.5,19.8,18.9,10.5,5
>
> var.test(a,b,alternative="two.sided")

      F test to compare two variances

data:  a and b
F = 0.90343, num df = 54, denom df = 54, p-value = 0.7104
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.5269407 1.5489020
sample estimates:
ratio of variances
 0.9034265
  
```

Fonte: Adaptado de The R Foundation (2018)

Figura 95 – Resultados do teste F para os dados SS_C C1 vs. SS_E C1-1A obtidos pelo software Minitab

Teste e IC para Duas Variâncias: SS_C C1; SS_E C1-1A

Método

σ_1 : desvio Padrão de SS_C C1

σ_2 : desvio Padrão de SS_E C1-1A

Razão: σ_1/σ_2

O método F foi usado. Esse método é preciso apenas para dados normais.

Estatísticas Descritivas

Variável	N	DesvPad	Variância	IC de 95% para σ^2
SS_C C1	55	11,756	138,207	(97,952; 209,721)
SS_E C1-1A	55	12,360	152,765	(108,270; 231,812)

Teste

Hipótese nula $H_0: \sigma_1^2 / \sigma_2^2 = 1$

Hipótese alternativa $H_a: \sigma_1^2 / \sigma_2^2 \neq 1$

Nível de significância $\alpha = 0,05$

Método	Estatística de teste	GL1	GL2	Valor-p
F	0,90	54	54	0,714

Fonte: Adaptado de Minitab Inc (2018b)

Os demais resultados relevantes para os cenários 1, 2 e 3 empregando o R e Minitab podem ser consultados nas Tabelas 31 e 32. Além disso, a partir das simulações nestes outros

dois *softwares* (R e Minitab), comparou-se com a Ferramenta Computacional NHSS os valores de estatística F e p-valor, apresentados nestas mesmas tabelas, e ordenados em ordem crescente em relação aos resultados da ferramenta NHSS para melhor interpretação dos resultados.

Tabela 31 – Comparações entre os valores de Estatística F obtidos na Ferramenta Computacional NHSS, e nos *softwares* R e Minitab

Grupo de dados testados		F - NHSS	F - R	F - Minitab	Diferença entre R e NHSS	Diferença entre Minitab e NHSS	Diferença entre R e Minitab	Diferença entre R e NHSS (%)	Diferença entre Minitab e NHSS (%)	Diferença entre R e Minitab (%)
T1A	T1C	0,1679	0,1687	0,1700	0,00081	0,00210	-0,00129	0,480%	1,235%	-0,765%
T5A	T16B	0,3759	0,3774	0,3800	0,00148	0,00410	-0,00262	0,392%	1,079%	-0,694%
T5A	T9A	0,3790	0,3791	0,3800	0,00008	0,00100	-0,00092	0,021%	0,263%	-0,243%
SS _C C2	SS _E C2-1A	0,8498	0,8498	0,8500	0,00003	0,00020	-0,00017	0,004%	0,024%	-0,020%
SS _C C1	SS _E C1-1A	0,9047	0,9034	0,9000	-0,00127	-0,00470	0,00343	-0,141%	-0,522%	0,380%
SS _C C2	SS _E C2-3	0,9725	0,9728	0,9700	0,00027	-0,00250	0,00277	0,028%	-0,258%	0,285%
SS _C C2	SS _E C2-1B	0,9786	0,9786	0,9800	-0,00001	0,00140	-0,00141	-0,001%	0,143%	-0,144%
SS _C C2	SS _E C2-2	1,1472	1,1469	1,1500	-0,00030	0,00280	-0,00310	-0,026%	0,243%	-0,270%
SS _C C2	SS _E C2-1C	1,2347	1,2335	1,2300	-0,00120	-0,00470	0,00350	-0,097%	-0,382%	0,284%
SS _C C1	SS _E C1-3	1,2656	1,2651	1,2700	-0,00050	0,00440	-0,00490	-0,040%	0,346%	-0,387%
T5A	T19C	1,2928	1,2928	1,2900	0,00000	-0,00280	0,00280	0,000%	-0,217%	0,217%
T16B	T19C	3,4390	3,4257	3,4400	-0,01330	0,00100	-0,01430	-0,388%	0,029%	-0,417%
Média dos valores absolutos					0,00160	0,00264	0,00343	0,13%	0,40%	0,34%

Fonte: Autor

Tabela 32 – Comparações entre os p-valores obtidos na Ferramenta Computacional NHSS, e nos *softwares* R e Minitab

Grupo de dados testados		p-valor -NHSS	p-valor - R	p-valor - Minitab	Diferença entre R e NHSS	Diferença em Minitab e NHSS	Diferença entre R e Minitab	Diferença entre R e NHSS (%)	Diferença entre Minitab e NHSS (%)	Diferença entre R e Minitab (%)
T1A	T1C	0,0312	0,03166	0,0310	0,00046	-0,00020	0,00066	1,45%	-0,65%	2,08%
T16B	T19C	0,1583	0,1596	0,1580	0,00130	-0,00030	0,00160	0,81%	-0,19%	1,00%
T5A	T16B	0,2590	0,2608	0,2590	0,00180	0,00000	0,00180	0,69%	0,00%	0,69%
T5A	T9A	0,2628	0,2629	0,2630	0,00010	0,00020	-0,00010	0,04%	0,08%	-0,04%
SS _C C1	SS _E C1-3	0,3895	0,3904	0,3900	0,00090	0,00050	0,00040	0,23%	0,13%	0,10%
SS _C C2	SS _E C2-1C	0,5027	0,5046	0,5030	0,00190	0,00030	0,00160	0,38%	0,06%	0,32%
SS _C C2	SS _E C2-1A	0,6047	0,6048	0,6050	0,00010	0,00030	-0,00020	0,02%	0,05%	-0,03%
SS _C C2	SS _E C2-2	0,6622	0,6629	0,6620	0,00070	-0,00020	0,00090	0,11%	-0,03%	0,14%
SS _C C1	SS _E C1-1A	0,7142	0,7104	0,7140	-0,00380	-0,00020	-0,00360	-0,53%	-0,03%	-0,51%
T5A	T19C	0,7631	0,7631	0,763	0,00000	-0,00010	0,00010	0,00%	-0,01%	0,01%
SS _C C2	SS _E C2-3	0,9292	0,9300	0,9290	0,00080	-0,00020	0,00100	0,09%	-0,02%	0,11%
SS _C C2	SS _E C2-1B	0,9452	0,9451	0,9450	-0,00010	-0,00020	0,00010	-0,01%	-0,02%	0,01%
Média dos valores absolutos					0,00100	0,00022	0,00101	0,36%	0,11%	0,42%

Fonte: Autor

Como foi possível observar na Tabela 31, os valores de estatística F para a ferramenta computacional e os dois *softwares* utilizados se mostraram aproximadamente iguais, sendo a maior variação encontrada de 1,24% (T1A vs. T1C entre Minitab e NHSS). Além disso, adotando R como *software* padrão de comparação pela sua utilização nos diversos trabalhos científicos, e comparando as médias dos valores absolutos, constatou-se que diferença média entre o R e a ferramenta computacional foi de 0,13% enquanto entre o R e o Minitab essa diferença foi de 0,34%. Isso indica que a ferramenta computacional NHSS apresentou resultados mais acurados que o *software* Minitab em relação ao R.

Os resultados de p-valores mostrados na Tabela 32 também foram bem próximos entre os programas, com variação máxima de 1,45% também entre T1A vs. T1C (entre R e NHSS). As demais comparações apresentaram, em sua maioria, variações inferiores a 0,81%. Vale destacar que foi possível verificar um leve aumento nas diferenças percentuais conforme a diminuição dos p-valores. Geralmente as estimativas de valores extremos tendem a aumentar essa variação, como constatado nos p-valores dos testes de normalidade. Entretanto, essa variação no teste F de Fisher-Snedecor foi mínima, não comprometendo a conclusão do teste.

Sendo assim, com base nesses resultados de comparações, pode-se afirmar que os resultados obtidos pela ferramenta computacional NH *Sediment and Statistic* está bem acurada para realização do teste F visando comparação de duas variâncias.

5.3.4. Verificação da acurácia do teste T de Student

A verificação dos resultados do teste paramétrico T de Student também foram realizados para os dados dos cenários 1 a 3. Nas Figuras 96 e 97 estão apresentados os resultados do teste T de Student para os pares de conjuntos de dados SS_C C1 e SS_E C1-1A obtidos, respectivamente, por meio dos *softwares* R e Minitab.

Posteriormente às simulações nestes outros dois *softwares* (R e Minitab), comparou-se com a Ferramenta Computacional NHSS os valores de estatística T e p-valor, apresentados respectivamente nas Tabelas 33 e 34, e ordenados em ordem crescente em relação aos resultados da ferramenta NHSS visando melhor análise destas comparações e identificação de anomalias. Vale lembrar que todos os resultados úteis obtidos no R e Minitab estão sintetizados nestas mesmas tabelas.

Figura 96 – Resultados do teste T de Student para os dados SS_C C1 vs. SS_E C1-1A obtidos pelo software R

Fonte: Adaptado de The R foundation (2018)

Figura 97 – Resultados do teste T de Student para os dados SS_C C1 vs. SS_E C1-1A obtidos pelo software Minitab

Teste T Pareado e IC: SSC C1; SSE C1-1A

Estatísticas Descritivas				
Amostra	N	Média	DesvPad	EP Média
SSC C1	55	24,12	11,76	1,59
SSE C1-1A	55	20,69	12,36	1,67

Estimativa da diferença pareada			
Média	DesvPad	EP Média	IC de 95% da
			diferença_μ
3,434	5,716	0,771	(1,889; 4,979)
diferença_μ: média de (SSC C1 - SSE C1-1A)			

Teste	
Hipótese nula	H ₀ : diferença_μ = 0
Hipótese alternativa	H ₁ : diferença_μ ≠ 0
Valor-T	Valor-p
4,46	0,000

Fonte: Adaptado de Minitab Inc (2018b)

Tabela 33 – Comparações entre os valores de Estatística T de Student obtidos na Ferramenta Computacional NHSS, no software livre R e no software Minitab

Grupo de dados testados		T - NHSS	T - R	T - Minitab	Diferença entre R e NHSS	Diferença entre Minitab e NHSS	Diferença entre R e Minitab	Diferença entre R e NHSS (%)	Diferença entre Minitab e NHSS (%)	Diferença entre R e Minitab (%)
SSC C2	SSE C2-1A	-1,5737	-1,5730	-1,570	0,00070	0,00370	-0,00300	-0,045%	-0,236%	0,191%
SSC C1	SSE C1-3	-0,0075	-0,0075	0,000*	-0,00001	0,00750	-0,00751	0,142%	-	-
SSC C2	SSE C2-3	0,7203	0,7211	0,720	0,00075	-0,00030	0,00105	0,104%	-0,042%	0,146%
SSC C2	SSE C2-1B	0,8300	0,8290	0,830	-0,00100	0,00000	-0,00100	-0,121%	0,000%	-0,121%
T5A	T16B	1,1627	1,1814	1,1600	0,01870	-0,00270	0,02140	1,583%	-0,233%	1,811%
SSC C2	SSE C2-2	1,4210	1,4151	1,420	-0,00590	-0,00100	-0,00490	-0,417%	-0,070%	-0,346%
T5A	T9A	2,0929	2,0949	2,0900	0,00200	-0,00290	0,00490	0,095%	-0,139%	0,234%
T16B	T19C	2,2465	2,2364	2,2500	-0,01010	0,00350	-0,01360	-0,452%	0,156%	-0,608%
SSC C1	SSE C1-1A	4,4559	4,4623	4,460	0,00640	0,00410	0,00230	0,143%	0,092%	0,052%
SSC C2	SSE C2-1C	4,6680	4,6806	4,670	0,01260	0,00200	0,01060	0,269%	0,043%	0,226%
T1A	T1C	7,4721	7,4753	7,4700	0,00320	-0,00210	0,00530	0,043%	-0,028%	0,071%
T5A	T19C	10,8381	10,8380	10,8400	-0,00010	0,00190	-0,00200	-0,001%	0,018%	-0,018%
Média dos valores absolutos					0,00512	0,00264	0,00646	0,28%	0,10%	0,35%

(*) Valores nulos apresentados pelo software Minitab

Tabela 34 – Comparações entre os p-valores obtidos na Ferramenta Computacional NHSS, no software livre R e no software Minitab para o teste T de Student

Conjunto de dados testados		p-valor (NHSS)	p-valor (R)	p-valor - Minitab	Diferença entre R e NHSS	Diferença entre Minitab e NHSS	Diferença entre R e Minitab	Diferença entre R e NHSS (%)	Diferença entre Minitab e NHSS (%)	Diferença entre R e Minitab (%)
SSC C2	SSC C2-1C	3,00E-05	3,11E-05	0,0000*	1,14E-06	-0,00003	0,00003	3,66%	-	-
T5A	T19C	3,65E-05	3,65E-05	0,0000*	4,00E-08	-0,00004	0,00004	0,11%	-	-
SSC C1	SSC C1-1A	4,00E-05	4,16E-05	0,0000*	0,00000	-0,00004	0,00004	3,78%	-	-
T1A	T1C	0,0001	0,0001	0,0000*	2,00E-07	-0,00014	0,00014	0,14%	-	-
T16B	T19C	0,0658	0,0667	0,0660	0,00092	0,00024	0,00068	1,38%	0,36%	1,02%
T5A	T9A	0,0813	0,0811	0,0810	-0,00022	-0,00027	0,00005	-0,27%	-0,33%	0,06%
SSC C2	SSC C2-1A	0,1232	0,1234	0,1230	0,00017	-0,00023	0,00040	0,14%	-0,19%	0,32%
SSC C2	SSC C2-2	0,1629	0,1646	0,1630	0,00172	0,00012	0,00160	1,04%	0,07%	0,97%
T5A	T16B	0,2891	0,2821	0,2890	-0,00700	-0,00010	-0,00690	-2,48%	-0,03%	-2,45%
SSC C2	SSC C2-1B	0,4114	0,4119	0,4110	0,00053	-0,00037	0,00090	0,13%	-0,09%	0,22%
SSC C2	SSC C2-3	0,4755	0,4750	0,4750	-0,00045	-0,00045	0,00000	-0,09%	-0,09%	0,00%
SSC C1	SSC C1-3	0,9988	0,9940	0,9990	-0,00476	0,00024	-0,00500	-0,48%	0,02%	-0,50%
Média dos valores absolutos					0,00131	0,00019	0,00131	1,14%	0,15%	0,69%

(*) Valores nulos apresentados pelo software Minitab

É possível verificar que tanto para os valores de estatística T quanto para os p-valores, as variações foram mínimas, comprovando a acurácia do teste T de Student na ferramenta Computacional NH *Sediment and Statistic*.

Em relação aos valores de estatística T na Tabela 33, a maior variação entre a ferramenta computacional e os *softwares* R e Minitab foi de 1,583%. Além disso, comparando-se as médias dos valores absolutos, verificou-se que a diferença média entre o R e a ferramenta computacional foi de 0,28% enquanto entre o R e o Minitab esse valor foi 0,35%. Isso mostra que os resultados da ferramenta desenvolvida foram melhores que o Minitab considerando o *software* R como padrão de comparação.

Analisando os p-valores da Tabela 34 se constatou uma baixa variação absoluta média de 1,14% (ferramenta NHSS x R) e 0,15% (ferramenta NHSS x Minitab). Mesmo com a tendência de aumento do erro para p-valores inferiores, essa variação não foi superior 4%, comprovando que os p-valores da ferramenta computacional NHSS são confiáveis.

5.3.5. Verificação da acurácia do teste Wilcoxon

Em relação à verificação dos resultados obtidos para o teste Wilcoxon, inicialmente, apresenta-se nas Figuras 98 e 99 os resultados do teste Wilcoxon para os pares de conjuntos de dados SS_C C1 e SS_E C1-2 obtidos, respectivamente, por meio dos *softwares* R e Minitab 18.

Figura 98 – Resultados do teste Wilcoxon para os dados SS_C C1 vs. SS_E C1-2 obtidos pelo *software* R

```

RGui (64-bit)
Arquivo  Editar  Visualizar  Misc  Pacotes  Janelas  Ajuda

R Console
> library(ggpubr)
Carregando pacotes exigidos: ggplot2
Carregando pacotes exigidos: magrittr
>
> a<-c(6.6,6.8,7.5,7.6,7.8,8.8,9.3,10.0,11.2,12.7,14.0,14.0,15.0,16.0,16.0,17.0$
> b<-c(5.9,6.1,7.9,5.9,12.0,13.2,13.7,12.3,8.4,14.4,13.8,9.5,16.0,16.7,20.0,19.$
>
> wilcox.test(a,d,alternative="t",paired=TRUE)

      Wilcoxon signed rank test with continuity correction

data:  a and d
V = 750, p-value = 0.8702
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
  
```

Fonte: Adaptado de The R Foundation (2018)

Figura 99 – Resultados do teste Wilcoxon para os dados SSC C1 vs. SSE C1-2 obtidos pelo software Minitab

Teste de Postos Sinalizados de Wilcoxon: SSC C1 - SSE C1-2

Método

η : mediana de SSC C1 - SSE C1-2

Estatísticas Descritivas

Amostra	N	Mediana
SSC C1 - SSE C1-2	55	-0,0914925

Teste

Hipótese nula $H_0: \eta = 0$

Hipótese alternativa $H_1: \eta \neq 0$

Amostra	N para Teste	Estatística de Wilcoxon	Valor-p
SSC C1 - SSE C1-2	55	749,00	0,864

Fonte: Adaptado de Minitab Inc. (2018b)

A síntese dos resultados de estatística T^+ obtidos nestas análises para todos cenários estão apresentados na Tabela 35. Nota-se na comparação entre a ferramenta NHSS e o *software* R que os resultados foram praticamente iguais, sendo 0,13% a maior variação encontrada. Entretanto, comparando NHSS com o Minitab se constatou 63,16% de variação para os pares (T6C, T12C). Apesar disso, de acordo com a distribuição exata T^+ do teste Wilcoxon (Anexo F), os valores críticos T_{inf} e T_{sup} para $n=9$ e $\alpha=0,05$ são 6 e 39. Portanto, seja para $T^+=14$ ou $T^+=38$ obtidos respectivamente na ferramenta NHSS e software Minitab, a desigualdade $T_{inf} \leq T^+ \leq T_{sup}$ é verdadeira, logo ambos programas concluirão que a hipótese nula de igualdade de medianas é verdadeira.

Tabela 35 – Comparações entre os valores de Estatística T^+ de Wilcoxon obtidos na Ferramenta Computacional NHSS, no *software* livre R e no *software* Minitab

Grupo de dados testados		T^+ - NHSS	T^+ - R	T^+ - Minitab	Diferença entre R e NHSS	Diferença entre Minitab e NHSS	Diferença entre R e Minitab	Diferença entre R e NHSS (%)	Diferença entre Minitab e NHSS (%)	Diferença entre R e Minitab (%)
T6C	T12C	14	14	38	0,00	24,00	-24,00	0,00%	63,16%	-171,43%
T7A	T16A	16	16	16	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%
T1B	T16C	36	36	36	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%
T8B	T8A	45	45	45	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%
T8B	T12C	45	45	45	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%
SSC C1	SSE C1-2	749	750	749	1,00	0,00	1,00	0,13%	0,00%	0,13%
Média dos valores absolutos					0,16667	4,00000	4,16667	0,02%	10,53%	28,59%

Fonte: Autor

Já na Tabela 36 estão os resultados de p-valor obtidos pelos programas computacionais para o teste Wilcoxon. Diferentemente dos outros testes estatísticos, a variação não só foi maior como também variou significativamente entre os programas impossibilitando a comparação. Além disso, constatou-se que para p-valores maiores, a diferença entre a ferramenta NHSS e o *software* R chegou a 0,76% enquanto entre a ferramenta e o *software* Minitab foi de apenas 0,05%, ilustrando que o erro obtido neste caso também está relacionado com o tamanho dos p-valores.

Tabela 36 – Comparações entre os p-valores do teste Wilcoxon obtidos na Ferramenta Computacional NHSS, no *software* livre R e no *software* Minitab

Conjunto de dados testados		p-valor (NHSS)	p-valor (R)	p-valor - Minitab	Diferença entre R e NHSS	Diferença entre Minitab e NHSS	Diferença entre R e Minitab	Diferença entre R e NHSS (%)	Diferença entre Minitab e NHSS (%)	Diferença entre R e Minitab (%)
T1B	T16C	0,0010	0,0078	0,0140	0,007	0,013	-0,006	87,66%	93,11%	-79,19%
T8B	T8A	0,0073	0,0039	0,0090	-0,003	0,002	-0,005	-86,89%	18,89%	-130,41%
T8B	T12C	0,0073	0,0039	0,0090	-0,003	0,002	-0,005	-86,89%	18,89%	-130,41%
T6C	T12C	0,1689	0,3428	0,0760	0,174	-0,093	0,267	50,73%	-122,24%	77,83%
T7A	T16A	0,7511	0,8125	0,8000	0,061	0,049	0,013	7,56%	6,11%	1,54%
SSC C1	SSE C1-2	0,8636	0,8702	0,8640	0,007	0,000	0,006	0,76%	0,05%	0,71%
Média dos valores absolutos					0,04259	0,02644	0,05031	53,42%	43,21%	70,02%

Fonte: Autor

É importante destacar que a determinação dos p-valores do teste Wilcoxon é extremamente complexa e relativa principalmente para tamanhos amostrais inferiores a 50. Diferentemente de tamanhos amostrais $n > 50$, onde o teste Wilcoxon pode ser aproximado para a distribuição Normal que facilita os cálculos de p-valor, para $n \leq 50$, deve-se seguir o quadro da distribuição exata T^+ como a apresentada no Quadro 31.

Quadro 31 - Parte da distribuição exata T^+ do teste Wilcoxon

Valores T^+ relacionados com tamanho da amostra (n) e probabilidade (p)																	
n\p (%)	0,5	1	2,5	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	97,5	99	99,5
4	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10	10	10
5	0	0	0	1	3	4	5	6	7,5	9	10	11	12	14	15	15	15
6	0	0	1	3	4	6	8	9	10,5	12	13	15	17	18	20	21	21
7	0	1	3	4	6	9	11	12	14	16	17	19	22	24	25	27	28
8	1	2	4	6	9	12	14	16	18	20	22	24	27	30	32	34	35
9	2	4	6	9	11	15	18	20	22,5	25	27	30	34	36	39	41	43

Fonte: Autor

Em muitos casos, um mesmo valor de estatística é assumido para várias probabilidades (p), como por exemplo para $n=6$, em que $T^+=0$ acontece para $p=0,5\%$ e $p=1\%$, assim como $T^+=21$ que ocorre para valores p de 99% e $99,5\%$. Logo, determinar a probabilidade associada ao $T^+=0$ (p -valor) pode variar de estimativa para estimativa. Um exemplo dessa dificuldade está ilustrado na Figura 100 que se refere aos resultados do teste Wilcoxon para os pares de dados de temperatura (T6C, T12C) obtidos pelo *software* R. Nela se pode observar que o próprio R deixa uma mensagem de aviso alertando que não foi possível computar o p -valor exato. Além disso, diversos estudos apontam estimativas diferentes do p -valor como os algoritmos de Hothorn e Lausen (2003), Lehman (1961) e Yeo (2017).

Figura 100 – Resultados do teste Wilcoxon para os dados de temperatura T6C x T12C obtidos pelo *software* R

```
> wilcox.test(p,r,alternative="t",paired=TRUE)

      Wilcoxon signed rank test with continuity correction

data:  p and r
V = 14, p-value = 0.3428
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0

Warning message:
In wilcox.test.default(p, r, alternative = "t", paired = TRUE) :
  não é possível computar o valor de p exato com o de desempate
```

Fonte: Autor

Sendo assim, o levantamento das conclusões do teste Wilcoxon por meio do p -valor não é tão recomendado, sendo considerado apenas os valores de estatística T^+ e os críticos $T_{\inf}$ e $T_{\sup}$ para essa conclusão na ferramenta computacional *NH Sediment and Statistic*, conforme código apresentado na Figura 101.

Figura 101 - Parte do código referente ao teste Wilcoxon na Ferramenta computacional NHSS

```
If T < Tinf Or T > Tsup Then
  Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_Conclusão.Value = "Rejeita-se Hipótese nula Ho"
  Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_Conclusão.Value = "Rejeita-se Hipótese nula Ho"
Else
  Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_Conclusão.Value = "Não se rejeita Hipótese nula Ho"
  Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_Conclusão.Value = "Não se rejeita Hipótese nula Ho"
End If
```

Fonte: Autor

Apesar dos p -valores do teste Wilcoxon apresentarem valores com maiores variações, o fato dos valores de estatística T^+ serem compatíveis principalmente com o *software* R indica

que as conclusões dos testes serão apresentadas corretamente, tornando o teste na ferramenta computacional NHSS confiável e aplicável nesse quesito.

Por fim, segundo Campos (2000), diferentemente dos testes paramétricos onde se deve ter certeza da normalidade dos dados para sua aplicação, quando um pesquisador utiliza testes não-paramétricos, supõe-se que a distribuição de seus dados experimentais seja não-normal, ou que ele não tenha elementos suficientes para poder afirmar que seja. Logo, quando há dúvidas da distribuição dos dados, recomenda-se a utilização da estatística não-paramétrica como o Teste Wilcoxon, o que torna esse tipo de teste muito importante.

5.3.6. Diferenciais da ferramenta computacional NH *Sediment and Statistic*

Nos itens anteriores desta tese foi possível verificar que, em geral, os testes estatísticos da ferramenta computacional desenvolvida (NH *Sediment and Statistic*) apresentaram resultados adequados e próximos aos apresentados pelos *softwares* R e Minitab. Diferentemente destes *softwares* que são exclusivamente estatísticos, a ferramenta permite o usuário trabalhar com testes estatísticos e métodos de cálculos hidrossedimentológicos, sendo única nesse caso.

Outro detalhe importante é que a ferramenta computacional é livre, de código aberto e de fácil utilização, além de contar com um manual explicando cada um dos métodos e testes implementados (Figura 102). Na Figura 103, por exemplo, está apresentado a descrição dos parâmetros estatísticos implementados na ferramenta para caso o usuário tenha interesse de conhecer quais as equações e procedimentos envolvidos no cálculo.

Figura 102 - Tela inicial do manual da ferramenta computacional

Figura 103 – Descrição do cálculo de parâmetros estatísticos implementado no manual da ferramenta computacional

8. Cálculo de parâmetros estatísticos

Os parâmetros estatísticos implementados na ferramenta computacional são utilizados para avaliação da eficiência de modelos e comparação de dados. Dentre os mais utilizados, estão os parâmetros estatísticos sugeridos por Lengnick e Fox (1994), Loague e Green (1991), Sentelhas et al. (1997), Zacharias, Heatwole e Coakley (1996) e Santos et al. (2012) tais como Coeficiente de ajuste (CA) (Equação 1), Eficiência (EF) (Equação 2), Coeficiente de massa residual (CMR) (Equação 3), Desvio do quadrado médio da raiz (RMSD) (Equação 4), erro máximo (ME) (Equação 5) e diferença média (MD) (Equação 6).

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

$$CRM = \frac{|\sum_{i=1}^n (O_i) - \sum_{i=1}^n (P_i)|}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \quad (3)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$ME = \max_i |O_i - P_i| \quad (5)$$

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{n} \quad (6)$$

Em que: i = índice de O; O_i = valor observado; P_i = valor estimado; $\bar{O}$ = média dos valores observados; n = espaço amostral.

VOLTAR AO INÍCIO

Para utilização da ferramenta computacional NHSS não é necessário de conhecimento prévio de nenhuma linguagem computacional como o R. Apesar de ser também um *software* livre e de domínio público, para aplicação do R se deve conhecer a linguagem para poder executar os comandos, além da busca por pacotes contendo funções ou comandos de interesse, que muitas vezes não são fáceis de encontrar. Além disso, o R trabalha com o ponto decimal como separador numérico, diferente do empregado no Brasil, onde se utiliza a vírgula decimal. Isso obriga o usuário a ter que converter os dados, e colocá-los no formato correto da linguagem, enquanto na ferramenta computacional, os dados podem ser inseridos diretamente sem conversão alguma, otimizando tempo.

Por fim, apesar da ferramenta computacional ter sido desenvolvida visando suporte para os estudos hidrossedimentológicos, a divisão da ferramenta em módulos possibilita a utilização do módulo estatístico em outros tipos de dados como hidrológicos, pluviométricos, fluviométricos, e até mesmo dados de outras áreas que necessitem de análises estatísticas, confirmando a multidisciplinariedade da ferramenta computacional NH *Sediment and Statistic*.

6. CONCLUSÕES

A estatística é uma ciência importante que se dedica à coleta, análise e interpretação de dados, e sua aplicação em estudos e análises hidrossedimentológicas está diretamente relacionada às decisões a serem tomadas, auxiliando gestores no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos.

Devido às poucas opções de *softwares* estatísticos de acesso livre e gratuitos, de fácil aplicação e voltados aos estudos hidrossedimentológicos, a ferramenta computacional desenvolvida (NH *Sediment and Statistic*) é um importante instrumento de auxílio na gestão dos recursos hídricos abrangendo métodos hidrossedimentológicos e estatísticos. Ainda possibilita agilidade nos cálculos, pois a ferramenta conta com módulos distintos que permitem ao usuário, com pouco domínio estatístico, aplicar seus resultados obtidos no módulo hidrossedimentológico diretamente no módulo estatístico sem a necessidade da compra ou aquisição de outro *software*.

O módulo hidrossedimentológico permite a caracterização do transporte de sedimentos em corpos hídricos e a identificação de pontos de deposição e variações temporais na descarga sólida. Os valores obtidos são condizentes com outros *softwares*, mostrando a confiabilidade do módulo da ferramenta computacional.

A metodologia proposta para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão a partir de outros parâmetros empregando a ferramenta computacional é útil e auxilia na determinação de melhores métodos para essa finalidade. As relações funcionais lineares entre turbidez *versus* SS_C e SS_L *versus* SS_C obtidas por meio de procedimentos estatísticos da ferramenta computacional se mostraram satisfatórias para a maioria dos cenários.

Corroborando a isso, a aplicação dos parâmetros estatísticos implementados na ferramenta desenvolvida também são úteis e sugerem a adoção dos cenários C1-2 e C2-3 para a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão. A utilização destas relações se confirmou segura e aplicável, já que, estatisticamente, a igualdade dos dados estimados e medidos é verdadeira, assegurando, assim, a eficiência das sondas multiparâmetro e *Laser in Situ Scattering and Transmissiometry* na mensuração da concentração de sedimentos em suspensão para o reservatório.

Apesar das diferenças pontuais de p-valores no teste Wilcoxon, os resultados dos testes estatísticos Kolmogorov-Smirnov para normalidade, F de Fisher-Snedecor e T de Student implementados na ferramenta computacional são concordantes com os outros *softwares*, garantindo segurança aos usuários.

Desta forma e com base em todos os cálculos realizados podemos concluir que a ferramenta computacional NH *Sediment and Statistic* alcança resultados equivalentes aos diferentes *softwares* para cada um dos módulos estatísticos e hidrossedimentológicos, podendo-se inclusive afirmar que além de ser confiável, possui interface amigável ao usuário, e apresenta manual para todos os testes e métodos implementados, o que torna sua utilização simples e prática.

Por fim, ressalta-se também que as metodologias utilizadas no estudo de caso podem ser replicadas para outros locais com características semelhantes, proporcionando mais informações para a gestão e planejamento de recursos hídricos.

7. RECOMENDAÇÕES

Como sugestões de trabalhos futuros que possam complementar esse estudo e a ferramenta computacional, recomenda-se:

- Implementar métodos hidrossedimentológicos que permitam o cálculo da descarga sólida de fundo e arrasto na ferramenta computacional NH *Sediment and Statistic*;
- Realizar novos levantamentos de dados visando aprimoramento nos resultados, principalmente, do teste não-paramétrico Wilcoxon para comparação de medianas;
- Implementar gráficos de probabilidade e histogramas para os testes estatísticos da ferramenta computacional fornecendo um *upgrade* no módulo estatístico da ferramenta computacional NH *Sediment and Statistic*;
- Utilizar esta ferramenta computacional em outras áreas de estudo visando comparações e melhorias nos módulos hidrossedimentológicos e estatísticos;
- Estudar as limitações e riscos envolvidos no uso de p-valores para levantamento de conclusões dos testes estatísticos.

REFERÊNCIAS

- AES TIETÊ. **Pequena central hidrelétrica Mogi-Guaçu**. 2018. Disponível em: <<https://www.aestiete.com.br/quem-somos/nossas-plantas/>>. Acesso em: 27 set. 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Orientações para operação de estações hidrométricas**. Brasília: ANA, 2012.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Capacidade de geração do estado de São Paulo**. 2018. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/ResumoEstadual/GeracaoTipoFase.asp>>. Acesso em: 27 set. 2018.
- AGRAWAL, Y. C.; POTTS SMITH, H. C. Laser diffraction particle sizing in stress. **Continental Shelf Research**, v. 14, n. 10-11, p. 1101-1121, Aug./Sept. 1994.
- _____. Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport. **Marine Geology**, v. 168, n. 1-4, p. 89-114, Aug. 2000.
- AGRICULTURE, COMMERCE, DEFENSE, INTERIOR DEPARTMENTS. **National handbook of recommended methods for water-data acquisition sediment**. Washington: US Geological Survey, 1978. Cap. 3.
- ALBERTIN, L. L.; MATOS, A. J. S.; MAUAD, F. F. Cálculo do volume e análise da deposição de sedimentos do reservatório de Três Irmãos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, n. 4, p. 57-67, 2010.
- ALONSO, C. V.; NEIBLING, W. H.; FOSTER, G. R. Estimating sediment transport capacity in watershed modeling. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 24, n. 5, p. 1211-1220, 1981.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for examination of water and wastewater**. 19thed. Washington: APHA, 1995.
- AMERICAN SOCIETY PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. Positional accuracy standards for digital geospatial data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 81, n. 3, p. A1-A26, 2015.
- ANACHE, J. A. A.; BACCHI, C. G. V.; ALVES SOBRINHO, T. **Perdas de solo e produção de sedimentos em bacia hidrográfica: uma abordagem distribuída**. Anais do XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. João Pessoa: ABRH. 2014. p. 1-15.
- ANACHE, J. A. A. et al. Assessment of methods for predicting soil erodibility in soil loss modeling. **Geociências**, São Paulo, v. 34, n. 1, p. 32-40, 2015.
- ANDERSON, T. W.; DARLING, D. A. A Test of goodness of fit. **Journal of the American Statistical Association**, v. 49, n. 268, p. 765-769, 1954.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.664: Águas - determinação de resíduos (sólidos) - método gravimétrico - método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 1989.

BEEN, K.; SILLS, G. Self-weight consolidation of soft soils: an experimental and theoretical study. **Geotechnique**, v. 31, n. 4, p. 519–535, Dec. 1981.

BENT-AL, A.; SHAMAILOV, S. S.; PATON, J. F. R. Central regulation of heart rate and the appearance of respiratory sinus arrhythmia: New insights from mathematical modeling. **Mathematical Biosciences**, v. 255, p. 71-82, 2014.

BERLAMONT, J. et al. The Characterisation of cohesive sediment properties. **Coastal Engineering**, Amsterdam, v. 21, n. 1-3, p. 105-128, Dec. 1993.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 4.ed. São Paulo: Icone, 1999.

BIEDENHARN, D. S.; THORNE, C. R.; WATSON, C. C. **Wash load/bed material load concept in regional sediment management**. In: FEDERAL INTERAGENCY SEDIMENTATION CONFERENCE, 8., Reno, 2006. **Proceedings...** [S.l.:s.n.], 2006. p. 8.

BLAIN, G. C. Revisiting the critical values of the lilliefors test: towards the correct agrometeorological use of the Kolmogorov-Smirnov framework. **Bragantia**, Campinas, v. 73, n. 2, p. 192-202, 2014.

BOX, G. E. P. Non-normality and tests on variances. **Biometrika**, v. 40, n. 3-4, p. 318-335, Dec. 1953.

BRANCO, S. M.; ROCHA, A. A. **Poluição, proteção e usos múltiplos de represas**. São Paulo: Edgard Blucher; CETESB, 1977.

CAMPAGNOLI, F. The Production of the sediment of the south america continent: propose of mapping of the erosion rates based on geological and geomorphological aspects. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, v. 7, n. 1, p. 3-8, 2006.

CAMPOS, G. M. **Estatística prática para docentes e pós-graduandos: a escolha do teste mais adequado**, 2000. Disponível em:<http://www.forp.usp.br/restauradora/gmc/gmc_livro/gmc_livro_cap14.html>. Acesso em: 8 jan. 2019.

CAPECHE, C. L. et al. Degradação do solo e da água: impactos da erosão e estratégias de controle. In: TAVARES, S. R. D. L. **Curso de recuperação de áreas degradadas: a visão da ciência do solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2008. Cap. 5, p. 105-132.

CARR, M. L.; REHMANN, C. R. Measuring the dispersion coefficient with acoustic doppler current profilers. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 133, n. 8, p. 977-982, Aug. 2007.

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

CARVALHO, N. O. et al. **Guia de práticas sedimentométricas**. Brasília: ANEEL, 2000.

CASSOL, E. A. et al. Erosividade e padrões hidrológicos das chuvas de Ijuí (RS) no período de 1963 a 1993. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 15, n. 3, p. 220-231, 2007.

CHANSON, H.; JAMES, P. Rapid reservoir sedimentation of historic thin arch dams in Australia. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 12, n. 2, p. 85-92, 1998.

COIADO, E. M. Assoreamento de reservatórios. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001. Cap. 14, p. 395-426.

COLBY, B. R. Relationship of unmeasured sediment discharge to mean velocity. **Transactions, American Geophysical Union**, v. 38, n. 5, p. 708-717, 1957.

COLBY, B. R.; HEMBREE, C. H. **Computations of total sediment discharge Niobrara River near Cody, Nebraska**. Washington: United States Government Printing Office, 1955.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MOGI-GUAÇU. **Plano da bacia hidrográfica 2008-2011**. São Paulo: CBH Mogi, 2008.

_____. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2015 (ano base 2014)**. São Paulo: CBH Mogi, 2015.

_____. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2018 (ano base 2017)**. São Paulo: CBH Mogi, 2018.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Relatório de qualidade das águas interiores do Estado de São Paulo**: apêndice B, 2014. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/blog/2010/07/23/relatorios-da-cetesb-apontam-tendencias-dos-indices-de-qualidade-ambiental-registradas-em-2009/>>. Acesso em: 16 nov. 2018.

CONOVER, W. J. **Practical Nonparametric statistics**. 3rded. New York: John Wiley, 1999.

CONTADOR, J. L.; SENNE, E. L. F. Testes não paramétricos para pequenas amostras de variáveis não categorizadas: um estudo. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 23, n. 3, p. 1-12, 2016.

CRUZ, L. M.; RODRIGUES, S. C. Avaliação do potencial de produção de sedimentos para a PCH Piedade - Monte Alegre de Minas/MG. **Caminhos da Geografia**, Uberlândia, v. 14, n. 47, p. 54-73, 2013.

CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. **Geomorfologia do Brasil**. 2.ed. Rio de Janeiro: Bertrand, 2001.

CURTIS, W. F.; CULBERTSON, J. K.; CHASE, E. B. **Fluvia-sediment discharge to the oceans from the conterminous United States**: geological survey circular 670. Washington: Department of the Interior; U. S. Geological Survey, 1973.

CZUBA, J. A. et al. Comparison of fluvial suspended-sediment concentrations and particle-size distributions measured with in-stream laser diffraction and in physical samples. **Water Resources Research**, v. 51, n. 1, p. 230-340, 2015.

DALLAL, G. E.; WILKINSON, L. An Analytic approximation to the distribution of lilliefors's test statistic for normality. **The American Statistician**, v. 40, n. 4, p. 294-296, 1986.

DAPHNE, L. H. X.; UTOMO, H. D.; KENNETH, L. Z. H. Correlation between turbidity and total suspended solids in singapore rivers. **Journal of Water sustainability**, v. 1, n. 3, p. 313-322, 2011.

DAVIES, E. J. et al. LISST-100 response to large particles. **Marine Geology**, v. 307-310, p.177-122, Apr. 2012.

DEINES, K. L. Backscatter estimation using broadband acoustic doppler current profilers. In: WORKING CONFERENCE ON CURRENT MEASUREMENT, 6., 1999, San Diego. **Proceedings...** San Diego: [s.n.], 1999. v. 99, CH36331, p. 249-253.

DEVORE, J. L. **Probability and statistics for engineering and the sciences**. São Paulo: Cengage Learning, 2006.

DINEHART, R. L.; BURAU, J. R. Repeated surveys by acoustic doppler current profiler for flow and sediment dynamics in a tidal river. **Journal of Hydrology**, v. 314, n. 1-4, p. 1-21, 2005.

DIPLAS, P. et al. Sediment transport measurements. In: GARCIA, M.H. (Ed.). **Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling, and practices**. Reston: ASCE, 2008. Cap. 5, p. 307-354. (The ASCE manuals and reports on engineering practice, n.110).

DOUZIECH, M. et al. Quantifying variability in removal efficiencies of chemicals in activated sludge wastewater treatment plants – a meta-analytical approach. **Environ. Sci. Processes Impacts**, v. 20, p. 171-182, 2018.

DOWNING, J. Twenty-five years with OBS sensors: the good, the bad and the ugly. **Continental Shelf Research**, v. 6, n. 17-18, p. 2299-2318, Nov. 2006.

DU, Y.; SONG, X. A On-site monitoring system of reservoir sediment for three gorges. In: JIN, D.; LIN, S. (Ed.). **Advances in electronic engineering, comunication and management**. Berlin: Springer, 2012. v. 1, p. 29-38. (Lectures Notes in Electrical Engineering, 139).

DURAES, M. F.; MELLO, C. R.; BESKOW, S. Sediment yield in Paraopeba River Basin - MG, Brazil. **International Journal of River Basin Management**, v. 14, n. 4, p. 367-377, 2016.

EDWARDS, T. K.; GLYSSON, G. D. Field methods for measurement of fluvial sediment. In: **USGS Techniques of water-resources investigation of the United States Geological Survey**. Reston: USGS, 1999.

EINSTEIN, H. A. **The Bed-load function for sediment transportation in open channel flows**. Washington: U.S. Department of Agriculture, 1950. (Technical Bulletin, n. 1026).

ELMOUDEN, A. et al. Dams siltation and soil erosion in the souss–massa River Basin. In: ALLAH, R. C., et al. **The Handbook of environmental chemistry: the souss-massa River Basin, Morocco**. Berlin: Springer, 2016. Cap. 4, p. 1-26.

EMMERICH, W.; MARCONDES, M. A. P. Algumas características do manejo de bacias hidrográficas. **Boletim Técnico IBDF**, 1975.

ESTIGONI, M. V. et al. Fundamentos teóricos sobre modelagem de transporte de sedimentos coesivos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 10., 2012, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABRH, 2012. CD-ROM.

EVERITT, B. S.; SKRONDAL, A. **The Cambridge dictionary of statistics**. 4thed. New York: Cambridge University Press, 2010.

FELIX, D.; ALBAYRAK, I.; BOES, R. M. Laboratory investigation on measuring suspended sediment by portable laser diffractometer (LISST) focusing on particle shape. **Geo Marine Letters**, v. 33, n. 6, p. 485-498, 2013.

FILIPPA, L. et al. Laboratory evaluation of two LISST-25X using river sediments. **Sedimentary Geology**, v. 238, n. 3-4, p. 268-276, 2011.

FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L. The Use of doppler technology for suspended sediment discharge determination in the River Amazonas. **Hydrological Sciences Journal**, v. 49, n. 1, p. 143-153, 2004.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The state of th world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW)** - managing systems at risk. London: Rome and Earthscan, 2011.

FRIEDMAN, M. The Use of ranks to avoid the assumption of normality implicit in the analysis of variance. **Journal of the American Statistical Association**, v. 32, n. 200, p. 675-701, 1937.

FUNDAÇÃO PARA O INCREMENTO DA PESQUISA E DO APERFEIÇOAMENTO INDUSTRIAL. **Desenvolvimento, validação e aplicação de um modelo tridimensional de transporte de sedimentos em reservatório aplicado ao cálculo e elaboração de projeções futuras de geração hidrelétrica**. São Carlos. 2015.

GARCÍA, M. H. Modeling sediment entrainment into suspension, transport, and deposition in rivers. In: ANDERSON, M. G.; BATES, P. D. **Model validation: perspectives in hydrological science**. Chichester: John Wiley, 2001. Cap. 14.

_____. Sediment transport and morphodynamics. In: GARCIA, M.H. (Ed.). **Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling, and practices**. Reston: ASCE, 2008. Cap. 2, p. 21-163. (The ASCE manuals and reports on engineering practice, n.110).

GARTNER, J. W. Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic doppler current profiler in San Francisco Bay, California. **Marine Geology**, v. 211, n. 3-4, p.169-187, Oct. 2004.

GARTNER, J. W. et al. Laboratory and field evaluations of the LISST-100 instrument for suspended particle size determinations. **Marine Geology**, v. 175, n. 1-4, p.199-219, Mar. 2001.

GHAFFARI, P. et al. Estimating suspended sediment concentrations using a broadband ADCP in Mahshahr tidal channe. **Ocean Science Discussion**, v. 8, n. 4, p. 1601-1630, 2011.

GIPPEL, C. J. Potencial of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams. **Hydrological Processes**, v. 9, n. 1, p. 83-97, Jan. 1995.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável**. Porto Alegre: UFRGS, 2001.

GOLTERMAN, H. L.; SLY, P. G.; THOMAS, R. L. **Study of the relationship between water quality and sediment transport**. Paris: UNESCO, 1983.

GOOGLE EARTH. Imagem do reservatório da PCH Mogi-Guaçu de 16/10/2017. 2017. Disponível em: <<http://maps.google.com.br>>. Acesso em: 11 nov. 2018.

GRAY, J. R.; LANDERS, M. N. Measuring suspended sediment. In: AHUJA, S. **Comprehensive water quality and purification**. Reston: Elsevier, 2014. v. 1, p. 157-204.

GUERRERO, M. et al. A Combined use of acoustic and optical devices to investigate suspended sediment in rivers. **Advances in Water Resources**, v. 102, p. 1-12, Apr. 2017.

HAPP, S. C. Sediment transportation Mechanics. In: VANONI, V. A. **Sedimentation Engineering**. Reston: American Society of Civil Engineers, 1975. Cap. 2, p. 171-175.

HAUN, S. et al. Three-dimensional measurements and numerical modelling of suspended sediments in a hydropower reservoir. **Journal of Hydrology**, v. 479, p. 180-188, Feb. 2013.

HOLEMAN, J. N. The Sediment yield of major rivers of the world. **Water Resources Research**, v. 4, n. 4, p. 737-747, 1968.

HOTELLING, H.; PABST, M. R. Rank correlation and tests of significance involving no assumption of normality. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 7, n. 1, p. 29-43, 1936.

HOTHORN, T. LAUSEN, B. On The Exact distribution of maximally selected ranks statistics. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 43, n. 1, p. 121-137, May 2003.

HUANG, J.; HILLDALE, R. C.; GREIMANN, B. P. Cohesive sediment transport. In: INTERIOR, U. S. D. O. T. **Erosion and sedimentation manual** - reclamation. Denver: U. S. Department of the Interior, 2006. Cap. 4, p. 1-54.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Dados do censo 2010**. 2010. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 5 out. 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13320**: Particle size analysis: laser diffraction methods. Geneva: ISO, 2009.

IZAGIRRE, O. et al. Effects of sediment deposition on periphytic biomass, photosynthetic activity and algal community structure. **Science of the Total Environment**, v. 407, n. 21, p. 5694-5700, 2009.

JORDÃO, C. P. et al. Contaminação de sedimentos fluviais por metais pesados nas proximidades de uma indústria metalúrgica em Minas Gerais. **Geochimica Brasiliensis**, v. 1, n. 4, p. 9-15, 1990.

KARIM, F. Bed material discharge prediction for nonuniform bed sediments. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 124, n. 6, p.597-604, June 1998.

KINNELL, P. I. A. Event soil loss, runoff and the universal soil loss equation family of models: a review. **Journal of Hydrology**, v. 385, n. 1-4, p. 384-397, May 2010.

KOLMOGOROV, A. N. Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione. **Giornale dell'Istituto Italiano degli Attuari**, v. 4, p. 83-91, 1933.

KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. **Journal of the American Statistical Association**, v. 47, n. 260, p. 583-621, 1952.

LAI, S. Y. J.; CAPART, H. Reservoir infill by hyperpycnal deltas over bedrock. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 8, p. 1-6, 2009.

LARSON, R.; FARBER, B. **Elementary statistics**. 4thed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

LEHMAN, S. Y. Exact and approximate distributions for the wilcoxon statistic with ties. **Journal of the American Statistical Association**, v. 56, n. 294, p. 293-298, 1961.

LENGNICK, L. L.; FOX, R. H. Simulation by NCSWAP of seasonal nitrogen dynamics in corn: I. soil nitrate. **Agronomy Journal**, v. 86, n. 1, p. 167-175, 1994.

LI, K. et al. Problems caused by the three gorges dam construction in the Yangtze River basin: a review. **Environmental Reviews**, v. 21, n. 3, p. 127-135, 2013.

LILLIEFORS, H. W. On the Kolmogorov-smirnov test for normality with mean and variance unknown. **Journal of the American Statistical Association**, v. 62, n. 318, p. 399-402, 1967.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. Seleção de modelos para o traçado de curvas granulométricas de sedimentos em suspensão em rios. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 101-107, 2007.

LOAGUE, K.; GREEN, R. E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 7, n. 1-2, p. 51-73, 1991.

MACARTHUR, R. C. et al. Overview of sedimentation engineering. In: GARCIA, M.H. (Ed.). **Sedimentation engineering**: processes, measurements, modeling, and practices. Reston: ASCE, 2008. Cap. 1, p. 1-20. (The ASCE manuals and reports on engineering practice, n.110).

MAGALHÃES FILHO, F. J. C.; AYRES, F. M.; ALVES SOBRINHO, T. Integrando SIG e USLE para mapeamento da perda de solo em área de proteção ambiental. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 7, n. 26, p. 552-559, 2014.

MAHMOOD, K. **Reservoir sedimentation**: impact, extend and mitigation. Washington: The World Bank, 1987.

MALVERN PANALYTICAL. **Difração laser (LD, Laser diffraction)**. 2018. Disponível em:<<https://www.malvernpanalytical.com/br/products/technology/light-scattering/laser-diffraction>>. Acesso em: 27 dez. 2018.

MAMA, C. N.; OKAFOR, F. O. Siltation in reservoirs. **Nigerian Journal of Technology**, v. 30, n. 1, p. 85-90, 2011.

MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On a Test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 18, n. 1, p. 50-60, 1947.

MARTINEZ, J. M. et al. Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data. **Catena**, v. 79, n. 4, p. 257-264, 2009.

MASSEY, F. J. Distribution table for the deviation between two sample cumulatives. **Annals of Mathematical Statistics**, v. 23, n. 3, p. 435-441, 1952.

MERTEN, G. H.; POLETO, C. Rede de monitoramento e coleta de amostras. In: POLETO, C.; MERTEN, G. H. **Qualidade dos sedimentos**. 2.ed. Porto Alegre: ABRH, 2013. Cap. 1, p. 19-45.

MEYER-PETER, E.; MULLER, R. Formulas for bed load transport. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC STRUCTURES RESEARCH, 2., 1948, Delft. **Proceedings...** [S.l.]: IAHR, 1948. v. 2, p. 39-64.

MILLER, L. H. Table of percentage points of Kolmogorov statistics. **Journal of American Statistic Association**, v. 51, n. 273, p. 111-121, 1956.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; MAGNAGO, P. F. Análise qualitativa e quantitativa da histerese entre vazão e concentração de sedimentos durante eventos hidrológicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 12, p. 1306-1313, 2011.

MINITAB INC. Exemplo de obtenção e interpretação de um valor-p. 2017. Disponível em:<<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/basics/example-of-getting-and-interpreting-a-p-value/>>. Acesso em: 31 out. 2018.

MINITAB INC. Methods and formulas for 1-Sample Wilcoxon. 2018a. Disponível em: <<https://support.minitab.com/en-us/minitab-express/1/help-and-how-to/basic-statistics/inference/how-to/one-sample/1-sample-wilcoxon/methods-and-formulas/methods-and-formulas/>>. Acesso em: 5 dez. 2018.

MINITAB INC. Sobre o MINITAB 18. 2018b. Disponível em: <<http://www.minitab.com/pt-br/products/minitab/>>. Acesso em: 31 dez. 2018.

MIRANDA, R. B. **Ferramenta computacional para a estimativa de parâmetros hidrossedimentológicos em reservatório: estudo de caso da PCH Mogi-Guaçu (SP)**. 2015. 226p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

MIRANDA, R. B.; MAUAD, F. F. Influence of sedimentation on hydroelectric power generation: case study of a brazilian reservoir. **Journal of Energy Engineering**, v. 141, n. 3, p. 1-7, 2015.

MIRANDA, R. B. et al. Ferramenta computacional para determinação da descarga sólida de sedimento por meio do método simplificado de Colby. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 25., 2014, Santiago. **Anais...** Madrid: IAHR/AIIH, 2014.

MIRANDA, R. B. et al. Water erosion in Brazil and in the world: a brief review. **Modern Environmental Science and Engineering**, v. 1, n. 1, p. 17-26, 2015.

MITCHELL, M. et al. Engauge digitizer: version 10.11. 2018. Disponível em: <<https://markumitchell.github.io/engauge-digitizer/>>. Acesso em: 24 nov. 2018.

MOLIN, P.; ABDI, H. **Nem table and numerical approximations for kolmogorov-smirnov/lilliefors/van soest normality test**. Dijon: University of Bourgogne; Richaardson: University of Texas at Dallas, 1998. (Technical Report).

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. **Estatística básica**. 6.ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

MORGAN, R. P. C. et al. The european soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for prediction sediment transport from fields and small catchments. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 23, n. 6, p. 527-544, June 1998.

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

MULLER, A. C. **Hidrelétricas, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: Makron Books, 1995.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. D. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

NAGY, H. M.; WATANABLE, 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, June 2002.

NASCIMENTO, D. C. et al. Teste de normalidade em análises estatísticas: uma orientação para praticantes em ciências da saúde e atividade física **Revista Mackenzie de Educação Física e Esporte**, v. 14, n. 2, 2015, p.73-77.

NEARING, M. A. et al. Prediction technology for soil erosion by water: status and research needs. **Soil Science Society of American Journal**, v. 54, n. 6, p. 1702-1711, Nov./Dec. 1990.

NYSTROM, E. A.; REHMANN, C. R.; OBERG, K. A. Evaluation of mean velocity and turbulence measurements with ADCPs. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 133, n. 12, p. 1310-1318, 2007. Special issue.

Ocaya, R. O. A current-voltage-temperature method for fast extraction of schottky diode static parameters. **Measurement**, v. 49, p. 246-255, 2014.

OLIVEIRA, A. R. M. et al. Estimation on the concentration of suspended solids from turbidity in the water of two sub-basins in the doce river basin. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 5, p. 751-759, 2018.

OLIVEIRA, P. T. S. **Zoneamento ambiental no planejamento e gestão de bacias hidrográficas**. 2011. 79p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2011.

OLIVEIRA, P. T. S. et al. Processo analítico hierárquico aplicado a vulnerabilidade natural a erosão. **Geociências**, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 417-424, 2009.

PAIVA, E. M. C. D. Métodos de estimativa da produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001. Cap. 13, p. 365-394.

PAIVA, J. B. D. **Avaliação dos modelos matemáticos de cálculo do transporte de sedimentos em rios**. 1988. 315p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1988.

_____. Métodos de cálculo do transporte de sedimentos em rios. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001. Cap. 12, p. 313-364.

PANACHUKI, E. et al. 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, 2006.

PEARSON, E. S.; PLEASE, N. W. Relation between the shape of population distribution and the robustness of four simple test statistics. **Biometrika**, v. 62, n. 2, p. 223-241, Aug. 1975.

PORTAL ACTION. **P-valor**. 2018a. Disponível em:

<www.portalaction.com.br/inferencia/512-calculo-e-interpretacao-do-p-valor>. Acesso em: 16 out. 2018.

_____. **Técnicas não paramétricas**. 2018b. Disponível em:

<<http://www.portalaction.com.br/tecnicas-nao-parametricas>>. Acesso em: 6 nov. 2018.

_____. **Teste para comparação de duas variâncias (Teste F)**. 2018c. Disponível em: <<http://www.portalection.com.br/inferencia/56-teste-para-comparacao-de-duas-variancias-teste-f>>. Acesso em: 14 set. 2018.

_____. **Análise dos resíduos**. 2018d. Disponível em: <<http://www.portalection.com.br/analise-de-regressao/analise-dos-residuos>>. Acesso em: 5 jan. 2019.

RANDLE, T. J.; YANG, C. T.; DARAIO, J. Erosion and sedimentation. In: UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR **Erosion and sedimentation manual - reclamation: managing water in the west**. Denver: U. S. Department of the Interior, 2006. Cap. 2, p. 1-94.

RENARD, K. G. et al. **Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. Washington: U. S. Department of Agriculture, 1997. (Agriculture Handbook, 703).

ROSA, L. H.; BERLING, F. A. **Software WinTSR**. Santa Maria: Centro de tecnologia. Departamento de Hidráulica e Saneamento; Universidade Federal de Santa Maria, 2002.

ROSSI, M. **Mapa pedológico do estado de São Paulo: revisado e ampliado**. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. v.1

RÜGNER, H. et al. Turbidity as a proxy for total suspended solids (TSS) and particle facilitated pollutant transport in catchments. **Environmental Earth Sciences**, v. 69, n. 2, p. 373-380, 2013.

SANTOS, B. B. **Estudo da concentração de sedimentos em suspensão no reservatório de Mogi-Guaçu (SP)**. 2015. 102p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

SANTOS, B. B. et al. Avaliação de métodos de estimativas de descarga sólida de leito em rios. In: POLETO, C. et al. **X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos: artigos selecionados**. Porto Alegre: ABRH, 2012. Cap. 26, p. 345-355.

SANTOS, B. B. et al. Evaluation of the laser diffraction method for the measurement of suspended sediment concentration in Mogi-Guaçu reservoir (São Paulo, Brazil). **International Journal of River Basin Management**, Mar 2018, DOI: <https://doi.org/10.1080/15715124.2018.1446965>

SCAPIN, J. **Caracterização do transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano na cidade de Santa Maria - RS**. 2005. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

SCAPIN, J.; PAIVA, J. B. D. D.; BELING, F. A. Avaliação de métodos de cálculo do transporte de sedimentos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 4, p. 5-21, 2007.

SCHEUERLEIN, H. Removal of sediment deposits in reservoirs by means of flushing. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER RESOURCES IN MOUNTAINOUS REGIONS, 1990, Lausanne. **Proceedings of two Lausanne Symposia**. Lausanne: IAHS, 1990. v. 194, p. 99-106.

SCHLEISS, A. J. et al. Reservoir sedimentation. **Journal of Hydraulic Research**, v. 54, n. 6, p. 595-614, 2016.

SENTELHAS, P. C. et al. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estações convencionais e automáticas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 2, p. 215-221, 1997.

SEQUOIA. LISST 100X: submersible particle size analyzer. 2013. Disponível em: <<http://www.sequoiasci.com/wp-content/uploads/2013/07/LISST-100X.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2018.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of variance teste for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3-4, p. 591-611, Dec. 1965.

SHIELDS, F. D.; RIGBY, J. R. River habitat quality from river velocities measured using acoustic doppler current profiler. **Environmental Management**, v. 36, n. 4, p. 565-575, 2005.

SILVA, R. C. V.; WILSON JÚNIOR., G. **Hidráulica fluvial**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2005.

SMIRNOV, V. I. Estimate of deviation between empirical distributions. **Bulletin Moscow University**, v. 2, p. 3-16, 1939.

SPIEGEL, M. R. **Estatística**. 3.ed. São Paulo: Makron Books, 1993.

STEPHENS, M. A. EDF Statistics for goodness of fit and some comparisons. **Journal of the American Statistical Association**, v. 69, n. 347, p. 730-737, 1974.

STEVENS, H. H.; YANG, C. T. **Summary and use of selected fluvial sediment-discharge formulas**. Colorado: U. S. Geological Survey, 1989. (Water Resources Investigation Report 89-4026).

SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION. **Determination on fluvial sediment discharge**. Minneapolis: Project Scaff of Cooperating Agencies, 1963. (Report n. 14).

SYVITSKI, J. P. M. et al. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. **Science**, v. 308, n. 5720, p. 376-380, Apr. 2005.

THE R FOUNDATION. **The R Project for Statistical Computing**. 2018. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. Acesso em: 13 nov. 2018.

THODE JUNIOR, H. C. **Testing for normality**. New York: Marcel Dekker, 2002. v.164.

THORNE, P. D.; HARDCASTLE, P. J.; SOULSBY, R. L. Analysis of acoustic measurements of suspended sediments. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n. C1, p. 899-910, 1993.

TOMAZONI, J. C. et al. Utilização de medidas de turbidez na quantificação da movimentação de sólidos por veiculação hídrica nas bacias dos rios Anta Gorda, Brinco, Coxilha rica e Jirau - Sudoeste do Estado do Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 57, p. 49-56, 2005.

TOPPING, D. J. et al. High-resolution monitoring of suspended-sediment concentration and grain size in the Colorado River in Grand Canyon using a laser- diffraction instruments and three-frequency acoustic system. In: FEDERAL INTERAGENCY SEDIMENTATION CONFERENCE, 8./ FEDERAL INTERAGENCY HYDROLOGIC MODELING CONFERENCE, 3., 2006, Reno. **Proceedings...** Washington: U.S.Department of the Interior; U./S.Geological Survey, 2006. p. 539-546.

TRAYKOVSKI, P.; LATTER, R. J.; IRISH, J. D. A Laboratory evaluation of the laser in situ scattering and transmissometry instrument using natural sediments. **Marine Geology**, v.159, n. 1-4, p.355-367, July 1999.

UNITES STADES DEPARTAMENT OF AGRICULTURE. **Soil survey staff, keys to soil taxonomy**. 8thed. Washington: Natural Resources Conservation Service, 1998.

UNIVERSITY OF MARYLAND. Sedimentation and stratigraphy. 2017. Disponível em: <<https://www.geol.umd.edu/~jmerck/geol342/lectures/04.html>>. Acesso em: 24 dez. 2018.

UNVERRICHT, D. et al. Suspended sediment dynamics during the inter-monsoon season in the subaqueous Mekong Delta and adjacent shelf, southern Vietnam. **Journal of Asian Earth Sciences**, v. 79, part A, p. 509-519, Jan. 2014.

VANONI, V. A. Sediment transportation Mechanics. In: GARCIA, M.H. (Ed.). **Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling, and practices**. Reston: ASCE, 2008. Cap. 2, p. 17-292. (The ASCE manuals and reports on engineering practice, n.110).

VESTANA, L. R. Análise da dinâmica hidrossedimentológica em uma bacia hidrográfica no sul do Brasil. **Sociedade e Natureza**, v. 21, n. 3, p. 413-424, 2009.

VIEIRA, S. **Introdução à bioestatística**. 3.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

WHITE, R. **Evacuation of sediments from reservoirs**. London: Thomas Telford, 2001.

WILCOXON, F. Individual comparisons by ranking methods. **Biometrics Bulletin**, v. 1, n. 6, p. 80-83, 1945.

WILLIAMS, N. D.; WALLING, D. E.; LEEKS, G. J. L. High temporal resolution in situ measurement of the effective particle size characteristics of fluvial suspended sediment. **Water Research**, v. 41, n. 5, p. 1081-1093, 2007.

WILLIAMSON, T. N.; CRAWFORD, C. G. Estimation of suspended sediment concentration from total suspended solids and turbidity data for kentucky. **Journal of American Water Resources Association**, v. 47, n. 4, p. 739-749, 2011.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predictiong rainfall erosion losses. A guide to conservation planing**. Washington: USDA, 1978. (Agriculture Handbook, 537).

WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E.; GOODRICH, D. C. **KINEROS, a kinematic runoff and erosion model**: documentation and user manual. Washington: U. S. Departament of Agriculture; Agricultural Research Service, 1990. (ARS-77).

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to hydrological practices**: data acquisition and processing. Geneva: WMO, 1981. v.1. (Report n. 168).

_____. **Manual on sediment management and measurement**. Geneva: WMO, 2003. (WMO, n. 948).

_____. **Guide to hydrological practices**. 6thed. Geneva: WMO, 2008a. (WMO, n. 168).

_____. **Developments in hydrometric technology**: new and emerging instruments for mapping river hydrodynamics. 2008b. Disponível em:<<https://public.wmo.int/en/bulletin/developments-hydrometric-technology-new-and-emerging-instruments-mapping-river>>. Acesso em: 29 dez. 2018.

WU, J. et al. Three-gorges dam - experiment in habitat fragmentation?. **Science**, v. 300, n. 5623, p. 1239-1240, 2003.

XAVIER, B. C. et al. Estimation of suspended sediment concentration by acoustic scattering: an experimental and theoretical analysis for spherical particles. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, n.8, p. 1325-1333, Aug. 2014.

XIAU, L. et al. Laboratory application of laser grain-size analyzer in determining suspended sediment concentration. **Journal of Ocean University of China**, v. 13, n. 3, p.375-380, June 2014.

YANG, C. T. Incipient motion and sediment transport. **Journal of Hydraulic Division**, v. 99, n. 10, p. 1679-1704, 1973.

YANG, X.; LU, X. X. Estimate of cumulative sediment trapping by multiple reservoirs in large river basins: an example of the Yangtze River basin. **Geomorphology**, v. 227, p. 49-59, Dec. 2014.

YAZICI, B.; YOLOCAN, S. A Comparison of various tests for normality. **Journal of Statistical Computatuin and Simulation**, v. 77, n. 2, p. 175-183, 2007.

YEO, I. An Algorithm for computing the exact distribution of the wilcoxon signed-rank statistic. **Journal of the Korean Statistical Society**, v. 46, n. 3, p.1-11, 2017.

YOUNG, R. A. et al. Acoustic profiling of suspended sediments in the marine boundary layer. **Geophysical Research Letters**, v. 9, n. 3, p. 175-178, 1982.

YSI. 6-Series: multiparameter water quality sondes. 2012. Disponível em: <<https://www.ysi.com/File%20Library/Documents/Manuals/069300-YSI-6-Series-Manual-RevJ.pdf>>. Acesso em: 19 nov. 2018.

ZACHARIAS, S.; HEATWOLE, C. D.; COAKLEY, C. W. Robust quantitative techniques for validating pesticide transport models. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 39, n. 1, p. 47-54, 1996.

ANEXO A – Distribuição normal padrão

Quadro 32 – Distribuição normal padrão $Z \sim N(0,1)$ para valores z negativos e positivos

Função de probabilidade acumuladas p tal que $p = P(0 < Z < z)$										
z	Segunda casa decimal de z									
	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
-3,0	0,0013	0,0013	0,0013	0,0012	0,0012	0,0011	0,0011	0,0011	0,0010	0,0010
-2,9	0,0019	0,0018	0,0018	0,0017	0,0016	0,0016	0,0015	0,0015	0,0014	0,0014
-2,8	0,0026	0,0025	0,0024	0,0023	0,0023	0,0022	0,0021	0,0021	0,0020	0,0019
-2,7	0,0035	0,0034	0,0033	0,0032	0,0031	0,0030	0,0029	0,0028	0,0027	0,0026
-2,6	0,0047	0,0045	0,0044	0,0043	0,0041	0,0040	0,0039	0,0038	0,0037	0,0036
-2,5	0,0062	0,0060	0,0059	0,0057	0,0055	0,0054	0,0052	0,0051	0,0049	0,0048
-2,4	0,0082	0,0080	0,0078	0,0075	0,0073	0,0071	0,0069	0,0068	0,0066	0,0064
-2,3	0,0107	0,0104	0,0102	0,0099	0,0096	0,0094	0,0091	0,0089	0,0087	0,0084
-2,2	0,0139	0,0136	0,0132	0,0129	0,0125	0,0122	0,0119	0,0116	0,0113	0,0110
-2,1	0,0179	0,0174	0,0170	0,0166	0,0162	0,0158	0,0154	0,0150	0,0146	0,0143
-2,0	0,0228	0,0222	0,0217	0,0212	0,0207	0,0202	0,0197	0,0192	0,0188	0,0183
-1,9	0,0287	0,0281	0,0274	0,0268	0,0262	0,0256	0,0250	0,0244	0,0239	0,0233
-1,8	0,0359	0,0351	0,0344	0,0336	0,0329	0,0322	0,0314	0,0307	0,0301	0,0294
-1,7	0,0446	0,0436	0,0427	0,0418	0,0409	0,0401	0,0392	0,0384	0,0375	0,0367
-1,6	0,0548	0,0537	0,0526	0,0516	0,0505	0,0495	0,0485	0,0475	0,0465	0,0455
-1,5	0,0668	0,0655	0,0643	0,0630	0,0618	0,0606	0,0594	0,0582	0,0571	0,0559
-1,4	0,0808	0,0793	0,0778	0,0764	0,0749	0,0735	0,0721	0,0708	0,0694	0,0681
-1,3	0,0968	0,0951	0,0934	0,0918	0,0901	0,0885	0,0869	0,0853	0,0838	0,0823
-1,2	0,1151	0,1131	0,1112	0,1093	0,1075	0,1056	0,1038	0,1020	0,1003	0,0985
-1,1	0,1357	0,1335	0,1314	0,1292	0,1271	0,1251	0,1230	0,1210	0,1190	0,1170
-1,0	0,1587	0,1562	0,1539	0,1515	0,1492	0,1469	0,1446	0,1423	0,1401	0,1379
-0,9	0,1841	0,1814	0,1788	0,1762	0,1736	0,1711	0,1685	0,1660	0,1635	0,1611
-0,8	0,2119	0,2090	0,2061	0,2033	0,2005	0,1977	0,1949	0,1922	0,1894	0,1867
-0,7	0,2420	0,2389	0,2358	0,2327	0,2296	0,2266	0,2236	0,2206	0,2177	0,2148
-0,6	0,2743	0,2709	0,2676	0,2643	0,2611	0,2578	0,2546	0,2514	0,2483	0,2451
-0,5	0,3085	0,3050	0,3015	0,2981	0,2946	0,2912	0,2877	0,2843	0,2810	0,2776
-0,4	0,3446	0,3409	0,3372	0,3336	0,3300	0,3264	0,3228	0,3192	0,3156	0,3121
-0,3	0,3821	0,3783	0,3745	0,3707	0,3669	0,3632	0,3594	0,3557	0,3520	0,3483
-0,2	0,4207	0,4168	0,4129	0,4090	0,4052	0,4013	0,3974	0,3936	0,3897	0,3859
-0,1	0,4602	0,4562	0,4522	0,4483	0,4443	0,4404	0,4364	0,4325	0,4286	0,4247
0,0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5606	0,5675	0,5714	0,5753
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
0,6	0,7257	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
0,7	0,7580	0,7611	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
1,0	0,8413	0,8438	0,8461	0,8585	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,9015
1,3	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9137	0,9147	0,9162	0,9177
1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,9370	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441

Função de probabilidade acumuladas p tal que $p = P(0 < Z < z)$										
z	Segunda casa decimal de z									
	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
1,6	0,9452	0,9463	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545
1,7	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633
1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,9750	0,9756	0,9761	0,9767
2,0	0,9772	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
2,1	0,9821	0,9826	0,9830	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,9850	0,9854	0,9857
2,2	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,9890
2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916
2,4	0,9918	0,9920	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
2,5	0,9938	0,9940	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
2,6	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,9960	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
2,7	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,9970	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
2,8	0,9974	0,9975	0,9976	0,9977	0,9977	0,9978	0,9979	0,9979	0,9980	0,9981
2,9	0,9981	0,9982	0,9982	0,9983	0,9984	0,9984	0,9985	0,9985	0,9986	0,9986
3,0	0,9987	0,9987	0,9987	0,9988	0,9988	0,9989	0,9989	0,9989	0,9990	0,9990

ANEXO B – Valores críticos para a estatística do Teste Kolmogorov-Smirnov

Quadro 33 – Valores críticos da estatística Kolmogorov-Smirnov para uma amostra

Tamanho da amostra (n)	Nível de significância para Dn				
	$\alpha=0,20$	$\alpha=0,15$	$\alpha=0,10$	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$
1	0,900	0,925	0,950	0,975	0,995
2	0,684	0,726	0,776	0,842	0,929
3	0,565	0,597	0,642	0,708	0,828
4	0,494	0,525	0,564	0,624	0,733
5	0,446	0,474	0,510	0,565	0,669
6	0,410	0,436	0,470	0,521	0,618
7	0,381	0,405	0,438	0,486	0,577
8	0,358	0,381	0,411	0,457	0,543
9	0,339	0,360	0,388	0,432	0,514
10	0,322	0,342	0,368	0,410	0,490
11	0,307	0,326	0,352	0,391	0,468
12	0,295	0,313	0,338	0,375	0,450
13	0,284	0,302	0,325	0,361	0,433
14	0,274	0,292	0,314	0,349	0,418
15	0,266	0,283	0,304	0,338	0,404
16	0,258	0,274	0,295	0,328	0,392
17	0,250	0,266	0,286	0,318	0,381
18	0,244	0,259	0,278	0,309	0,371
19	0,237	0,252	0,272	0,301	0,363
20	0,231	0,246	0,264	0,294	0,356
25	0,210	0,220	0,240	0,270	0,320
30	0,190	0,200	0,220	0,240	0,290
35	0,180	0,190	0,210	0,230	0,270
> 35	$1,07/\sqrt{n}$	$1,14/\sqrt{n}$	$1,22/\sqrt{n}$	$1,36/\sqrt{n}$	$1,63/\sqrt{n}$

ANEXO C – Distribuição Qui-Quadrado

Quadro 34 – Valores críticos da distribuição Qui-Quadrado

GL	Valores críticos da distribuição Qui-Quadrado									
	Cauda esquerda					Cauda direita				
	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,9	0,95	0,975	0,990	0,995
1	7,879	6,635	5,024	3,841	2,706	0,016	0,004	0,001	0,000	0,000
2	10,597	9,210	7,378	5,991	4,605	0,211	0,103	0,051	0,020	0,010
3	12,838	11,345	9,348	7,815	6,251	0,584	0,352	0,216	0,115	0,072
4	14,860	13,277	11,143	9,488	7,779	1,064	0,711	0,484	0,297	0,207
5	16,750	15,086	12,832	11,070	9,236	1,610	1,145	0,831	0,554	0,412
6	18,548	16,812	14,449	12,592	10,645	2,204	1,635	1,237	0,872	0,676
7	20,278	18,475	16,013	14,067	12,017	2,833	2,167	1,690	1,239	0,989
8	21,955	20,090	17,535	15,507	13,362	3,490	2,733	2,180	1,647	1,344
9	23,589	21,666	19,023	16,919	14,684	4,168	3,325	2,700	2,088	1,735
10	25,188	23,209	20,483	18,307	15,987	4,865	3,940	3,247	2,558	2,156
11	26,757	24,725	21,920	19,675	17,275	5,578	4,575	3,816	3,053	2,603
12	28,300	26,217	23,337	21,026	18,549	6,304	5,226	4,404	3,571	3,074
13	29,819	27,688	24,736	22,362	19,812	7,041	5,892	5,009	4,107	3,565
14	31,319	29,141	26,119	23,685	21,064	7,790	6,571	5,629	4,660	4,075
15	32,801	30,578	27,488	24,996	22,307	8,547	7,261	6,262	5,229	4,601
16	34,267	32,000	28,845	26,296	23,542	9,312	7,962	6,908	5,812	5,142
17	35,718	33,409	30,191	27,587	24,769	10,085	8,672	7,564	6,408	5,697
18	37,156	34,805	31,526	28,869	25,989	10,865	9,390	8,231	7,015	6,265
19	38,582	36,191	32,852	30,144	27,204	11,651	10,117	8,907	7,633	6,844
20	39,997	37,566	34,170	31,410	28,412	12,443	10,851	9,591	8,260	7,434
21	41,401	38,932	35,479	32,671	29,615	13,240	11,591	10,283	8,897	8,034
22	42,796	40,289	36,781	33,924	30,813	14,041	12,338	10,982	9,542	8,643
23	44,181	41,638	38,076	35,172	32,007	14,848	13,091	11,689	10,196	9,260
24	45,558	42,980	39,364	36,415	33,196	15,659	13,848	12,401	10,856	9,886
25	46,928	44,314	40,646	37,652	34,382	16,473	14,611	13,120	11,524	10,520
26	48,290	45,642	41,923	38,885	35,563	17,292	15,379	13,844	12,198	11,160
27	49,645	46,963	43,195	40,113	36,741	18,114	16,151	14,573	12,878	11,808
28	50,994	48,278	44,461	41,337	37,916	18,939	16,928	15,308	13,565	12,461
29	52,335	49,588	45,722	42,557	39,087	19,768	17,708	16,047	14,256	13,121
30	53,672	50,892	46,979	43,773	40,256	20,599	18,493	16,791	14,953	13,787
31	55,002	52,191	48,232	44,985	41,422	21,434	19,281	17,539	15,655	14,458
32	56,328	53,486	49,480	46,194	42,585	22,271	20,072	18,291	16,362	15,134
33	57,648	54,775	50,725	47,400	43,745	23,110	20,867	19,047	17,073	15,815
34	58,964	56,061	51,966	48,602	44,903	23,952	21,664	19,806	17,789	16,501
35	60,275	57,342	53,203	49,802	46,059	24,797	22,465	20,569	18,509	17,192
36	61,581	58,619	54,437	50,998	47,212	25,643	23,269	21,336	19,233	17,887
37	62,883	59,893	55,668	52,192	48,363	26,492	24,075	22,106	19,960	18,586
38	64,181	61,162	56,895	53,384	49,513	27,343	24,884	22,878	20,691	19,289

39	65,475	62,428	58,120	54,572	50,660	28,196	25,695	23,654	21,426	19,996
40	66,766	63,691	59,342	55,758	51,805	29,051	26,509	24,433	22,164	20,707
41	68,053	64,950	60,561	56,942	52,949	29,907	27,326	25,215	22,906	21,421
42	69,336	66,206	61,777	58,124	54,090	30,765	28,144	25,999	23,650	22,138
43	70,616	67,459	62,990	59,304	55,230	31,625	28,965	26,785	24,398	22,860
44	71,892	68,710	64,201	60,481	56,369	32,487	29,787	27,575	25,148	23,584
45	73,166	69,957	65,410	61,656	57,505	33,350	30,612	28,366	25,901	24,311
46	74,437	71,201	66,616	62,830	58,641	34,215	31,439	29,160	26,657	25,041
47	75,704	72,443	67,821	64,001	59,774	35,081	32,268	29,956	27,416	25,775
48	76,969	73,683	69,023	65,171	60,907	35,949	33,098	30,754	28,177	26,511
49	78,231	74,919	70,222	66,339	62,038	36,818	33,930	31,555	28,941	27,249
50	79,490	76,154	71,420	67,505	63,167	37,689	34,764	32,357	29,707	27,991
100	140,20	135,80	129,60	124,30	118,50	82,36	77,93	74,22	70,06	67,33

ANEXO D – Distribuição F de Fisher-Snedecor

Quadro 35 – Valores críticos da cauda direita da distribuição F de Fisher-Snedecor

GL2	Percentis da distribuição F de Fisher-Snedecor (cauda direita)													
	p	GL1												
		3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50	100
3	0,9	0,186	0,239	0,276	0,304	0,325	0,342	0,356	0,367	0,420	0,439	0,449	0,455	0,467
	0,95	0,108	0,152	0,185	0,210	0,230	0,246	0,259	0,270	0,323	0,342	0,352	0,358	0,371
	0,975	0,065	0,100	0,129	0,152	0,170	0,185	0,197	0,207	0,259	0,279	0,289	0,295	0,308
	0,99	0,034	0,060	0,083	0,102	0,118	0,132	0,143	0,153	0,203	0,222	0,232	0,238	0,251
	0,995	0,021	0,041	0,060	0,077	0,092	0,104	0,115	0,124	0,172	0,191	0,201	0,207	0,220
4	0,9	0,187	0,243	0,284	0,314	0,338	0,356	0,371	0,384	0,445	0,467	0,478	0,485	0,500
	0,95	0,110	0,157	0,193	0,221	0,243	0,261	0,275	0,288	0,349	0,372	0,384	0,391	0,406
	0,975	0,066	0,104	0,135	0,161	0,181	0,198	0,212	0,224	0,285	0,308	0,320	0,327	0,343
	0,99	0,035	0,063	0,088	0,109	0,127	0,143	0,156	0,167	0,226	0,249	0,261	0,269	0,285
	0,995	0,022	0,043	0,064	0,083	0,099	0,114	0,126	0,136	0,193	0,216	0,229	0,236	0,252
5	0,9	0,188	0,247	0,290	0,322	0,347	0,367	0,383	0,397	0,463	0,488	0,501	0,509	0,525
	0,95	0,111	0,160	0,198	0,228	0,252	0,271	0,287	0,301	0,369	0,395	0,408	0,417	0,434
	0,975	0,067	0,107	0,140	0,167	0,189	0,208	0,223	0,236	0,304	0,330	0,344	0,353	0,371
	0,99	0,035	0,064	0,091	0,114	0,134	0,151	0,165	0,177	0,244	0,270	0,285	0,293	0,312
	0,995	0,022	0,045	0,067	0,087	0,105	0,120	0,134	0,146	0,210	0,237	0,251	0,260	0,279
6	0,9	0,189	0,249	0,294	0,327	0,354	0,375	0,392	0,406	0,478	0,505	0,519	0,528	0,545
	0,95	0,112	0,162	0,202	0,233	0,259	0,279	0,296	0,311	0,385	0,413	0,428	0,437	0,456
	0,975	0,068	0,109	0,143	0,172	0,195	0,215	0,231	0,246	0,320	0,349	0,364	0,374	0,394
	0,99	0,036	0,066	0,094	0,118	0,139	0,157	0,172	0,186	0,258	0,288	0,304	0,314	0,335
	0,995	0,022	0,046	0,069	0,090	0,109	0,126	0,140	0,153	0,224	0,253	0,269	0,279	0,301
7	0,9	0,190	0,251	0,297	0,332	0,359	0,381	0,399	0,414	0,490	0,519	0,534	0,543	0,563
	0,95	0,113	0,164	0,205	0,238	0,264	0,286	0,304	0,319	0,398	0,428	0,445	0,455	0,476
	0,975	0,068	0,110	0,146	0,176	0,200	0,221	0,238	0,253	0,333	0,364	0,381	0,392	0,414
	0,99	0,036	0,067	0,096	0,121	0,143	0,162	0,178	0,192	0,270	0,303	0,320	0,331	0,354
	0,995	0,023	0,046	0,070	0,093	0,113	0,130	0,145	0,159	0,235	0,267	0,285	0,296	0,320
8	0,9	0,190	0,253	0,299	0,335	0,363	0,386	0,405	0,421	0,500	0,531	0,547	0,557	0,577
	0,95	0,113	0,166	0,208	0,241	0,268	0,291	0,310	0,326	0,409	0,441	0,459	0,470	0,492
	0,975	0,069	0,111	0,148	0,179	0,204	0,226	0,244	0,259	0,343	0,377	0,395	0,407	0,431
	0,99	0,036	0,068	0,097	0,123	0,146	0,166	0,183	0,198	0,281	0,315	0,334	0,346	0,371
	0,995	0,023	0,047	0,072	0,095	0,115	0,133	0,149	0,164	0,245	0,279	0,299	0,311	0,336
9	0,9	0,191	0,254	0,302	0,338	0,367	0,390	0,410	0,426	0,509	0,541	0,558	0,568	0,590
	0,95	0,113	0,167	0,210	0,244	0,272	0,295	0,315	0,331	0,418	0,452	0,471	0,482	0,506
	0,975	0,069	0,112	0,150	0,181	0,207	0,230	0,248	0,265	0,353	0,388	0,408	0,420	0,446
	0,99	0,037	0,068	0,098	0,125	0,149	0,169	0,187	0,202	0,289	0,326	0,346	0,359	0,386
	0,995	0,023	0,047	0,073	0,096	0,117	0,136	0,153	0,168	0,253	0,290	0,310	0,323	0,351
10	0,9	0,191	0,255	0,303	0,340	0,370	0,394	0,414	0,431	0,516	0,550	0,567	0,578	0,601
	0,95	0,114	0,168	0,211	0,246	0,275	0,299	0,319	0,336	0,426	0,462	0,481	0,494	0,519
	0,975	0,069	0,113	0,151	0,183	0,210	0,233	0,252	0,269	0,361	0,398	0,419	0,432	0,459
	0,99	0,037	0,069	0,099	0,127	0,151	0,172	0,190	0,206	0,297	0,336	0,357	0,371	0,399
	0,995	0,023	0,048	0,073	0,098	0,119	0,139	0,156	0,171	0,260	0,299	0,321	0,335	0,364
20	0,9	0,193	0,260	0,312	0,353	0,385	0,412	0,435	0,454	0,557	0,600	0,623	0,638	0,669
	0,95	0,115	0,172	0,219	0,258	0,290	0,317	0,341	0,360	0,471	0,518	0,544	0,560	0,597
	0,975	0,071	0,117	0,158	0,193	0,224	0,250	0,273	0,293	0,406	0,456	0,484	0,502	0,541
	0,99	0,037	0,071	0,105	0,135	0,162	0,187	0,208	0,227	0,340	0,392	0,422	0,441	0,484
	0,995	0,023	0,050	0,077	0,104	0,129	0,151	0,171	0,190	0,301	0,354	0,385	0,405	0,449
30	0,9	0,193	0,262	0,315	0,357	0,391	0,420	0,444	0,464	0,575	0,622	0,649	0,666	0,703
	0,95	0,116	0,174	0,222	0,263	0,296	0,325	0,349	0,370	0,490	0,543	0,573	0,593	0,636
	0,975	0,071	0,118	0,161	0,197	0,229	0,257	0,281	0,302	0,426	0,482	0,515	0,536	0,583
	0,99	0,038	0,072	0,107	0,138	0,167	0,192	0,215	0,235	0,360	0,419	0,454	0,477	0,528
	0,995	0,024	0,050	0,079	0,107	0,133	0,156	0,178	0,197	0,320	0,381	0,416	0,440	0,494

GL2	Percentis da distribuição F de Fisher-Snedecor (cauda direita)													
	P	GL1												
		3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50	100
40	0,9	0,194	0,263	0,317	0,360	0,394	0,423	0,448	0,469	0,585	0,636	0,664	0,683	0,724
	0,95	0,116	0,175	0,224	0,265	0,299	0,329	0,354	0,376	0,502	0,558	0,591	0,612	0,660
	0,975	0,071	0,119	0,162	0,200	0,232	0,260	0,285	0,307	0,437	0,498	0,533	0,557	0,610
	0,99	0,038	0,073	0,108	0,140	0,169	0,195	0,219	0,240	0,371	0,435	0,473	0,498	0,556
	0,995	0,024	0,051	0,080	0,108	0,135	0,159	0,181	0,201	0,331	0,396	0,436	0,462	0,523
50	0,9	0,194	0,263	0,318	0,361	0,396	0,426	0,451	0,472	0,592	0,644	0,674	0,694	0,738
	0,95	0,117	0,175	0,225	0,266	0,301	0,331	0,357	0,379	0,509	0,568	0,602	0,625	0,677
	0,975	0,071	0,119	0,163	0,201	0,234	0,263	0,288	0,310	0,445	0,508	0,546	0,571	0,628
	0,99	0,038	0,073	0,108	0,141	0,171	0,197	0,221	0,243	0,378	0,445	0,486	0,513	0,576
	0,995	0,024	0,051	0,080	0,109	0,136	0,161	0,183	0,204	0,338	0,407	0,449	0,477	0,543
100	0,9	0,194	0,265	0,320	0,364	0,400	0,431	0,457	0,479	0,606	0,664	0,698	0,720	0,773
	0,95	0,117	0,177	0,227	0,269	0,305	0,336	0,363	0,386	0,525	0,590	0,629	0,656	0,719
	0,975	0,072	0,120	0,164	0,203	0,238	0,267	0,294	0,317	0,461	0,531	0,575	0,604	0,674
	0,99	0,038	0,074	0,110	0,143	0,174	0,201	0,227	0,249	0,394	0,469	0,516	0,548	0,626
	0,995	0,024	0,051	0,081	0,111	0,139	0,164	0,188	0,210	0,354	0,430	0,479	0,512	0,595

Quadro 36 – Valores críticos da cauda esquerda da distribuição F de Fisher-Snedecor

GL2	Percentis da distribuição F de Fisher-Snedecor (cauda esquerda)													
	P	GL1												
		3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50	100
3	0,005	47,467	46,195	45,392	44,838	44,434	44,126	43,882	43,686	42,778	42,466	42,308	42,213	42,022
	0,01	29,457	28,710	28,237	27,911	27,672	27,489	27,345	27,229	26,690	26,505	26,411	26,354	26,240
	0,025	15,439	15,101	14,885	14,735	14,624	14,540	14,473	14,419	14,167	14,081	14,037	14,010	13,956
	0,05	9,277	9,117	9,013	8,941	8,887	8,845	8,812	8,786	8,660	8,617	8,594	8,581	8,554
	0,1	5,391	5,343	5,309	5,285	5,266	5,252	5,240	5,230	5,184	5,168	5,160	5,155	5,144
4	0,005	24,259	23,155	22,456	21,975	21,622	21,352	21,139	20,967	20,167	19,892	19,752	19,667	19,497
	0,01	16,694	15,977	15,522	15,207	14,976	14,799	14,659	14,546	14,020	13,838	13,745	13,690	13,577
	0,025	9,979	9,605	9,364	9,197	9,074	8,980	8,905	8,844	8,560	8,461	8,411	8,381	8,319
	0,05	6,591	6,388	6,256	6,163	6,094	6,041	5,999	5,964	5,803	5,746	5,717	5,699	5,664
	0,1	4,191	4,107	4,051	4,010	3,979	3,955	3,936	3,920	3,844	3,817	3,804	3,795	3,778
5	0,005	16,530	15,556	14,940	14,513	14,200	13,961	13,772	13,618	12,903	12,656	12,530	12,454	12,300
	0,01	12,060	11,392	10,967	10,672	10,456	10,289	10,158	10,051	9,553	9,379	9,291	9,238	9,130
	0,025	7,764	7,388	7,146	6,978	6,853	6,757	6,681	6,619	6,329	6,227	6,175	6,144	6,080
	0,05	5,409	5,192	5,050	4,950	4,876	4,818	4,772	4,735	4,558	4,496	4,464	4,444	4,405
	0,1	3,619	3,520	3,453	3,405	3,368	3,339	3,316	3,297	3,207	3,174	3,157	3,147	3,126
6	0,005	12,917	12,028	11,464	11,073	10,786	10,566	10,391	10,250	9,589	9,358	9,241	9,170	9,026
	0,01	9,780	9,148	8,746	8,466	8,260	8,102	7,976	7,874	7,396	7,229	7,143	7,091	6,987
	0,025	6,599	6,227	5,988	5,820	5,695	5,600	5,523	5,461	5,168	5,065	5,012	4,980	4,915
	0,05	4,757	4,534	4,387	4,284	4,207	4,147	4,099	4,060	3,874	3,808	3,774	3,754	3,712
	0,1	3,289	3,181	3,108	3,055	3,014	2,983	2,958	2,937	2,836	2,800	2,781	2,770	2,746
7	0,005	10,882	10,050	9,522	9,155	8,885	8,678	8,514	8,380	7,754	7,534	7,422	7,354	7,217
	0,01	8,451	7,847	7,460	7,191	6,993	6,840	6,719	6,620	6,155	5,992	5,908	5,858	5,755
	0,025	5,890	5,523	5,285	5,119	4,995	4,899	4,823	4,761	4,467	4,362	4,309	4,276	4,210
	0,05	4,347	4,120	3,972	3,866	3,787	3,726	3,677	3,637	3,445	3,376	3,340	3,319	3,275
	0,1	3,074	2,961	2,883	2,827	2,785	2,752	2,725	2,703	2,595	2,555	2,535	2,523	2,497
8	0,005	9,596	8,805	8,302	7,952	7,694	7,496	7,339	7,211	6,608	6,396	6,288	6,222	6,088
	0,01	7,591	7,006	6,632	6,371	6,178	6,029	5,911	5,814	5,359	5,198	5,116	5,065	4,963
	0,025	5,416	5,053	4,817	4,652	4,529	4,433	4,357	4,295	3,999	3,894	3,840	3,807	3,739
	0,05	4,066	3,838	3,687	3,581	3,500	3,438	3,388	3,347	3,150	3,079	3,043	3,020	2,975
	0,1	2,924	2,806	2,726	2,668	2,624	2,589	2,561	2,538	2,425	2,383	2,361	2,348	2,321
9	0,005	8,717	7,956	7,471	7,134	6,885	6,693	6,541	6,417	5,832	5,625	5,519	5,454	5,322
	0,01	6,992	6,422	6,057	5,802	5,613	5,467	5,351	5,257	4,808	4,649	4,567	4,517	4,415
	0,025	5,078	4,718	4,484	4,320	4,197	4,102	4,026	3,964	3,667	3,560	3,505	3,472	3,403
	0,05	3,863	3,633	3,482	3,374	3,293	3,230	3,179	3,137	2,936	2,864	2,826	2,803	2,756

GL2	Percentis da distribuição F de Fisher-Snedecor (cauda esquerda)													
	P	GL1												
		3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50	100
10	0,1	2,813	2,693	2,611	2,551	2,505	2,469	2,440	2,416	2,298	2,255	2,232	2,218	2,189
	0,005	8,081	7,343	6,872	6,545	6,302	6,116	5,968	5,847	5,274	5,071	4,966	4,902	4,772
	0,01	6,552	5,994	5,636	5,386	5,200	5,057	4,942	4,849	4,405	4,247	4,165	4,115	4,014
	0,025	4,826	4,468	4,236	4,072	3,950	3,855	3,779	3,717	3,419	3,311	3,255	3,221	3,152
	0,05	3,708	3,478	3,326	3,217	3,135	3,072	3,020	2,978	2,774	2,700	2,661	2,637	2,588
20	0,1	2,728	2,605	2,522	2,461	2,414	2,377	2,347	2,323	2,201	2,155	2,132	2,117	2,087
	0,005	5,818	5,174	4,762	4,472	4,257	4,090	3,956	3,847	3,318	3,123	3,022	2,959	2,828
	0,01	4,938	4,431	4,103	3,871	3,699	3,564	3,457	3,368	2,938	2,778	2,695	2,643	2,535
	0,025	3,859	3,515	3,289	3,128	3,007	2,913	2,837	2,774	2,464	2,349	2,287	2,249	2,170
	0,05	3,098	2,866	2,711	2,599	2,514	2,447	2,393	2,348	2,124	2,039	1,994	1,966	1,907
30	0,1	2,380	2,249	2,158	2,091	2,040	1,999	1,965	1,937	1,794	1,738	1,708	1,690	1,650
	0,005	5,239	4,623	4,228	3,949	3,742	3,580	3,450	3,344	2,823	2,628	2,524	2,459	2,323
	0,01	4,510	4,018	3,699	3,473	3,304	3,173	3,067	2,979	2,549	2,386	2,299	2,245	2,131
	0,025	3,589	3,250	3,026	2,867	2,746	2,651	2,575	2,511	2,195	2,074	2,009	1,968	1,882
	0,05	2,922	2,690	2,534	2,421	2,334	2,266	2,211	2,165	1,932	1,841	1,792	1,761	1,695
40	0,1	2,276	2,142	2,049	1,980	1,927	1,884	1,849	1,819	1,667	1,606	1,573	1,552	1,507
	0,005	4,976	4,374	3,986	3,713	3,509	3,350	3,222	3,117	2,598	2,401	2,296	2,230	2,088
	0,01	4,313	3,828	3,514	3,291	3,124	2,993	2,888	2,801	2,369	2,203	2,114	2,058	1,938
	0,025	3,463	3,126	2,904	2,744	2,624	2,529	2,452	2,388	2,068	1,943	1,875	1,832	1,741
	0,05	2,839	2,606	2,449	2,336	2,249	2,180	2,124	2,077	1,839	1,744	1,693	1,660	1,589
50	0,1	2,226	2,091	1,997	1,927	1,873	1,829	1,793	1,763	1,605	1,541	1,506	1,483	1,434
	0,005	4,826	4,232	3,849	3,579	3,376	3,219	3,092	2,988	2,470	2,272	2,164	2,097	1,951
	0,01	4,199	3,720	3,408	3,186	3,020	2,890	2,785	2,698	2,265	2,098	2,007	1,949	1,825
	0,025	3,390	3,054	2,833	2,674	2,553	2,458	2,381	2,317	1,993	1,866	1,796	1,752	1,656
	0,05	2,790	2,557	2,400	2,286	2,199	2,130	2,073	2,026	1,784	1,687	1,634	1,599	1,525
100	0,1	2,197	2,061	1,966	1,895	1,840	1,796	1,760	1,729	1,568	1,502	1,465	1,441	1,388
	0,005	4,542	3,963	3,589	3,325	3,127	2,972	2,847	2,744	2,227	2,024	1,912	1,840	1,681
	0,01	3,984	3,513	3,206	2,988	2,823	2,694	2,590	2,503	2,067	1,893	1,797	1,735	1,598
	0,025	3,250	2,917	2,696	2,537	2,417	2,321	2,244	2,179	1,849	1,715	1,640	1,592	1,483
	0,05	2,696	2,463	2,305	2,191	2,103	2,032	1,975	1,927	1,676	1,573	1,515	1,477	1,392
	0,1	2,139	2,002	1,906	1,834	1,778	1,732	1,695	1,663	1,494	1,423	1,382	1,355	1,293

ANEXO E – Quadro da distribuição T de Student

Quadro 37 – Valores críticos da distribuição T de Student para testes bilaterais e unilaterais

Valores crítico da distribuição T de Student								
GL	Testes bilaterais							
	$\alpha=0,5$	$\alpha=0,2$	$\alpha=0,1$	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,04$	$\alpha=0,02$	$\alpha=0,01$	$\alpha=0,005$
	Testes Unilaterais							
	$\alpha=0,25$	$\alpha=0,1$	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,025$	$\alpha=0,02$	$\alpha=0,01$	$\alpha=0,005$	$\alpha=0,0025$
1	1,000	3,078	6,314	12,706	15,895	31,821	63,657	127,321
2	0,816	1,886	2,920	4,303	4,849	6,965	9,925	14,089
3	0,765	1,638	2,353	3,182	3,482	4,541	5,841	7,453
4	0,741	1,533	2,132	2,776	2,999	3,747	4,604	5,598
5	0,727	1,476	2,015	2,571	2,757	3,365	4,032	4,773
6	0,718	1,440	1,943	2,447	2,612	3,143	3,707	4,317
7	0,711	1,415	1,895	2,365	2,517	2,998	3,499	4,029
8	0,706	1,397	1,860	2,306	2,449	2,896	3,355	3,833
9	0,703	1,383	1,833	2,262	2,398	2,821	3,250	3,690
10	0,700	1,372	1,812	2,228	2,359	2,764	3,169	3,581
11	0,697	1,363	1,796	2,201	2,328	2,718	3,106	3,497
12	0,695	1,356	1,782	2,179	2,303	2,681	3,055	3,428
13	0,694	1,350	1,771	2,160	2,282	2,650	3,012	3,372
14	0,692	1,345	1,761	2,145	2,264	2,624	2,977	3,326
15	0,691	1,341	1,753	2,131	2,249	2,602	2,947	3,286
16	0,690	1,337	1,746	2,120	2,235	2,583	2,921	3,252
17	0,689	1,333	1,740	2,110	2,224	2,567	2,898	3,222
18	0,688	1,330	1,734	2,101	2,214	2,552	2,878	3,197
19	0,688	1,328	1,729	2,093	2,205	2,539	2,861	3,174
20	0,687	1,325	1,725	2,086	2,197	2,528	2,845	3,153
21	0,686	1,323	1,721	2,080	2,189	2,518	2,831	3,135
22	0,686	1,321	1,717	2,074	2,183	2,508	2,819	3,119
23	0,685	1,319	1,714	2,069	2,177	2,500	2,807	3,104
24	0,685	1,318	1,711	2,064	2,172	2,492	2,797	3,091
25	0,684	1,316	1,708	2,060	2,167	2,485	2,787	3,078
26	0,684	1,315	1,706	2,056	2,162	2,479	2,779	3,067
27	0,684	1,314	1,703	2,052	2,158	2,473	2,771	3,057
28	0,683	1,313	1,701	2,048	2,154	2,467	2,763	3,047
29	0,683	1,311	1,699	2,045	2,150	2,462	2,756	3,038
30	0,683	1,310	1,697	2,042	2,147	2,457	2,750	3,030
35	0,682	1,306	1,690	2,030	2,133	2,438	2,724	2,996
40	0,681	1,303	1,684	2,021	2,123	2,423	2,704	2,971
45	0,680	1,301	1,679	2,014	2,115	2,412	2,690	2,952
50	0,679	1,299	1,676	2,009	2,109	2,403	2,678	2,937
60	0,679	1,296	1,671	2,000	2,099	2,390	2,660	2,915
70	0,678	1,294	1,667	1,994	2,093	2,381	2,648	2,899
80	0,678	1,292	1,664	1,990	2,088	2,374	2,639	2,887
90	0,677	1,291	1,662	1,987	2,084	2,368	2,632	2,878
100	0,677	1,290	1,660	1,984	2,081	2,364	2,626	2,871

ANEXO F – Distribuição exata do Teste Wilcoxon

Quadro 38 – Valores críticos da distribuição exata da estatística Wilcoxon*

n	Probabilidade (p)																	$\frac{n(n+1)}{2}$
	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995	
4	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10	10	10	10
5	0	0	0	1	3	4	5	6	7,5	9	10	11	12	14	15	15	15	15
6	0	0	1	3	4	6	8	9	10,5	12	13	15	17	18	20	21	21	21
7	0	1	3	4	6	9	11	12	14	16	17	19	22	24	25	27	28	28
8	1	2	4	6	9	12	14	16	18	20	22	24	27	30	32	34	35	36
9	2	4	6	9	11	15	18	20	22,5	25	27	30	34	36	39	41	43	45
10	4	6	9	11	15	19	22	25	27,5	30	33	36	40	44	46	49	51	55
11	6	8	11	14	18	23	27	30	33	36	39	43	48	52	55	58	60	66
12	8	10	14	18	22	28	32	36	39	42	46	50	56	60	64	68	70	78
13	10	13	18	22	27	33	38	42	45,5	49	53	58	64	69	73	78	81	91
14	13	16	22	26	32	39	44	48	52,5	57	61	66	73	79	83	89	92	105
15	16	20	26	31	37	45	51	55	60	65	69	75	83	89	94	100	104	120
16	20	24	30	36	43	51	58	63	68	73	78	85	93	100	106	112	116	136
17	24	28	35	42	49	58	65	71	76,5	82	88	95	104	111	118	125	129	153
18	28	33	41	48	56	66	73	80	85,5	91	98	105	115	123	130	138	143	171
19	33	38	47	54	63	74	82	89	95	101	108	116	127	136	143	152	157	190
20	38	44	53	61	70	83	91	98	105	112	119	127	140	149	157	166	172	210
21	44	50	59	68	78	91	100	108	115,5	123	131	140	153	163	172	181	187	231
22	49	56	67	76	87	100	110	119	126,5	134	143	153	166	177	186	197	204	253
23	55	63	74	84	95	110	120	130	138	146	156	166	181	192	202	213	221	276
24	62	70	82	92	105	120	131	141	150	159	169	180	195	208	218	230	238	300
25	69	77	90	101	114	131	143	153	162,5	172	182	194	211	224	235	248	256	325
26	76	85	99	111	125	142	155	165	175,5	186	196	209	226	240	252	266	275	351
27	84	94	108	120	135	154	167	178	189	200	211	224	243	258	270	284	294	378
28	92	102	117	131	146	166	180	192	203	214	226	240	260	275	289	304	314	406
29	101	111	127	141	158	178	193	206	217,5	229	242	257	277	294	308	324	334	435
30	110	121	138	152	170	191	207	220	232,5	245	258	274	295	313	327	344	355	465
31	119	131	148	164	182	205	221	235	248	261	275	291	314	332	348	365	377	496
32	129	141	160	176	195	219	236	250	264	278	292	309	333	352	368	387	399	528
33	139	152	171	188	208	233	251	266	280,5	295	310	328	353	373	390	409	422	561
34	149	163	183	201	222	248	266	282	297,5	313	329	347	373	394	412	432	446	595
35	160	175	196	214	236	263	283	299	315	331	347	367	394	416	434	455	470	630
36	172	187	209	228	251	279	299	317	333	349	367	387	415	438	457	479	494	666
37	184	199	222	242	266	295	316	335	351,5	368	387	408	437	461	481	504	519	703
38	196	212	236	257	282	312	334	353	370,5	388	407	429	459	484	505	529	545	741
39	208	225	250	272	298	329	352	372	390	408	428	451	482	508	530	555	572	780
40	221	239	265	287	314	347	371	391	410	429	449	473	506	533	555	581	599	820
41	235	253	280	303	331	365	390	411	430,5	450	471	496	530	558	581	608	626	861
42	248	267	295	320	349	384	409	431	451,5	472	494	519	554	583	608	636	655	903
43	263	282	311	337	366	403	429	452	473	494	517	543	580	609	635	664	683	946
44	277	297	328	354	385	422	450	473	495	517	540	568	605	636	662	693	713	990
45	292	313	344	372	403	442	471	495	517,5	540	564	593	632	663	691	722	743	1035
46	308	329	362	390	423	463	492	517	540,5	564	589	618	658	691	719	752	773	1081
47	324	346	379	408	442	484	514	540	564	588	614	644	686	720	749	782	804	1128
48	340	363	397	428	463	505	536	563	588	613	640	671	713	748	779	813	836	1176
49	357	381	416	447	483	527	559	587	612,5	638	666	698	742	778	809	844	868	1225
50	374	398	435	467	504	550	583	611	637,5	664	692	725	771	808	840	877	901	1275

(*) Para tamanhos amostrais $n > 50$, deve-se utilizar a aproximação para distribuição normal padrão.

ANEXO G – Código da ferramenta computacional para o cálculo da descarga sólida em suspensão

```

Sub DescargaSolidaSuspensao()
'É calculado a Descarga Sólida em Suspensão a partir dos dados fornecidos
pelo usuário nos espaços em amarelo

Dim q, Css As Integer
Dim contador As Integer
Dim Celula As Range
Dim i As Long

i = 6
Do
q = Cells(i, 3).Value
Css = Cells(i, 4).Value

For Each Celula In Range("$B$6:$D$36")

If (Not IsEmpty(Celula) And Celula.Value <= 0) Then
    contador = contador + 1
    Celula.Interior.ColorIndex = 3
Else
    Celula.Interior.ColorIndex = 6
End If
Next Celula

If (contador > 0) Then
    MsgBox "Por favor, verifique os valores em vermelho...", vbOKOnly

Else

Qss = 0.0864 * q * Css
Cells(i, 5).Value = Qss
End If

i = i + 1
Loop While Cells(i, 4) <> ""
End Sub
Sub DescargaSolidaSuspensao_Soma()

Sheets("Tel1").Activate

i = 6
Do
Soma = Soma + Sheets("Tel1").Cells(i, 5).Value
i = i + 1
Loop While Cells(i, 5) <> ""

Planilha2.TB_QssSoma.Value = Soma

End Sub

Sub Help_QssSoma()
MsgBox "Retorna a soma de todos os valores de Descarga Sólida em Suspensão
(Qss) na planilha"
End Sub

```

```

Sub DescargaSolidaSuspensao_Media()

Dim Media As Double
Sheets("Tela1").Activate
i = 6
Do
Soma = Soma + Sheets("Tela1").Cells(i, 5).Value
i = i + 1

Media = (Soma / (i - 6))
Loop While Cells(i, 5) <> ""

Planilha2.TB_QssMedia.Value = Media

End Sub

Sub Help_QssMedia()
MsgBox "Retorna a média de todos os valores de Descarga Sólida em Suspensão (Qss) na planilha"

End Sub

Sub LimparCampoQss()
'Limpa Campo da Tela 1
Range("B6:E100").Select
Selection.ClearContents
End Sub

Sub VoltarFrmSedimentTool()
With Planilha1
.Visible = xlSheetVisible
End With
With Planilha2
.Visible = xlSheetVeryHidden
End With
Frm_SedimentTool.Show

End Sub

```

ANEXO H – Código da ferramenta computacional para o método simplificado de Colby (1957)

```

Static Function Log10(X)
    Log10 = Log(X) / Log(10#)
End Function

Sub DescargaSolidaTotal()

With Range("AX6:BA100").Select
    Selection.ClearContents
    Cells(6, 3).Select
End With

Dim QL, V, L, p, Css As Double
Dim q, K, Cr, R As Double
Dim Qss, Qnm, Qst As Double
Dim i As Long

i = 6
Do
    QL = Cells(i, 4).Value
    V = Cells(i, 5).Value
    L = Cells(i, 6).Value
    p = Cells(i, 7).Value
    Css = Cells(i, 8).Value

    Qss = 0.0864 * QL * Css
    Cells(i, 9).Value = Qss

    q = 10 ^ (3.43304 * Log10(V) + 1.62759)
    Cells(i, 50).Value = q

    If 0 < p And p <= 0.35 Then
        Cr = 10 ^ (1.8066 * Log10(V) + 3.2627)
        '0,35
    ElseIf 0.35 < p And p <= 0.45 Then
        Cr = 10 ^ (1.8365 * Log10(V) + 3.176)
        '0,35 a 0,45
    ElseIf 0.45 < p And p <= 0.55 Then
        Cr = 10 ^ (1.9111 * Log10(V) + 3.1139)
        '0,45 a 0,55
    ElseIf 0.55 < p And p <= 0.65 Then
        Cr = 10 ^ (1.9512 * Log10(V) + 3.0881)
        '0,55 a 0,65
    ElseIf 0.65 < p And p <= 0.75 Then
        Cr = 10 ^ (1.973 * Log10(V) + 3.0512)
        '0,65 a 0,75
    ElseIf 0.75 < p And p <= 0.85 Then
        Cr = 10 ^ (1.9897 * Log10(V) + 3.0212)
        '0,75 a 0,85
    ElseIf 0.85 < p And p <= 0.95 Then
        Cr = 10 ^ (1.8213 * Log10(V) + 2.9289)
        '0,85 a 0,95
    ElseIf 0.95 < p And p <= 1.1 Then
        Cr = 10 ^ (2.0388 * Log10(V) + 2.9692)
        '0,95 a 1,10
    ElseIf 1.1 < p And p <= 1.3 Then
        Cr = 10 ^ (1.9069 * Log10(V) + 2.9002)
        '1,10 a 1,30
    ElseIf 1.3 < p And p <= 1.5 Then
        Cr = 10 ^ (2.1377 * Log10(V) + 2.9031)
        '1,30 a 1,50
    ElseIf 1.5 < p And p <= 1.7 Then
        Cr = 10 ^ (2.1772 * Log10(V) + 2.8642)
        '1,50 a 1,70
    ElseIf 1.7 < p And p <= 1.9 Then
        Cr = 10 ^ (2.1865 * Log10(V) + 2.8243)
        '1,70 a 1,90
    ElseIf 1.9 < p And p <= 2.5 Then
        Cr = 10 ^ (2.2393 * Log10(V) + 2.7782)
        '1,90 a 2,50
    ElseIf 2.5 < p And p <= 3.5 Then
        Cr = 10 ^ (2.2319 * Log10(V) + 2.699)
        '2,50 a 3,50
    ElseIf 3.5 < p And p <= 4.5 Then
        Cr = 10 ^ (2.454 * Log10(V) + 2.6236)
        '3,50 a 4,50
    ElseIf 4.5 < p And p <= 5.5 Then
        Cr = 10 ^ (2.5129 * Log10(V) + 2.5446)
        '4,50 a 5,50
    ElseIf 5.5 < p And p <= 6.5 Then

```

```

Cr = 10 ^ (2.5727 * Log10(V) + 2.4914)      '5,50 a 6,50
ElseIf 6.5 < p And p <= 7.5 Then
Cr = 10 ^ (2.6859 * Log10(V) + 2.4651)      '6,50 a 7,50
ElseIf 7.5 < p And p <= 8.5 Then
Cr = 10 ^ (2.6674 * Log10(V) + 2.3979)      '7,50 a 8,50
ElseIf 8.5 < p And p <= 9.5 Then
Cr = 10 ^ (2.7665 * Log10(V) + 2.3696)      '8,50 a 9,50
ElseIf 9.5 < p And p <= 11 Then
Cr = 10 ^ (2.8102 * Log10(V) + 2.3224)      '9,50 a 11
ElseIf 11 < p And p <= 13 Then
Cr = 10 ^ (2.9199 * Log10(V) + 2.2304)      '11 a 13
ElseIf 13 < p And p <= 15 Then
Cr = 10 ^ (3.0768 * Log10(V) + 2.1303)      '13 a 15
ElseIf 15 < p And p <= 17 Then
Cr = 10 ^ (3.1964 * Log10(V) + 2.0414)      '15 a 17
ElseIf 17 < p And p <= 19 Then
Cr = 10 ^ (3.3046 * Log10(V) + 1.959)      '17 a 19
ElseIf 19 < p And p <= 21 Then
Cr = 10 ^ (3.419 * Log10(V) + 1.8554)      '19 a 21
ElseIf 21 < p And p <= 23 Then
Cr = 10 ^ (3.5844 * Log10(V) + 1.7661)      '21 a 23
ElseIf 23 < p And p <= 25 Then
Cr = 10 ^ (3.5913 * Log10(V) + 1.6532)      '23 a 25
ElseIf 25 < p And p <= 27 Then
Cr = 10 ^ (3.5476 * Log10(V) + 1.5341)      '25 a 27
ElseIf 27 < p And p <= 29 Then
Cr = 10 ^ (3.9694 * Log10(V) + 1.4639)      '27 a 29
ElseIf 29 < p And p <= 31 Then
Cr = 10 ^ (4.1821 * Log10(V) + 1.3441)      '29 a 31
Else
MsgBox ("Não é possível obter a descarga sólida total para profundidades maiores
que 31m")
Exit Sub
End If

R = Css / Cr
K = 10 ^ (0.481943 * Log10(R) + 0.0739316)
Qnm = q * K * L
Qst = Qss + Qnm

Cells(i, 51).Value = Cr
Cells(i, 52).Value = R
Cells(i, 53).Value = K
Cells(i, 10).Value = Qnm
Cells(i, 11).Value = Qst

i = i + 1
Loop While Cells(i, 4) <> ""

End Sub

Sub Voltar_EstatisticTool()
Sheets("DescargaSólidaTotal").Activate
Planilha1.Visible = xlSheetVisible
Planilha9.Visible = xlSheetHidden
Frm_SedimentTool.Show
End Sub

```

ANEXO I – Código da ferramenta computacional para o Teste de Normalidade Kolmogorov-Smirnov

```

Private Sub TesteNormalidade()

    Range("I6:Q100").Select
    Selection.ClearContents

Dim cont As Long
Dim n As Long
Dim i As Long

    cont = WorksheetFunction.CountA(Range("$B$6:$B$100"))
    n = cont

    If n < 4 Then
        Cells(5, 2).Select
        MsgBox "Para o Teste de Normalidade, recomenda-se no mínimo 4 valores"
        Exit Sub

    Else
        End If

'Primeiro o objetivo é ordenar os dados de entrada
Range("B6:B100").Select
Selection.Copy
ActiveWindow.SmallScroll Down:=-3
Range("I6").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False
ActiveWorkbook.Worksheets("Tela3").Sort.SortFields.Clear
ActiveWorkbook.Worksheets("Tela3").Sort.SortFields.Add2 Key:=Range("I6:I100") _
, SortOn:=xlSortOnValues, Order:=xlAscending, DataOption:=xlSortNormal
With ActiveWorkbook.Worksheets("Tela3").Sort
    .SetRange Range("I6:I100")
    .Header = xlGuess
    .MatchCase = False
    .Orientation = xlTopToBottom
    .SortMethod = xlPinYin
    .Apply

End With

'Calcular Fn empírico para cada um dos dados de entrada já ordenados

Dim Fn As Double

    i = 6
    Do
        Fn = (i - 5) / n
        Cells(i, 10).Value = Fn

        i = i + 1
    Loop While Cells(i, 9) <> ""

'Em seguida Calcula-se F(x)

Dim Soma As Double
Dim Média As Double
Dim Desvio As Double
Dim X, Z As Double
Dim Fx As Double

    Soma = WorksheetFunction.Sum(Range("$I$6:$I$100"))

```

```

Desvio = WorksheetFunction.StDev(Range("$I$6:$I$100"))

If Desvio = 0 Then

    Range("I6:Q100").Select
    Selection.ClearContents
    MsgBox ("Todos os valores são iguais! Não é possível realizar o teste
estatístístico")
    Cells(5, 2).Select
    Exit Sub
Else
    i = 6
    Do
    Média = (Soma / n)
    X = Cells(i, 9).Value
    Z = (X - Média) / (Desvio)

    DistNormal = WorksheetFunction.Norm_S_Dist(Z, True)
    Fx = DistNormal
    Cells(i, 11).Value = Fx

    i = i + 1
    Loop While Cells(i, 9) <> ""
End If
'Cálculo das variáveis D+ e D-:

Dim Dplus As Double

    i = 6
    Do
    Fn = Cells(i, 10).Value
    Fx = Cells(i, 11).Value

    Dplus = Abs(Fx - Fn)
    Cells(i, 12).Value = Dplus

    i = i + 1

    Loop While Cells(i, 9) <> ""

Dim Dminus As Double

    i = 6

    Do
        If i = 6 Then
            Cells(i, 13).Value = Abs(Cells(i, 11).Value - 0)

            ElseIf i > 6 Then
                Cells(i, 13).Value = Abs(Cells(i, 11).Value - Cells(i - 1, 10).Value)

            End If

        i = i + 1
        Loop While Cells(i, 9) <> ""

'Determinação de Dn=Máx(D+,D-)

Dim Dplusmáximo As Double
Dim Dminusmáximo As Double
Dim Dn As Double

Dplusmáximo = WorksheetFunction.Max(Range("$L$6:$L$100"))
Dminusmáximo = WorksheetFunction.Max(Range("$M$6:$M$100"))

Dn = WorksheetFunction.Max(Dplusmáximo, Dminusmáximo)
Dn = Format(Dn, "0.00000")
Cells(6, 14).Value = Dn

```

```

'Determinação do Dcrit conforme tabelas

Dim Dcrit As Double
Dim pvalue As Double

'Para alfa =0,01
If Sheets("Tela3").OptionButton1 = True Then

    If n = 4 Then
        Dcrit = 0.417

    ElseIf n = 5 Then
        Dcrit = 0.405

    ElseIf n = 6 Then
        Dcrit = 0.364

    ElseIf n = 7 Then
        Dcrit = 0.348

    ElseIf n = 8 Then
        Dcrit = 0.331

    ElseIf n = 9 Then
        Dcrit = 0.311

    ElseIf n = 10 Then
        Dcrit = 0.294

    ElseIf n = 11 Then
        Dcrit = 0.284

    ElseIf n = 12 Then
        Dcrit = 0.275

    ElseIf n = 13 Then
        Dcrit = 0.268

    ElseIf n = 14 Then
        Dcrit = 0.261

    ElseIf n = 15 Then
        Dcrit = 0.257

    ElseIf n = 16 Then
        Dcrit = 0.25

    ElseIf n = 17 Then
        Dcrit = 0.245

    ElseIf n = 18 Then
        Dcrit = 0.239

    ElseIf n = 19 Then
        Dcrit = 0.235

    ElseIf n = 20 Then
        Dcrit = 0.231

    ElseIf n = 25 Then
        Dcrit = 0.2

    ElseIf n = 30 Then
        Dcrit = 0.187

    Else
        Dcrit = 1.031 / Sqr(n)

```

```

End If

'Para alfa =0,05
ElseIf Sheets("Tela3").OptionButton2 = True Then

    If n = 4 Then
        Dcrit = 0.381

    ElseIf n = 5 Then
        Dcrit = 0.337

    ElseIf n = 6 Then
        Dcrit = 0.319

    ElseIf n = 7 Then
        Dcrit = 0.3

    ElseIf n = 8 Then
        Dcrit = 0.285

    ElseIf n = 9 Then
        Dcrit = 0.271

    ElseIf n = 10 Then
        Dcrit = 0.258

    ElseIf n = 11 Then
        Dcrit = 0.249

    ElseIf n = 12 Then
        Dcrit = 0.242

    ElseIf n = 13 Then
        Dcrit = 0.234

    ElseIf n = 14 Then
        Dcrit = 0.227

    ElseIf n = 15 Then
        Dcrit = 0.22

    ElseIf n = 16 Then
        Dcrit = 0.213

    ElseIf n = 17 Then
        Dcrit = 0.206

    ElseIf n = 18 Then
        Dcrit = 0.2

    ElseIf n = 19 Then
        Dcrit = 0.195

    ElseIf n = 20 Then
        Dcrit = 0.19

    ElseIf n = 25 Then
        Dcrit = 0.173

    ElseIf n = 30 Then
        Dcrit = 0.161

    Else
        Dcrit = 0.886 / Sqr(n)

    End If

```



```

'Para alfa =0,10
ElseIf Sheets("Tela3").OptionButton3 = True Then
  If n = 4 Then
    Dcrit = 0.352

    ElseIf n = 5 Then
      Dcrit = 0.315

    ElseIf n = 6 Then
      Dcrit = 0.294

    ElseIf n = 7 Then
      Dcrit = 0.276

    ElseIf n = 8 Then
      Dcrit = 0.261

    ElseIf n = 9 Then
      Dcrit = 0.249

    ElseIf n = 10 Then
      Dcrit = 0.239

    ElseIf n = 11 Then
      Dcrit = 0.23

    ElseIf n = 12 Then
      Dcrit = 0.223

    ElseIf n = 13 Then
      Dcrit = 0.214

    ElseIf n = 14 Then
      Dcrit = 0.207

    ElseIf n = 15 Then
      Dcrit = 0.201

    ElseIf n = 16 Then
      Dcrit = 0.195

    ElseIf n = 17 Then
      Dcrit = 0.189

    ElseIf n = 18 Then
      Dcrit = 0.184

    ElseIf n = 19 Then
      Dcrit = 0.179

    ElseIf n = 20 Then
      Dcrit = 0.174

    ElseIf n = 25 Then
      Dcrit = 0.158

    ElseIf n = 30 Then
      Dcrit = 0.144

    Else
      Dcrit = 0.805 / Sqr(n)

  End If

Else
  MsgBox "Selecione o nível de significância"
End If

```

```

Dcrit = Format(Dcrit, "0.0000")
Cells(6, 15).Value = Dcrit

'Cálculo do p-value
Dim Dmodif As Double
Dim A, B, C, E, F, G As Double

Dmodif = Dn * (Sqr(n) - 0.01 + (0.85 / Sqr(n)))

If Dn < 0.1 Then

A = -7.01256
B = 2.99587
C = -0.122119
G = (n + 2.78019)
E = 0.974598
F = 1.67997

pvalue = (1 - (Exp(A * G * ((Dn) ^ 2) + B * ((G) ^ (1 / 2) * Dn) + C + (E / ((n) ^ (1 / 2))) + (F / n)) / 100))

Else

    If Dmodif < 0.47 Then
        pvalue = (1 - (Exp(A * G * ((Dn) ^ 2) + B * ((G) ^ (1 / 2) * Dn) + C + (E / ((n) ^ (1 / 2))) + (F / n)) / 100))

    ElseIf Dmodif < 1.035 And Dmodif > 0.47 Then
        pvalue = (-3.1909 * ((Dmodif) ^ 3)) + (10.874 * ((Dmodif) ^ 2)) - (12.361 * Dmodif) + 4.6913

    ElseIf Dmodif > 1.035 Then
        pvalue = 379523 * Exp(-17.82 * Dmodif)

    End If
End If

Sheets("Tela3").TB_EstatisticaKS.Value = Dn
Sheets("Tela3").TB_pvalue.Value = pvalue

If Dn < Dcrit Then
    Sheets("Tela3").TB_Conclusao.Value = "NORMAL"
Else
    Sheets("Tela3").TB_Conclusao.Value = "NÃO-NORMAL"
End If
Cells(6, 15).Select
End Sub

```

ANEXO J – Código da ferramenta computacional para o Teste de Variâncias

```

Private Sub TesteVariância()

With Range("SF6:SF105").Select
    Selection.ClearContents
    Cells(6, 3).Select
End With

Dim cont1, cont2 As Long
Dim n1, n2, nd As Long
Dim GL, GL1, GL2 As Double
Dim i As Long

    cont1 = WorksheetFunction.CountA(Range("$C$6:$C$105"))
    cont2 = WorksheetFunction.CountA(Range("$E$6:$E$105"))

    n1 = cont1
    n2 = cont2

Dim Soma1, Soma2 As Double
Dim Desvio1, Desvio2 As Double
Dim Variancial, Variancia2 As Double
Dim X2calc As Double
Dim X2critE, X2critD As Double
Dim Fcalc As Double
Dim FcritE, FcritD As Double
Dim pvalue As Double
Dim Alfa As Double

If Sheets("TesteVariância").OP_Testex = True Then

    If n1 = 0 And n2 > 0 Then
        MsgBox "Insira dos dados na Coluna 1 para realizar o teste Qui-Quadrado"
        Exit Sub
    Else
        End If

        If n1 < 4 Then
            MsgBox "Para o teste Qui-Quadrado ou F, recomenda-se no mínimo 4
valores"
            Exit Sub
        Else
            End If
        Desvio1 = WorksheetFunction.StDev(Range("$C$6:$C$105"))
        Variancial = (Desvio1) ^ 2

    ElseIf Sheets("TesteVariância").OP_Testef = True Then
        If n1 < 4 Or n2 < 4 Then
            MsgBox "Para o teste F, recomenda-se no mínimo 4 valores em ambas colunas"
            Exit Sub
        Else
            End If

        Desvio1 = WorksheetFunction.StDev(Range("$C$6:$C$105"))
        Desvio2 = WorksheetFunction.StDev(Range("$E$6:$E$105"))
        Variancial = (Desvio1) ^ 2
        Variancia2 = (Desvio2) ^ 2
    End If

'Teste Qui - Quadrado

If Sheets("TesteVariância").OP_Testex = True Then
    VarianciaPopulacional = Planilha8.TB_HipoteseNula.Value
    GL = n1 - 1
    X2calc = ((n1 - 1) * Variancial) / VarianciaPopulacional

```

```

Cells(20, 20).Value = X2calc

If Sheets("TesteVariância").OP_Alfa95 = True Then
    Alfa = 0.05
    'Fornece o
número de graus de liberdade
    If Sheets("TesteVariância").OP_VariânciasDiferentes = True Then
'Teste Bilateral
        X2critE = WorksheetFunction.ChiSq_Inv((Alfa / 2), GL)
        X2critD = WorksheetFunction.ChiSq_Inv_RT((Alfa / 2), GL)
        pvalue1 = WorksheetFunction.ChiSq_Dist_RT(X2calc, GL)
        pvalue2 = WorksheetFunction.ChiSq_Dist(X2calc, GL, True)
        pvalue = 2 * WorksheetFunction.Min(pvalue1, pvalue2)

        ElseIf Sheets("TesteVariância").OP_VariânciaMaior = True Then
'Unilateral à direita
            X2critD = WorksheetFunction.ChiSq_Inv_RT(Alfa, GL)
            pvalue = WorksheetFunction.ChiSq_Dist_RT(X2calc, GL)

            ElseIf Sheets("TesteVariância").OP_VariânciaMenor = True Then
'Unilateral à esquerda
                X2critE = WorksheetFunction.ChiSq_Inv((Alfa), GL)
                pvalue = WorksheetFunction.ChiSq_Dist(X2calc, GL, True)
            End If

        ElseIf Sheets("TesteVariância").OP_Alfa99 = True Then
            Alfa = 0.01
            'Fornece o
número de graus de liberdade
            If Sheets("TesteVariância").OP_VariânciasDiferentes = True Then
'Teste Bilateral
                X2critE = WorksheetFunction.ChiSq_Inv((Alfa / 2), GL)
                X2critD = WorksheetFunction.ChiSq_Inv_RT(Alfa / 2, GL)
                pvalue1 = WorksheetFunction.ChiSq_Dist_RT(X2calc, GL)
                pvalue2 = WorksheetFunction.ChiSq_Dist(X2calc, GL, True)
                pvalue = 2 * WorksheetFunction.Min(pvalue1, pvalue2)

                ElseIf Sheets("TesteVariância").OP_VariânciaMaior = True Then
'Unilateral à direita
                    X2critD = WorksheetFunction.ChiSq_Inv_RT(Alfa, GL)
                    pvalue = WorksheetFunction.ChiSq_Dist_RT(X2calc, GL)

                    ElseIf Sheets("TesteVariância").OP_VariânciaMenor = True Then
'Unilateral à esquerda
                        X2critE = WorksheetFunction.ChiSq_Inv((Alfa), GL)
                        pvalue = WorksheetFunction.ChiSq_Dist(X2calc, GL, True)
                    End If

                ElseIf Sheets("TesteVariância").OP_Alfa90 = True Then
                    Alfa = 0.1
                    'Fornece o
número de graus de liberdade
                    If Sheets("TesteVariância").OP_VariânciasDiferentes = True Then
'Teste Bilateral
                        X2critE = WorksheetFunction.ChiSq_Inv((Alfa / 2), GL)
                        X2critD = WorksheetFunction.ChiSq_Inv_RT(Alfa / 2, GL)
                        pvalue1 = WorksheetFunction.ChiSq_Dist_RT(X2calc, GL)
                        pvalue2 = WorksheetFunction.ChiSq_Dist(X2calc, GL, True)
                        pvalue = 2 * WorksheetFunction.Min(pvalue1, pvalue2)

                        ElseIf Sheets("TesteVariância").OP_VariânciaMaior = True Then
'Unilateral à direita
                            X2critD = WorksheetFunction.ChiSq_Inv_RT(Alfa, GL)
                            pvalue = WorksheetFunction.ChiSq_Dist_RT(X2calc, GL)

                            ElseIf Sheets("TesteVariância").OP_VariânciaMenor = True Then
'Unilateral à esquerda
                                X2critE = WorksheetFunction.ChiSq_Inv((Alfa), GL)
                                pvalue = WorksheetFunction.ChiSq_Dist(X2calc, GL, True)
                            End If

                        End If

                    End If
                End If
            End If
        End If
    End If

```

```

Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_Variancial = Variancial
Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_n1 = n1
Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_GL = GL
Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_Alfa = Alfa
Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_Ho = VarianciaPopulacional

If Sheets("TesteVariância").OP_VariânciasDiferentes = True Then
    Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_Ho = "Igual a " + VarianciaPopulacional
    Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_Ha = "Diferente de " +
VarianciaPopulacional
    Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_X2critE.Value = X2critE
    Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_X2critD.Value = X2critD
    If X2calc < X2critE Or X2calc > X2critD Then
        Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_Conclusao.Value = "Rejeita-se
Hipótese Nula Ho"
    Else
        Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_Conclusao.Value = "Aceita-se
Hipótese Nula Ho"
    End If

ElseIf Sheets("TesteVariância").OP_VariânciaMaior = True Then
    Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_Ho = "Igual a " + VarianciaPopulacional
    Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_Ha = "Maior que " +
VarianciaPopulacional
    Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_X2critE.Value = "N/A"
    Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_X2critD.Value = X2critD
    If X2calc > X2critD Then
        Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_Conclusao.Value = "Rejeita-se
Hipótese Nula Ho"
    Else
        Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_Conclusao.Value = "Aceita-se
Hipótese Nula Ho"
    End If

ElseIf Sheets("TesteVariância").OP_VariânciaMenor = True Then
    Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_Ho = "Igual a " + VarianciaPopulacional
    Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_Ha = "Menor que " +
VarianciaPopulacional
    Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_X2critE.Value = X2critE
    Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_X2critD.Value = "N/A"
    If X2calc < X2critD Then
        Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_Conclusao.Value = "Rejeita-se
Hipótese Nula Ho"
    Else
        Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_Conclusao.Value = "Aceita-se
Hipótese Nula Ho"
    End If
End If

Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_X2calc.Value = X2calc
Frm_ResultadosTesteVariancia.QUI_TB_pvalue.Value = pvalue

Frm_ResultadosTesteVariancia.MultiPage1.Pages(0).Visible = True
Frm_ResultadosTesteVariancia.MultiPage1.Pages(1).Visible = False
Frm_ResultadosTesteVariancia.Show

'Teste F de Snedecor
ElseIf Sheets("TesteVariância").OP_TestesF = True Then
    RelaçãoVariância = Planilha8.TB_HipotesesNula.Value
    GL1 = n1 - 1
    GL2 = n2 - 1
    Fcalc = Variancial / Variancia2
    Cells(20, 25).Value = Fcalc
    Cells(6, 20).Select

If Sheets("TesteVariância").OP_Alfa95 = True Then

```

```

    Alfa = 0.05
    If Sheets("TesteVariância").OP_VariânciasDiferentes = True Then
'Teste Bilateral
        FcritE = WorksheetFunction.F_Inv((Alfa / 2), GL1, GL2)
        FcritD = WorksheetFunction.F_Inv_RT(Alfa / 2, GL1, GL2)
        pvalue1 = WorksheetFunction.F_Dist_RT(Fcalc, GL1, GL2)
        pvalue2 = WorksheetFunction.F_Dist(Fcalc, GL1, GL2, True)
        pvalue = 2 * WorksheetFunction.Min(pvalue1, pvalue2)

        ElseIf Sheets("TesteVariância").OP_VariânciaMaior = True Then
'Unilateral à direita
        FcritD = WorksheetFunction.F_Inv_RT(Alfa, GL1, GL2)
        pvalue = WorksheetFunction.F_Dist_RT(Fcalc, GL1, GL2)

        ElseIf Sheets("TesteVariância").OP_VariânciaMenor = True Then
'Unilateral à esquerda
        FcritE = WorksheetFunction.F_Inv(Alfa, GL1, GL2)
        pvalue = WorksheetFunction.F_Dist(Fcalc, GL1, GL2, True)
    End If

    ElseIf Sheets("TesteVariância").OP_Alfa99 = True Then
        Alfa = 0.01
        'Fornece o
número de graus de liberdade
        If Sheets("TesteVariância").OP_VariânciasDiferentes = True Then
'Teste Bilateral
            FcritE = WorksheetFunction.F_Inv((Alfa / 2), GL1, GL2)
            FcritD = WorksheetFunction.F_Inv_RT((Alfa / 2), GL1, GL2)

            pvalue1 = WorksheetFunction.F_Dist_RT(Fcalc, GL1, GL2)
            pvalue2 = WorksheetFunction.F_Dist(Fcalc, GL1, GL2, True)
            pvalue = 2 * WorksheetFunction.Min(pvalue1, pvalue2)

            ElseIf Sheets("TesteVariância").OP_VariânciaMaior = True Then
'Unilateral à direita
            FcritD = WorksheetFunction.F_Inv_RT((Alfa / 2), GL1, GL2)
            pvalue = WorksheetFunction.F_Dist_RT(Fcalc, GL1, GL2)

            ElseIf Sheets("TesteVariância").OP_VariânciaMenor = True Then
'Unilateral à esquerda
            FcritE = WorksheetFunction.F_Inv((Alfa / 2), GL1, GL2)
            pvalue = WorksheetFunction.F_Dist(Fcalc, GL1, GL2, True)
        End If

        ElseIf Sheets("TesteVariância").OP_Alfa90 = True Then
            Alfa = 0.1
            'Fornece o
número de graus de liberdade
            If Sheets("TesteVariância").OP_VariânciasDiferentes = True Then
'Teste Bilateral
                FcritE = WorksheetFunction.F_Inv((Alfa / 2), GL1, GL2)
                FcritD = WorksheetFunction.F_Inv_RT((Alfa / 2), GL1, GL2)

                pvalue1 = WorksheetFunction.F_Dist_RT(Fcalc, GL1, GL2)
                pvalue2 = WorksheetFunction.F_Dist(Fcalc, GL1, GL2, True)
                pvalue = 2 * WorksheetFunction.Min(pvalue1, pvalue2)

                ElseIf Sheets("TesteVariância").OP_VariânciaMaior = True Then
'Unilateral à direita
                FcritD = WorksheetFunction.F_Inv_RT((Alfa / 2), GL1, GL2)
                pvalue = WorksheetFunction.F_Dist_RT(Fcalc, GL1, GL2)

                ElseIf Sheets("TesteVariância").OP_VariânciaMenor = True Then
'Unilateral à esquerda
                FcritE = WorksheetFunction.F_Inv((Alfa / 2), GL1, GL2)
                pvalue = WorksheetFunction.F_Dist(Fcalc, GL1, GL2, True)
            End If
        End If

    Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_Desvio1 = Desvio1

```

```

Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_Desvio2 = Desvio2
Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_n1 = n1
Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_n2 = n2
Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_GL1 = GL1
Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_GL2 = GL2
Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_Alfa = Alfa
Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_Ho = RelaçãoVariância

If Sheets("TesteVariância").OP_VariânciasDiferentes = True Then
    Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_Ho = "As variâncias são iguais"
    Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_Ha = "As variâncias são diferentes"
    Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_FcritE.Value = FcritE
    Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_FcritD.Value = FcritD
    If Fcalc < FcritE Or Fcalc > FcritD Then
        Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_Conclusao.Value = "Rejeita-se
Hipótese Nula Ho"
    Else
        Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_Conclusao.Value = "Aceita-se
Hipótese Nula Ho"
    End If

ElseIf Sheets("TesteVariância").OP_VariânciaMaior = True Then
    Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_Ho = "Igual a " + RelaçãoVariância
    Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_Ha = "Maior que " + RelaçãoVariância
    Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_FcritE.Value = "N/A"
    Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_FcritD.Value = FcritD
    If Fcalc > FcritD Then
        Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_Conclusao.Value = "Rejeita-se
Hipótese Nula Ho"
    Else
        Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_Conclusao.Value = "Aceita-se
Hipótese Nula Ho"
    End If

ElseIf Sheets("TesteVariância").OP_VariânciaMenor = True Then
    Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_Ho = "Igual a " + RelaçãoVariância
    Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_Ha = "Menor que " + RelaçãoVariância
    Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_FcritE.Value = FcritE
    Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_FcritD.Value = "N/A"
    If Fcalc < FcritE Then
        Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_Conclusao.Value = "Rejeita-se
Hipótese Nula Ho"
    Else
        Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_Conclusao.Value = "Aceita-se
Hipótese Nula Ho"
    End If

End If

Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_Fcalc.Value = Fcalc
Frm_ResultadosTesteVariancia.F_TB_pvalue.Value = pvalue

Frm_ResultadosTesteVariancia.MultiPage1.Pages(0).Visible = False
Frm_ResultadosTesteVariancia.MultiPage1.Pages(1).Visible = True
Frm_ResultadosTesteVariancia.Show

End If

End Sub

```

ANEXO K – Código da ferramenta computacional para o Teste T de Student

```

Sub TesteT()

With Range("SF6:SF105").Select
    Selection.ClearContents
    Cells(6, 3).Select
End With

Dim cont1, cont2 As Long
Dim n1, n2, nd As Long
Dim GL As Double
Dim Soma1, Soma2, SomaD As Double
Dim Média1, Média2, MédiaD As Double
Dim Desvio1, Desvio2, DesvioI, DesvioD As Double
Dim tcalc As Double
Dim tcrit As Double
Dim x1 As Double
Dim x2 As Double
Dim di As Double
Dim pvalue As Double
Dim Alfa As Double
Dim i As Long

    cont1 = WorksheetFunction.CountA(Range("$C$6:$C$105"))
    cont2 = WorksheetFunction.CountA(Range("$E$6:$E$105"))
    n1 = cont1
    n2 = cont2
    Médiapopulacional = Planilha7.TB_HipoteseNula.Value

If Sheets("TesteT").OP_AmostraUnica = True Then

    If n1 < 4 Then
        MsgBox "Para o teste T de Student, recomenda-se no mínimo 4 valores"
        Exit Sub
    Else
        End If

    Soma1 = WorksheetFunction.Sum(Range("$C$6:$C$105"))
    Média1 = (Soma1) / n1
    Desvio1 = WorksheetFunction.StDev(Range("$C$6:$C$105"))

ElseIf Sheets("TesteT").OP_AmostraIndepVI = True Or
Sheets("TesteT").OP_AmostraIndepVD = True Or Sheets("TesteT").OP_Pareado = True Then

    If n1 < 4 Or n2 < 4 Then
        MsgBox "Para o teste T de Student, recomenda-se no mínimo 4 valores"
        Exit Sub
    Else
        End If

    Soma1 = WorksheetFunction.Sum(Range("$C$6:$C$105"))
    Média1 = (Soma1) / n1
    Desvio1 = WorksheetFunction.StDev(Range("$C$6:$C$105"))
    Soma2 = WorksheetFunction.Sum(Range("$E$6:$E$105"))
    Média2 = (Soma2) / n2
    Desvio2 = WorksheetFunction.StDev(Range("$E$6:$E$105"))
    DesvioI = Sqr(((n1 - 1) * ((Desvio1) ^ 2)) + ((n2 - 1) * ((Desvio2) ^ 2))) / (n1 +
n2 - 2))

End If

'-----Teste T Amostra Única
If Sheets("TesteT").OP_AmostraUnica = True Then
    GL = n1 - 1
    tcalc = (Média1 - Médiapopulacional) / ((Desvio1 / Sqr(n1)))
    'Calcula o número de graus de liberdade

```



```

If Sheets("TesteT").OP_Alfa95 = True Then
Alfa = 0.05
  If Sheets("TesteT").OP_MédiasDiferentes = True Then
    tcritpositivo = WorksheetFunction.T_Inv_2T((Alfa), n1 - 1)
    tcritnegativo = -WorksheetFunction.T_Inv_2T((Alfa), n1 - 1)
    pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_2T(Abs(tcalc), GL)

  ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMaior = True Then
    tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, n1 - 1)
    tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, n1 - 1)
    pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT(tcalc, GL)

  ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMenor = True Then
    tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, n1 - 1)
    tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, n1 - 1)
    pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT((-tcalc), GL)
  End If

ElseIf Sheets("TesteT").OP_Alfa99 = True Then
  Alfa = 0.01
  If Sheets("TesteT").OP_MédiasDiferentes = True Then
    tcritpositivo = WorksheetFunction.T_Inv_2T((Alfa), n1 - 1)
    tcritnegativo = -WorksheetFunction.T_Inv_2T((Alfa), n1 - 1)
    pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_2T(Abs(tcalc), GL)

    ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMaior = True Then
      tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, n1 - 1)
      tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, n1 - 1)
      pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT(tcalc, GL)

    ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMenor = True Then
      tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, n1 - 1)
      tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, n1 - 1)
      pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT((-tcalc), GL)
    End If

ElseIf Sheets("TesteT").OP_Alfa90 = True Then
  Alfa = 0.1
  If Sheets("TesteT").OP_MédiasDiferentes = True Then
    tcritpositivo = WorksheetFunction.T_Inv_2T((Alfa), n1 - 1)
    tcritnegativo = -WorksheetFunction.T_Inv_2T((Alfa), n1 - 1)
    pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_2T(Abs(tcalc), GL)

    ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMaior = True Then
      tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, n1 - 1)
      tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, n1 - 1)
      pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT(tcalc, GL)

    ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMenor = True Then
      tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, n1 - 1)
      tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, n1 - 1)
      pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT((-tcalc), GL)
    End If
  End If

Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_Médial.Value = Médial
Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_Desvio1.Value = Desvio1
Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_n1.Value = n1
Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_GL.Value = GL
Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_Alfa.Value = Alfa
Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_tcalc.Value = tcalc
Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_pvalue.Value = pvalue

If Sheets("TesteT").OP_MédiasDiferentes = True Then
  Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_Ho.Value = "Igual a " + Médiapopulacional
  Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_Ha.Value = "Diferente de " + Médiapopulacional
  Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_tcritnegativo.Value = tcritnegativo

```

```

Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_tcritpositivo.Value = tcritpositivo

If tcalc > tcritpositivo Or tcalc < tcritnegativo Then
    Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_Conclusao.Value = "Rejeita-se Hipótese Nula Ho"
Else
    Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_Conclusao.Value = "Não se Rejeita Hipótese Nula Ho"
End If

ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMaior = True Then
    Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_Ho.Value = "Menor ou igual a " + Médiapopulacional
    Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_Ha.Value = "Maior que " + Médiapopulacional
    Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_tcritnegativo.Value = "N/A"
    Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_tcritpositivo.Value = tcritpositivo

    If tcalc > tcritpositivo Then
        Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_Conclusao.Value = "Rejeita-se Hipótese Nula Ho"
    Else
        Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_Conclusao.Value = "Não se Rejeita Hipótese Nula Ho"
    End If

ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMenor = True Then
    Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_Ho.Value = "Maior ou igual a " + Médiapopulacional
    Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_Ha.Value = "Menor que " + Médiapopulacional
    Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_tcritnegativo.Value = tcritnegativo
    Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_tcritpositivo.Value = "N/A"

    If tcalc < tcritnegativo Then
        Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_Conclusao.Value = "Rejeita-se Hipótese Nula Ho"
    Else
        Frm_ResultadosTesteT.AM_TB_Conclusao.Value = "Não se Rejeita Hipótese Nula Ho"
    End If

End If

Frm_ResultadosTesteT.MultiPage1.Pages(0).Visible = True
Frm_ResultadosTesteT.MultiPage1.Pages(1).Visible = False
Frm_ResultadosTesteT.MultiPage1.Pages(2).Visible = False
Frm_ResultadosTesteT.Show

'-----
'Então, para amostras independentes com variâncias iguais
ElseIf Sheets("TesteT").OP_AmostraIndepVI = True Then
    GL = n1 + n2 - 2
    tcalc = (Média1 - Média2) / (Sqr((((DesvioI) ^ 2)) * ((1 / n1) + (1 / n2))))

    If Sheets("TesteT").OP_Alfa95 = True Then
        Alfa = 0.05
        If Sheets("TesteT").OP_MédiasDiferentes = True Then
            tcritpositivo = WorksheetFunction.T_Inv_2T(Alfa, GL)
            tcritnegativo = -WorksheetFunction.T_Inv_2T(Alfa, GL)
            pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_2T(Abs(tcalc), GL)

        ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMaior = True Then
            tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
            tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
            pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT(tcalc, GL)

        ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMenor = True Then
            tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
            tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
            pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT((-tcalc), GL)
        End If

    ElseIf Sheets("TesteT").OP_Alfa99 = True Then
        Alfa = 0.01
        If Sheets("TesteT").OP_MédiasDiferentes = True Then
            tcritpositivo = WorksheetFunction.T_Inv_2T(Alfa, GL)
            tcritnegativo = -WorksheetFunction.T_Inv_2T(Alfa, GL)

```

```

pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_2T(Abs(tcalc), GL)

ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMaior = True Then
    tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
    tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
    pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT(tcalc, GL)

ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMenor = True Then
    tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
    tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
    pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT((-tcalc), GL)
End If

ElseIf Sheets("TesteT").OP_Alfa90 = True Then
Alfa = 0.1
    If Sheets("TesteT").OP_MédiasDiferentes = True Then
        tcritpositivo = WorksheetFunction.T_Inv_2T((Alfa), GL)
        tcritnegativo = -WorksheetFunction.T_Inv_2T((Alfa), GL)
        pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_2T(Abs(tcalc), GL)

ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMaior = True Then
        tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
        tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
        pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT(tcalc, GL)

ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMenor = True Then
        tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
        tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
        pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT((-tcalc), GL)
    End If
End If

Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Média1.Value = Média1
Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Média2.Value = Média2
Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Desvio1.Value = Desvio1
Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Desvio2.Value = Desvio2
Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_n1.Value = n1
Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_n2.Value = n2
Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_GL.Value = GL
Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Alfa.Value = Alfa
Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_tcalc.Value = tcalc
Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_pvalue.Value = pvalue

If Sheets("TesteT").OP_MédiasDiferentes = True Then
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Ho.Value = "Igual a " + Médiapopulacional
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Ha.Value = "Diferente de " + Médiapopulacional
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_tcritnegativo.Value = tcritnegativo
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_tcritpositivo.Value = tcritpositivo

    If tcalc > tcrit Or tcalc < -tcrit Then
        Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Conclusao.Value = "Rejeita-se Hipótese Nula Ho"
    Else
        Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Conclusao.Value = "Não se Rejeita Hipótese Nula Ho"
    End If

ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMaior = True Then
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Ho.Value = "Igual a " + Médiapopulacional
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Ha.Value = "Maior que " + Médiapopulacional
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_tcritnegativo.Value = "N/A"
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_tcritpositivo.Value = tcritpositivo

    If tcalc > tcrit Then
        Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Conclusao.Value = "Rejeita-se Hipótese Nula Ho"
    Else
        Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Conclusao.Value = "Não se Rejeita Hipótese Nula Ho"
    End If

ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMenor = True Then
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Ho.Value = "Igual a " + Médiapopulacional

```

```

Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Ha.Value = "Menor que " + Médiapopulacional
Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_tcritnegativo.Value = tcritnegativo
Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_tcritpositivo.Value = "N/A"

If tcalc < -tcrit Then
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Conclusao.Value = "Rejeita-se Hipótese Nula Ho"
Else
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Conclusao.Value = "Não se Rejeita Hipótese Nula Ho"
End If
End If

Frm_ResultadosTesteT.MultiPagel.Pages(0).Visible = False
Frm_ResultadosTesteT.MultiPagel.Pages(1).Visible = True
Frm_ResultadosTesteT.MultiPagel.Pages(2).Visible = False
Frm_ResultadosTesteT.Show

'-----
'Para Teste T pareado:
ElseIf Sheets("TesteT").OP_Pareado = True Then

If Planilha7.TB_HipoteseNula.Value <> 0 Then
    MsgBox ("No teste T pareado não são admissíveis valores diferentes de zero para
Hipótese Nula.")
Else
    i = 6
    Do
        x1 = Cells(i, 3).Value
        x2 = Cells(i, 5).Value
        di = x1 - x2
        Cells(i, 500).Value = di
        i = i + 1
    Loop While Cells(i, 3) <> ""

SomaD = WorksheetFunction.Sum(Range("$SF$6:$SF$105"))
MédiaD = SomaD / n1
DesvioD = WorksheetFunction.StDev(Range("$SF$6:$SF$105"))

If DesvioD = 0 Then
    MsgBox ("Atenção! Não foi possível calcular a estatística T. Verifique o desvio
padrão das diferenças")
Exit Sub
Else
    tcalc = ((MédiaD) / (DesvioD / Sqr((n1))))
End If

GL = n1 - 1

If Sheets("TesteT").OP_Alfa95 = True Then
    Alfa = 0.05
    If Sheets("TesteT").OP_MédiasDiferentes = True Then
        tcritpositivo = WorksheetFunction.T_Inv_2T((Alfa), GL)
        tcritnegativo = -WorksheetFunction.T_Inv_2T((Alfa), GL)
        pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_2T(Abs(tcalc), GL)

    ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMaior = True Then
        tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
        tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
        pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT(tcalc, GL)

    ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMenor = True Then
        tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
        tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
        pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT((-tcalc), GL)

    End If

ElseIf Sheets("TesteT").OP_Alfa99 = True Then
    Alfa = 0.01

```

```

If Sheets("TesteT").OP_MédiasDiferentes = True Then
    tcritpositivo = WorksheetFunction.T_Inv_2T((Alfa), GL)
    tcritnegativo = -WorksheetFunction.T_Inv_2T((Alfa), GL)
    pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_2T(Abs(tcalc), GL)

ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMaior = True Then
    tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
    tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
    pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT(tcalc, GL)

ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMenor = True Then
    tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
    tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
    pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT((-tcalc), GL)
End If

ElseIf Sheets("TesteT").OP_Alfa90 = True Then
    Alfa = 0.1
    If Sheets("TesteT").OP_MédiasDiferentes = True Then
        tcritpositivo = WorksheetFunction.T_Inv_2T((Alfa), GL)
        tcritnegativo = -WorksheetFunction.T_Inv_2T((Alfa), GL)
        pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_2T(Abs(tcalc), GL)

    ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMaior = True Then
        tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
        tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
        pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT(tcalc, GL)

    ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMenor = True Then
        tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
        tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
        pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT((-tcalc), GL)
    End If
End If
End If

Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_MédiaD.Value = MédiaD
Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_DesvioD.Value = DesvioD
Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_n1.Value = n1
Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_GL.Value = GL
Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_Alfa.Value = Alfa
Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_tcalc.Value = tcalc
Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_pvalue.Value = pvalue

If Sheets("TesteT").OP_MédiasDiferentes = True Then
    Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_Ho.Value = "Igual a " + Médiapopulacional
    Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_Ha.Value = "Diferente de " + Médiapopulacional
    Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_tcritnegativo.Value = tcritnegativo
    Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_tcritpositivo.Value = tcritpositivo

    If tcalc > tcritpositivo Or tcalc < tcritnegativo Then
        Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_Conclusao.Value = "Rejeita-se Hipótese Nula Ho"
    Else
        Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_Conclusao.Value = "Não se Rejeita Hipótese Nula Ho"
    End If

ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMaior = True Then
    Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_Ho.Value = "Igual a " + Médiapopulacional
    Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_Ha.Value = "Maior que " + Médiapopulacional
    Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_tcritnegativo.Value = "N/A"
    Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_tcritpositivo.Value = tcritpositivo

    If tcalc > tcrit Then
        Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_Conclusao.Value = "Rejeita-se Hipótese Nula Ho"
    Else
        Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_Conclusao.Value = "Não se Rejeita Hipótese Nula Ho"
    End If

```

```

ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMenor = True Then
    Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_Ho.Value = "Igual a " + Médiapopulacional
    Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_Ha.Value = "Menor que " + Médiapopulacional
    Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_tcritnegativo.Value = tcritnegativo
    Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_tcritpositivo.Value = "N/A"

    If tcalc < -tcrit Then
        Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_Conclusao.Value = "Rejeita-se Hipótese Nula Ho"
    Else
        Frm_ResultadosTesteT.PAR_TB_Conclusao.Value = "Não se Rejeita Hipótese Nula Ho"
    End If
End If

Frm_ResultadosTesteT.MultiPage1.Pages(0).Visible = False
Frm_ResultadosTesteT.MultiPage1.Pages(1).Visible = False
Frm_ResultadosTesteT.MultiPage1.Pages(2).Visible = True
Frm_ResultadosTesteT.Show

'-----Para Teste T de amostras independentes com variâncias diferentes
ElseIf Sheets("TesteT").OP_AmostraIndepVD = True Then
    B = (((Desvio2) ^ 2) / n2) ^ 2) / (n2 - 1)
    A = (((Desvio1) ^ 2) / n1) ^ 2) / (n1 - 1)
    GL = (((((Desvio1) ^ 2) / n1) + ((Desvio2) ^ 2) / n2)) ^ 2) / (((((Desvio1)
^ 2) / n1) ^ 2) / (n1 - 1)) + (((Desvio2) ^ 2) / n2) ^ 2) / (n2 - 1))
    tcalc = (Média1 - Média2) / Sqr((((Desvio1) ^ 2) / n1) + (((Desvio2) ^ 2) /
n2)))

If Sheets("TesteT").OP_Alfa95 = True Then
    Alfa = 0.05
    If Sheets("TesteT").OP_MédiasDiferentes = True Then
        tcritpositivo = WorksheetFunction.T_Inv_2T(Alfa, GL)
        tcritnegativo = -WorksheetFunction.T_Inv_2T(Alfa, GL)
        pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_2T(Abs(tcalc), GL)

        ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMaior = True Then
            tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
            tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
            pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT(tcalc, GL)

        ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMenor = True Then
            tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
            tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
            pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT((-tcalc), GL)
        End If

ElseIf Sheets("TesteT").OP_Alfa99 = True Then
    Alfa = 0.01
    If Sheets("TesteT").OP_MédiasDiferentes = True Then
        tcritpositivo = WorksheetFunction.T_Inv_2T(Alfa, GL)
        tcritnegativo = -WorksheetFunction.T_Inv_2T(Alfa, GL)
        pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_2T(Abs(tcalc), GL)

        ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMaior = True Then
            tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
            tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
            pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT(tcalc, GL)

        ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMenor = True Then
            tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
            tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
            pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT((-tcalc), GL)
        End If

ElseIf Sheets("TesteT").OP_Alfa90 = True Then
    Alfa = 0.1
    If Sheets("TesteT").OP_MédiasDiferentes = True Then
        tcritpositivo = WorksheetFunction.T_Inv_2T(Alfa, GL)
        tcritnegativo = -WorksheetFunction.T_Inv_2T(Alfa, GL)

```

```

pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_2T(Abs(tcalc), GL)

ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMaior = True Then
    tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
    tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
    pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT(tcalc, GL)

ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMenor = True Then
    tcritnegativo = WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
    tcritpositivo = -WorksheetFunction.T_Inv(Alfa, GL)
    pvalue = WorksheetFunction.T_Dist_RT((-tcalc), GL)
End If
End If

Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Média1.Value = Média1
Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Média2.Value = Média2
Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Desvio1.Value = Desvio1
Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Desvio2.Value = Desvio2
Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_n1.Value = n1
Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_n2.Value = n2
Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_GL.Value = GL
Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Alfa.Value = Alfa
Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_tcalc.Value = tcalc
Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_pvalue.Value = pvalue

If Sheets("TesteT").OP_MédiasDiferentes = True Then
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Ho.Value = "Igual a " + Médiapopulacional
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Ha.Value = "Diferente de " + Médiapopulacional
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_tcritnegativo.Value = tcritnegativo
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_tcritpositivo.Value = tcritpositivo

    If tcalc > tcritnegativo Or tcalc < tcritpositivo Then
        Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Conclusao.Value = "Rejeita-se Hipótese Nula Ho"
    Else
        Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Conclusao.Value = "Não se Rejeita Hipótese Nula Ho"
    End If

ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMaior = True Then
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Ho.Value = "Igual a " + Médiapopulacional
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Ha.Value = "Maior que " + Médiapopulacional
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_tcritnegativo.Value = "N/A"
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_tcritpositivo.Value = tcritpositivo

    If tcalc > tcritpositivo Then
        Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Conclusao.Value = "Rejeita-se Hipótese Nula Ho"
    Else
        Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Conclusao.Value = "Não se Rejeita Hipótese Nula Ho"
    End If

ElseIf Sheets("TesteT").OP_MédiaMenor = True Then
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Ho.Value = "Igual a " + Médiapopulacional
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Ha.Value = "Menor que " + Médiapopulacional
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_tcritnegativo.Value = tcritnegativo
    Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_tcritpositivo.Value = "N/A"

    If tcalc < tcritnegativo Then
        Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Conclusao.Value = "Rejeita-se Hipótese Nula Ho"
    Else
        Frm_ResultadosTesteT.AI_TB_Conclusao.Value = "Não se Rejeita Hipótese Nula Ho"
    End If

End If

Frm_ResultadosTesteT.MultiPage1.Pages(0).Visible = False
Frm_ResultadosTesteT.MultiPage1.Pages(1).Visible = True
Frm_ResultadosTesteT.MultiPage1.Pages(2).Visible = False
Frm_ResultadosTesteT.Show

End If
End Sub

```

ANEXO L – Código da ferramenta computacional para o Teste Wilcoxon

```

Sub TesteWilcoxon()
    With Range("AB6:AT105").Select
        Selection.ClearContents
        Cells(6, 3).Select
    End With

    Dim cont1, cont2 As Long
    Dim n1, n2, nd As Long
    Dim Médiapopulacional As Double
    Dim i As Long
    Dim x1, x2, di As Double

    If Planilha1.TW_TB_HipóteseNula.Value = "" Then
        MsgBox ("Indique o valor de Hipótese Nula Desejado")
        Exit Sub
    Else
        Médiapopulacional = Planilha1.TW_TB_HipóteseNula.Value
        Planilha1.TW_TB_HipóteseNula.Value = Médiapopulacional
    End If
    cont1 = WorksheetFunction.CountA(Range("$C$6:$C$105"))
    cont2 = WorksheetFunction.CountA(Range("$E$6:$E$105"))
    n1 = cont1
    n2 = cont2

    '----- Teste Amostra Única
    If Sheets("TesteWilcoxon").TW_OP_Amostraúnica = True Then

        If n1 = 0 And n2 > 0 Then
            MsgBox "Insira dos dados na Coluna 1 para realizar o teste Wilcoxon para Amostra Única"
            Exit Sub
        Else
            End If

        If n1 < 4 Then
            MsgBox "Para o Teste Wilcoxon, recomenda-se no mínimo 4 valores"
            Exit Sub
        Else

            'Copia os dados de n1 e colar ordenados na coluna AC
            Range("C6:C105").Select
            Selection.Copy
            Range("AC6").Select
            Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone,
            SkipBlanks _
                :=False, Transpose:=False
            Application.CutCopyMode = False
            ActiveWorkbook.Worksheets("TesteWilcoxon").Sort.SortFields.Clear
            ActiveWorkbook.Worksheets("TesteWilcoxon").Sort.SortFields.Add2
            Key:=Range( _
                "AC6"), SortOn:=xlSortOnValues, Order:=xlAscending, DataOption:= _
                xlSortNormal
            With ActiveWorkbook.Worksheets("TesteWilcoxon").Sort
                .SetRange Range("AC6:AC105")
                .Header = xlNo
                .MatchCase = False
                .Orientation = xlTopToBottom
                .SortMethod = xlPinYin
                .Apply
            End With

            Dim Zi As Double
            Dim Xi As Double
            Dim AbsZi As Double
            Dim Zordenado As Double

```



```

i = 6
Do
Xi = Cells(i, 29).Value

Zi = Xi - Médiapopulacional
Cells(i, 30).Value = Zi

'Duplica coluna zi = xi - Ho
Range("AD6:AD105").Select
Selection.Copy
Range("AE6").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False

AbsZi = Abs(Zi)
Cells(i, 32).Value = AbsZi

i = i + 1
Loop While Cells(i, 29) <> ""

    End If

'-----Teste Wilcoxon Amostras Independentes
ElseIf Sheets("TesteWilcoxon").TW_OP_Amostrasindep = True Then
    MsgBox ("Teste Wilcoxon para Amostras independentes em desenvolvimento...")
    Exit Sub

'-----Teste Wilcoxon Pareado
ElseIf Sheets("TesteWilcoxon").TW_OP_Pareado = True Then

    If n1 < 4 Or n2 < 4 Or n1 <> n2 Then
        MsgBox "Para o teste Wilcoxon Pareado, recomenda-se no mínimo 4 valores em
        ambas colunas, e n1 precisa ser igual a n2"
        Exit Sub
    Else

i = 6
Do
x1 = Cells(i, 3).Value
x2 = Cells(i, 5).Value

Cells(i, 28).Value = Cells(i, 3).Value - Cells(i, 5).Value      'Retorna di como
a diferença entre os dados
di = Cells(i, 28).Value

'Duplica dados di, ignorando valores em branco e cola em Xi

Range("AB6:AB105").Select
Selection.Copy
Range("AD6").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False

Range("AD6:AD105").Select
Selection.Copy
Range("AE6").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False

AbsZi = Abs(Cells(i, 31).Value)
Cells(i, 32).Value = AbsZi

i = i + 1
Loop While Cells(i, 3) <> ""
    End If
End If

```

```
'-----A partir daqui os procedimentos de cálculo são iguais.

Range("AE6:AF105").Select
ActiveWorkbook.Worksheets("TesteWilcoxon").Sort.SortFields.Clear
ActiveWorkbook.Worksheets("TesteWilcoxon").Sort.SortFields.Add2 Key:=Range( _
    "AF6:AF105"), SortOn:=xlSortOnValues, Order:=xlAscending, DataOption:= _
    xlSortNormal
With ActiveWorkbook.Worksheets("TesteWilcoxon").Sort
    .SetRange Range("AE6:AF105")
    .Header = xlGuess
    .MatchCase = False
    .Orientation = xlTopToBottom
    .SortMethod = xlPinYin
    .Apply
End With
Range("AE6:AE105").Select
Selection.Copy
Range("AG6").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
    :=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False

'Duplica coluna |Zi|
Range("AF6:AF105").Select
Selection.Copy
Range("AH6").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
    :=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False

'Cálculo do número de postos

Dim Ri As Double
Dim NumZero, NumTies As Double
i = 6
Do
    Ri = WorksheetFunction.Rank_Avg(Cells(i, 34).Value, Range("$AH$6:$AH$105"), 1)
    Cells(i, 35).Value = Ri
    i = i + 1
Loop While Cells(i, 3) <> ""

Dim Psi As Long
Dim RiPsi As Double
i = 6
Do
    If Cells(i, 33).Value > 0 Then
        Psi = 1
        Cells(i, 36).Value = Psi
    Else
        Psi = 0
        Cells(i, 36).Value = Psi
    End If

    RiPsi = Cells(i, 35).Value * Cells(i, 36)
    Cells(i, 37).Value = RiPsi
    i = i + 1
Loop While Cells(i, 3) <> ""

'Cálculo da Estatística T e dos valores críticos Tinf e Tsup
Dim T, Tinf, Tsup As Double
Dim ET, VarT, A As Double
Dim Alfa, Z, pvalue, Lowerpvalue, Upperpvalue As Double

T = WorksheetFunction.Sum(Range("$AK$6:$AK$105"))
Cells(6, 38).Value = T
ET = n1 * (n1 + 1) / 4
VarT = (n1 * (n1 + 1) * ((2 * n1) + 1)) / 24
A = T - ET
```

```

'-----Bilateral
If Sheets("TesteWilcoxon").TW_OP_MedDif = True Then
  If Sheets("TesteWilcoxon").TW_OP_Alfa95 = True Then
    Alfa = 0.05
    If n1 <= 50 Then

      If n1 = 4 Then
        Tinf = 0
      ElseIf n1 = 5 Then
        Tinf = 0
      ElseIf n1 = 6 Then
        Tinf = 1
      ElseIf n1 = 7 Then
        Tinf = 3
      ElseIf n1 = 8 Then
        Tinf = 4
      ElseIf n1 = 9 Then
        Tinf = 6
      ElseIf n1 = 10 Then
        Tinf = 9
      ElseIf n1 = 11 Then
        Tinf = 11
      ElseIf n1 = 12 Then
        Tinf = 14
      ElseIf n1 = 13 Then
        Tinf = 18
      ElseIf n1 = 14 Then
        Tinf = 22
      ElseIf n1 = 15 Then
        Tinf = 26
      ElseIf n1 = 16 Then
        Tinf = 30
      ElseIf n1 = 17 Then
        Tinf = 35
      ElseIf n1 = 18 Then
        Tinf = 41
      ElseIf n1 = 19 Then
        Tinf = 47
      ElseIf n1 = 20 Then
        Tinf = 53
      ElseIf n1 = 21 Then
        Tinf = 59
      ElseIf n1 = 22 Then
        Tinf = 67
      ElseIf n1 = 23 Then
        Tinf = 74
      ElseIf n1 = 24 Then
        Tinf = 82
      ElseIf n1 = 25 Then
        Tinf = 90
      ElseIf n1 = 26 Then
        Tinf = 99
      ElseIf n1 = 27 Then
        Tinf = 108
      ElseIf n1 = 28 Then
        Tinf = 117
      ElseIf n1 = 29 Then
        Tinf = 127
      ElseIf n1 = 30 Then
        Tinf = 138
      ElseIf n1 = 31 Then
        Tinf = 148
      ElseIf n1 = 32 Then
        Tinf = 160
      ElseIf n1 = 33 Then
        Tinf = 171
      ElseIf n1 = 34 Then
        Tinf = 183
    
```

```

ElseIf n1 = 35 Then
Tinf = 196
ElseIf n1 = 36 Then
Tinf = 209
ElseIf n1 = 37 Then
Tinf = 222
ElseIf n1 = 38 Then
Tinf = 236
ElseIf n1 = 39 Then
Tinf = 250
ElseIf n1 = 40 Then
Tinf = 265
ElseIf n1 = 41 Then
Tinf = 280
ElseIf n1 = 42 Then
Tinf = 295
ElseIf n1 = 43 Then
Tinf = 311
ElseIf n1 = 44 Then
Tinf = 328
ElseIf n1 = 45 Then
Tinf = 344
ElseIf n1 = 46 Then
Tinf = 362
ElseIf n1 = 47 Then
Tinf = 379
ElseIf n1 = 48 Then
Tinf = 397
ElseIf n1 = 49 Then
Tinf = 416
ElseIf n1 = 50 Then
Tinf = 435
End If
Else
Tinf = ET + (WorksheetFunction.Norm_S_Inv(Alfa / 2) * Sqr(VarT))
End If

ElseIf Sheets("TesteWilcoxon").TW_OP_Alfa90 = True Then
Alfa = 0.1
If n1 <= 50 Then
If n1 = 4 Then
Tinf = 0
ElseIf n1 = 5 Then
Tinf = 1
ElseIf n1 = 6 Then
Tinf = 3
ElseIf n1 = 7 Then
Tinf = 4
ElseIf n1 = 8 Then
Tinf = 6
ElseIf n1 = 9 Then
Tinf = 9
ElseIf n1 = 10 Then
Tinf = 11
ElseIf n1 = 11 Then
Tinf = 14
ElseIf n1 = 12 Then
Tinf = 18
ElseIf n1 = 13 Then
Tinf = 22
ElseIf n1 = 14 Then
Tinf = 26
ElseIf n1 = 15 Then
Tinf = 31
ElseIf n1 = 16 Then
Tinf = 36
ElseIf n1 = 17 Then
Tinf = 42

```

```

ElseIf n1 = 18 Then
Tinf = 48
ElseIf n1 = 19 Then
Tinf = 54
ElseIf n1 = 20 Then
Tinf = 61
ElseIf n1 = 21 Then
Tinf = 68
ElseIf n1 = 22 Then
Tinf = 76
ElseIf n1 = 23 Then
Tinf = 84
ElseIf n1 = 24 Then
Tinf = 92
ElseIf n1 = 25 Then
Tinf = 101
ElseIf n1 = 26 Then
Tinf = 111
ElseIf n1 = 27 Then
Tinf = 120
ElseIf n1 = 28 Then
Tinf = 131
ElseIf n1 = 29 Then
Tinf = 141
ElseIf n1 = 30 Then
Tinf = 152
ElseIf n1 = 31 Then
Tinf = 164
ElseIf n1 = 32 Then
Tinf = 176
ElseIf n1 = 33 Then
Tinf = 188
ElseIf n1 = 34 Then
Tinf = 201
ElseIf n1 = 35 Then
Tinf = 214
ElseIf n1 = 36 Then
Tinf = 228
ElseIf n1 = 37 Then
Tinf = 242
ElseIf n1 = 38 Then
Tinf = 257
ElseIf n1 = 39 Then
Tinf = 272
ElseIf n1 = 40 Then
Tinf = 287
ElseIf n1 = 41 Then
Tinf = 303
ElseIf n1 = 42 Then
Tinf = 320
ElseIf n1 = 43 Then
Tinf = 337
ElseIf n1 = 44 Then
Tinf = 354
ElseIf n1 = 45 Then
Tinf = 372
ElseIf n1 = 46 Then
Tinf = 390
ElseIf n1 = 47 Then
Tinf = 408
ElseIf n1 = 48 Then
Tinf = 428
ElseIf n1 = 49 Then
Tinf = 447
ElseIf n1 = 50 Then
Tinf = 467
End If
Else

```

```

        Tinf = ET + (WorksheetFunction.Norm_S_Inv(Alfa / 2) * Sqr(VarT))
    End If

ElseIf Sheets("TesteWilcoxon").TW_OP_Alfa99 = True Then
    Alfa = 0.01
    If n1 <= 50 Then
        If n1 = 4 Then
            Tinf = 0
        ElseIf n1 = 5 Then
            Tinf = 0
        ElseIf n1 = 6 Then
            Tinf = 0
        ElseIf n1 = 7 Then
            Tinf = 0
        ElseIf n1 = 8 Then
            Tinf = 1
        ElseIf n1 = 9 Then
            Tinf = 2
        ElseIf n1 = 10 Then
            Tinf = 4
        ElseIf n1 = 11 Then
            Tinf = 6
        ElseIf n1 = 12 Then
            Tinf = 8
        ElseIf n1 = 13 Then
            Tinf = 10
        ElseIf n1 = 14 Then
            Tinf = 13
        ElseIf n1 = 15 Then
            Tinf = 16
        ElseIf n1 = 16 Then
            Tinf = 20
        ElseIf n1 = 17 Then
            Tinf = 24
        ElseIf n1 = 18 Then
            Tinf = 28
        ElseIf n1 = 19 Then
            Tinf = 33
        ElseIf n1 = 20 Then
            Tinf = 38
        ElseIf n1 = 21 Then
            Tinf = 44
        ElseIf n1 = 22 Then
            Tinf = 49
        ElseIf n1 = 23 Then
            Tinf = 55
        ElseIf n1 = 24 Then
            Tinf = 62
        ElseIf n1 = 25 Then
            Tinf = 69
        ElseIf n1 = 26 Then
            Tinf = 76
        ElseIf n1 = 27 Then
            Tinf = 84
        ElseIf n1 = 28 Then
            Tinf = 92
        ElseIf n1 = 29 Then
            Tinf = 101
        ElseIf n1 = 30 Then
            Tinf = 110
        ElseIf n1 = 31 Then
            Tinf = 119
        ElseIf n1 = 32 Then
            Tinf = 129
        ElseIf n1 = 33 Then
            Tinf = 139
        ElseIf n1 = 34 Then
            Tinf = 149
    End If
End If

```

```

        ElseIf n1 = 35 Then
            Tinf = 160
        ElseIf n1 = 36 Then
            Tinf = 172
        ElseIf n1 = 37 Then
            Tinf = 184
        ElseIf n1 = 38 Then
            Tinf = 196
        ElseIf n1 = 39 Then
            Tinf = 208
        ElseIf n1 = 40 Then
            Tinf = 221
        ElseIf n1 = 41 Then
            Tinf = 235
        ElseIf n1 = 42 Then
            Tinf = 248
        ElseIf n1 = 43 Then
            Tinf = 263
        ElseIf n1 = 44 Then
            Tinf = 277
        ElseIf n1 = 45 Then
            Tinf = 292
        ElseIf n1 = 46 Then
            Tinf = 308
        ElseIf n1 = 47 Then
            Tinf = 324
        ElseIf n1 = 48 Then
            Tinf = 340
        ElseIf n1 = 49 Then
            Tinf = 357
        ElseIf n1 = 50 Then
            Tinf = 374
        End If
    Else
        Tinf = ET + (WorksheetFunction.Norm_S_Inv(Alfa / 2) * Sqr(VarT))
    End If
End If

Tsup = (n1 * (n1 + 1) / 2) - Tinf
Cells(6, 39).Value = Tinf
Cells(6, 40).Value = Tsup

'-----p-valor

Dim probability As Double
Dim Zlower, Zupper As Double
Dim AddSqi, SubSqi As Double
Dim Mediana1, MedianaD As Double

If Sheets("TesteWilcoxon").TW_OP_MedDif = True Then

If n1 <= 10 Then
    If n1 = 4 Then
        If T = 0 Then
            probability = 0.05
        Else
            probability = (-0.0583 * ((T) ^ 3)) + (0.8741 * ((T) ^ 2)) + (6.2121 * T) +
4.3706
        End If

    ElseIf n1 = 5 Then
        If T >= 0 And T <= 4 Then
            probability = (-1.25 * (T) ^ 2) - (1 * T) + 3.25
        ElseIf T > 4 And T <= 15 Then
            probability = (-0.0506 * ((T) ^ 3)) + (1.1824 * ((T) ^ 2)) - (0.3251 * T) +
7.3605
        End If
    End If

```

```

ElseIf n1 = 6 Then
  If T >= 0 And T < 4 Then
    probability = (-0.0833 * (T) ^ 2) + (1.5833 * T) + 1
  ElseIf T >= 4 And T < 18 Then
    probability = (-0.0332 * ((T) ^ 3)) + (1.0445 * ((T) ^ 2)) - (3.4421 * T) +
9.3752
  ElseIf T >= 18 And T <= 21 Then
    probability = (-0.4464 * (T) ^ 2) + (19.179 * T) - 106.54
  End If

ElseIf n1 = 7 Then
  If T >= 1 And T < 4 Then
    probability = (-0.0833 * (T) ^ 2) + (0.4167 * T) + 0.5
  ElseIf T >= 4 And T < 22 Then
    probability = (-0.0196 * ((T) ^ 3)) + (0.8138 * ((T) ^ 2)) - (4.9448 * T) +
13.511
  ElseIf T >= 22 And T <= 28 Then
    probability = (-0.2533 * (T) ^ 2) + (14.278 * T) - 101.55
  End If

ElseIf n1 = 8 Then
  If T >= 1 And T < 9.5 Then
    probability = (-0.1 * (T) ^ 2) + (0.1895 * T) + 0.2054
  ElseIf T >= 9.5 And T < 27 Then
    probability = (-0.0098 * ((T) ^ 3)) + (0.5269 * ((T) ^ 2)) - (4.2334 * T) +
12.395
  ElseIf T >= 27 And T <= 36 Then
    probability = (-0.0948 * (T) ^ 2) + (7.0761 * T) - 31.927
  End If

ElseIf n1 = 9 Then
  If T >= 2 And T < 11 Then
    probability = (0.0586 * (T) ^ 2) + (0.0116 * T) + 0.183
  ElseIf T >= 11 And T <= 32 Then
    probability = (-0.0071 * ((T) ^ 3)) + (0.4814 * ((T) ^ 2)) - (6.41 * T) +
31.761
  ElseIf T > 32 And T <= 45 Then
    probability = (-0.1004 * (T) ^ 2) + (8.76 * T) - 91.254
  End If

ElseIf n1 = 10 Then
  If T >= 4 And T < 15 Then
    probability = (0.0675 * (T) ^ 2) - (0.4087 * T) + 1.0135
  ElseIf T >= 15 And T <= 37 Then
    probability = (-0.0039 * ((T) ^ 3)) + (0.323 * ((T) ^ 2)) - (5.0724 * T) +
26.64
  ElseIf T > 37 And T <= 55 Then
    probability = (-0.0575 * (T) ^ 2) + (6.1151 * T) - 62.656
  End If

End If

If probability > 50 Then
  pvalue = 2 * (1 - (probability / 100))
Else
  pvalue = (probability / 100)
End If

ElseIf n1 > 10 And n1 <= 50 Then

i = 6
Do
AddSqi = Cells(i, 37).Value + 1
SubSqi = Cells(i, 37).Value - 1
Cells(i, 45).Value = AddSqi
Cells(i, 46).Value = SubSqi
i = i + 1

```



```

Loop While Cells(i, 3) <> ""

Zlower = (WorksheetFunction.Sum(Range("$AS$6:$AS$105"))) / (Sqr(n1 * (n1 + 1) * ((2
* n1) + 1) / 6))
Zupper = (WorksheetFunction.Sum(Range("$AT$6:$AT$105"))) / (Sqr(n1 * (n1 + 1) * ((2
* n1) + 1) / 6))
Z = WorksheetFunction.Min(Zlower, Zupper)
If Zlower < Zupper Then
    pvalue = 2 * WorksheetFunction.Norm_S_Dist(Zlower, True)
Else
    pvalue = 2 * (1 - (WorksheetFunction.Norm_S_Dist(Zupper, True)))
End If

ElseIf n1 > 50 Then

    If A >= 0 Then
        Z = (T - 0.5 - ET) / Sqr(VarT)
        pvalue = 2 * (1 - WorksheetFunction.Norm_S_Dist(Z, True))

    Else
        Z = (T + 0.5 - ET) / Sqr(VarT)
        pvalue = 2 * WorksheetFunction.Norm_S_Dist(Z, True)
    End If
End If

ElseIf Sheets("TesteWilcoxon").TW_OP_MedMaior = True Then

    'procedimento se repete com pequenas alterações

ElseIf Sheets("TesteWilcoxon").TW_OP_MedMenor = True Then
    'procedimento se repete com pequenas alterações
End If

Cells(6, 41).Value = pvalue

If Sheets("TesteWilcoxon").TW_OP_Amostraúnica = True Then
    Mediana1 = WorksheetFunction.Median(Range("C6:C105"))
ElseIf Sheets("TesteWilcoxon").TW_OP_Pareado = True Then
    MedianaD = WorksheetFunction.Median(Range("AB6:AB105"))
End If

Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_Med1.Value = Mediana1
Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_MedD.Value = MedianaD
Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_n1.Value = n1
Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_n1.Value = n1
Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_Alfa.Value = Alfa
Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_Alfa.Value = Alfa
Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_T.Value = T
Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_T.Value = T
Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_pvalue.Value = pvalue
Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_pvalue.Value = pvalue

If Sheets("TesteWilcoxon").TW_OP_MedDif = True Then
Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_Ho = "Igual a " +
Planilha1.TW_TB_HipóteseNula.Value
Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_Ha = "Diferente de " +
Planilha1.TW_TB_HipóteseNula.Value
Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_Ho = "Igual a " +
Planilha1.TW_TB_HipóteseNula.Value
Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_Ha = "Diferente de " +
Planilha1.TW_TB_HipóteseNula.Value
Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_Tinf.Value = Tinf
Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_Tinf.Value = Tinf
Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_Tsup.Value = Tsup
Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_Tsup.Value = Tsup

If T < Tinf Or T > Tsup Then

```

```

Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_Conclusão.Value = "Rejeita-se Hipótese nula Ho"
Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_Conclusão.Value = "Rejeita-se Hipótese nula Ho"
Else
Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_Conclusão.Value="Não se rejeita Hipótese nula Ho"
Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_Conclusão.Value= "Não se rejeita Hipótese nula Ho"
End If

```

```

ElseIf Sheets("TesteWilcoxon").TW_OP_MedMaior = True Then
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_Ho = "Menor ou igual a " +
Planilha1.TW_TB_HipóteseNula.Value
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_Ha = "Maior que " +
Planilha1.TW_TB_HipóteseNula.Value
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_Ho = "Menor ou igual a " +
Planilha1.TW_TB_HipóteseNula.Value
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_Ha = "Maior que " +
Planilha1.TW_TB_HipóteseNula.Value
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_Tinf.Value = Tinf
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_Tinf.Value = Tinf
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_Tsup.Value = "-"
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_Tsup.Value = "-"

```

```

If T > Tinf Then
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_Conclusão.Value = "Rejeita-se Hipótese nula Ho"
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_Conclusão.Value = "Rejeita-se Hipótese nula Ho"
Else
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_Conclusão.Value = "Não se rejeita Hipótese nula Ho"
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_Conclusão.Value = "Não se rejeita Hipótese nula Ho"
End If

```

```

ElseIf Sheets("TesteWilcoxon").TW_OP_MedMenor = True Then
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_Ho = "Maior ou igual a " +
Planilha1.TW_TB_HipóteseNula.Value
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_Ha = "Menor que " +
Planilha1.TW_TB_HipóteseNula.Value
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_Ho = "Maior ou igual a " +
Planilha1.TW_TB_HipóteseNula.Value
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_Ha = "Menor que " +
Planilha1.TW_TB_HipóteseNula.Value
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_Tinf.Value = Tinf
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_Tinf.Value = Tinf
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_Tsup.Value = "-"
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_Tsup.Value = "-"

```

```

If T < Tinf Then
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_Conclusão.Value = "Rejeita-se Hipótese nula Ho"
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_Conclusão.Value = "Rejeita-se Hipótese nula Ho"
Else
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWAU_TB_Conclusão.Value = "Não se rejeita Hipótese nula Ho"
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.TWP_TB_Conclusão.Value = "Não se rejeita Hipótese nula Ho"
End If
End If

```

```

Cells(6, 3).Select

```

```

If Sheets("TesteWilcoxon").TW_OP_Amostraúnica = True Then
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.MultiPage1.Pages(0).Visible = True
    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.MultiPage1.Pages(1).Visible = False
ElseIf Sheets("TesteWilcoxon").TW_OP_Pareado = True Then

```

```
        Frm_ResultadosTesteWilcoxon.MultiPage1.Pages(0).Visible = False
        Frm_ResultadosTesteWilcoxon.MultiPage1.Pages(1).Visible = True
    End If

    Frm_ResultadosTesteWilcoxon.Show

End Sub
```

ANEXO M – Código da ferramenta computacional para os parâmetros estatísticos

```

Sub ParâmetrosEstatísticos()

With Range("SF6:SF105").Select
Selection.ClearContents
Cells(1, 1).Select
End With

Dim cont As Long
Dim n As Long

    cont = WorksheetFunction.CountA(Range("$C$6:$C$105"))
    n = cont

    If n < 2 Then

        MsgBox "Recomenda-se no mínimo 2 pares de dados para a comparação"
        Exit Sub

    Else
        End If

Dim Oi As Double
Dim Pi As Double
Dim MO As Double
Dim SomaO As Double
Dim CD, EF, CRM, EM, DM As Double
Dim i As Long
Dim A, B, C, D, E, F, G As Double
Dim SomaA, SomaB, SomaC, SomaD, SomaE As Double

Sheets("ParâmetrosEstatísticos").Activate

    SomaO = WorksheetFunction.Sum(Range("$C$6:$C$105"))

i = 6
SomaA = 0
SomaB = 0
SomaC = 0
SomaD = 0
SomaE = 0
SomaG = 0

Do
Oi = Cells(i, 3).Value
Pi = Cells(i, 4).Value

MO = (SomaO / n)
A = ((Oi - MO) ^ 2)
B = ((Pi - MO) ^ 2)
C = Oi
D = Pi
E = (Oi - Pi)
F = (Abs(Oi - Pi))
G = (Oi - Pi) ^ 2
Cells(i, 500).Value = F

SomaA = SomaA + A
SomaB = SomaB + B
SomaC = SomaC + C
SomaD = SomaD + D
SomaE = SomaE + E
SomaF = SomaF + F
SomaG = SomaG + G

```

```

If SomaB = 0 Then
MsgBox "ERRO! Não é permitido divisão por zero! Possivelmente os dados observados são
todos iguais"
Exit Sub
Else

CD = SomaA / SomaB
EF = (SomaA - SomaG) / (SomaA)
CRM = (SomaC - SomaD) / (SomaC)
DM = SomaF / n
EM = WorksheetFunction.Max(Range("$SF$6:$SF$105"))
RMSD = Sqr((SomaG) / n)

End If

i = i + 1
Loop While Cells(i, 3) <> ""

Frm_ResultadosParâmetros.TB_ParâmetroCD.Value = CD
Frm_ResultadosParâmetros.TB_ParâmetroEF.Value = EF
Frm_ResultadosParâmetros.TB_ParâmetroCRM.Value = CRM
Frm_ResultadosParâmetros.TB_ParâmetroEM.Value = EM
Frm_ResultadosParâmetros.TB_ParâmetroDM.Value = DM
Frm_ResultadosParâmetros.TB_ParâmetroRMSD.Value = RMSD
Cells(6, 7).Select

Frm_ResultadosParâmetros.Show

End Sub

```