

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

KRISHNA DAHER SODRÉ CAMPANA

**SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM TRECHO DO RIO
DOCE (ES) UTILIZANDO MODELAGEM COMPUTACIONAL**

VITÓRIA
2018

KRISHNA DAHER SODRÉ CAMPANA

**SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM TRECHO DO RIO
DOCE (ES) UTILIZANDO MODELAGEM COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na área de concentração de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Rigo

VITÓRIA

2018

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema
Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e
elaborada pelo autor

D129 Daher Sodré Campana, Krishna, 1986-
s Simulação do transporte de sedimentos em trecho do
rio Doce (ES) utilizando modelagem computacional /
Krishna Daher
Sodré Campana. - 2018.
127 f. : il.

Orientador: Daniel Rigo.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro
Tecnológico.

1. Recursos Hídricos. 2. Transporte de Sedimentos.
3. Rio Doce. 4. Modelagem Computacional. 5. HEC-
RAS. I. Rigo, Daniel. II. Universidade Federal do
Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 628



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM TRECHO DO RIO DOCE (ES) UTILIZANDO MODELAGEM COMPUTACIONAL

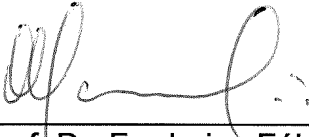
Krishna Daher Sodré Campana

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Daniel Rigo
Orientador - PPGEA/CT/UFES



Prof. Dr. Diogo Costa Buarque
Examinador Interno – PPGEA/UFES



Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad
Examinador Externo – DHS/USP

Diogo Costa Buarque
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Vitória-ES, 24 de setembro de 2018.

A Matemática é a única linguagem que
temos em comum com a natureza.

Stephen Hawking

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa de Pós Graduação de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo por abrir as portas e me conceder a possibilidade de realizar este trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Daniel Rigo, por toda paciência, auxílio e pelo apoio intelectual, que contribuíram para o meu crescimento.

À Bárbara, por toda cooperação, amizade, e momentos compartilhados durante nossas pesquisas, que agregaram valores a nível pessoal e científico.

À Fernanda, pela força inicial para utilizar o programa HEC-RAS.

À Livia, por disponibilizar de seu tempo e fornecer os dados de pesquisa, auxiliando nas dúvidas.

Ao pessoal do GEARH, pelo auxílio no laboratório de Hidráulica.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

A minha mãe, por todo incentivo para que eu chegasse até o fim diante dos contratempos passados durante esses anos.

Aos demais companheiros de mestrado, por todo o incentivo e conhecimentos compartilhados.

Aos familiares e amigos, que ficaram na torcida para que finalizasse mais uma etapa na vida.

RESUMO

Conhecer o comportamento do ciclo hidrossedimentológico é essencial para uma boa gestão e suporte aos recursos hídricos. Modelos numéricos foram desenvolvidos a fim de avaliar a evolução geomorfológica de corpos hídricos, podendo auxiliar em futuros projetos de engenharia para tomada de decisões preventivas e/ou corretivas. Por essas questões, a pesquisa teve como objetivo avaliar o transporte de sedimentos em um pequeno trecho do rio Doce, localizado em Colatina – ES, utilizando o software HEC-RAS. Foram levantados dados de batimetria, seção do rio, vazões líquidas e sólidas, temperatura e granulometria, entre os períodos de dezembro de 2011 a fevereiro de 2012. No programa, foram escolhidas três equações de transporte, que foram Engelund e Hansen (1967), Ackers e White (1973) e Yang (1973). O modelo foi calibrado e ajustado os valores de coeficiente de Manning nas seções. Foram aplicados os coeficientes de correlação, determinação e erro médio quadrático para avaliar os melhores ajustes de parâmetros. Ao comparar as elevações observadas com as simuladas, foi possível concluir que a equação de Engelund e Hansen, com coeficiente de correlação de 0,029 na calha e 0,055 nas margens, resultou em um perfil longitudinal do leito mais condizente com a realidade. Os piores resultados se apresentaram com a equação de Ackers e White (1973). Com isso, foram extraídos os valores do modelo ajustado de concentração de sedimentos, descarga sólida total, e alterações no leito de erosão/sedimentação no leito. Com os valores de concentração de sedimentos e vazões, foram estimados os valores de descarga em suspensão e de material de leito. Os resultados mostraram valores de descarga total nas seções variando entre 2.226 ton/dia a 27.401 ton/dia. A descarga de material de leito esteve entre 32 ton/dia a 4.377 ton/dia. No leito houve uma tendência maior à sedimentação no período analisado. O modelo atendeu ao objetivo da pesquisa, gerando valores com um nível de detalhamento interessante nas seções quando se avalia sua empregabilidade em apoio à gestão dos recursos hídricos. Todavia, é necessário realizar mais estudos para obtenção de um levantamento mais completo da região e empregar o modelo para verificar a eficácia da escolha dos parâmetros em trechos de mesmas características.

Palavras-chave: Recursos Hídricos. Transporte de sedimentos. Rio Doce. Modelagem computacional. HEC-RAS.

ABSTRACT

Knowing the behavior of the hydrosedimentological cycle is essential for a good management and support to water resources. Numerical models were developed in order to evaluate the geomorphological evolution of water bodies, and may help in future engineering projects for preventive and/or corrective decision making. The main of this research was to evaluate sediment transport in a small stretch of the Doce river, located in Colatina - ES, using the HEC-RAS software. Data were collected from bathymetry, river section, liquid and solid flows, temperature and granulometry, from December/2011 to February/2012. Three transport equations were chosen: Engelund and Hansen (1967); Ackers and White (1973), and Yang (1973). The model was calibrated and adjusted the Manning coefficient values in the sections. The coefficients of correlation, determination and mean squared error were applied to evaluate the best parameters adjustments. When comparing the observed and simulated elevations, it was possible to conclude that the Engelund and Hansen equation, with a correlation coefficient of 0.029 in the channel and 0.055 in the margins, resulted in a longitudinal profile of the bed most consistent with reality. The worst results were presented with the equation of Ackers and White (1973). Thus, the values of the adjusted model of sediment concentration, total solid discharge, and changes in bed erosion / sedimentation were extracted. With values of sediment concentration and flow rates, the values of suspended discharge and of bed material were estimated. The results showed total discharge values in sections ranging from 2.226 tons/ day to 27.401 tons/day. The discharge of bed material was between 32 tons/ day and 4.337 tons/day. In the bed river there was a greater tendency to sedimentation in the analyzed period. The model met the research objective, generating values with an interesting level of detail in the sections when evaluating their employability in support of the management of water resources. However, it is necessary to accomplish more studies to obtain a more complete survey of the region and use the model to verify the efficiency of the choice of the parameters in stretches with the same characteristics .

Keywords: Water resources. Sediment transport. Doce River. Computational modeling. HEC-RAS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de corpo livre usado para calcular a velocidade de queda.	35
Figura 2 – Representação do método de classificação de Thomas.	37
Figura 3 – Representação do método de classificação de Copeland.....	37
Figura 4 – Representação do método de classificação Active Layer.....	38
Figura 5 – Mapa da produção de sedimentos da bacia do rio Doce.	45
Figura 6 - Localização do trecho de estudo do rio Doce.	46
Figura 7 – Imagens do trecho do rio Doce obtidas nas campanhas: (a) 1ª campanha de dezembro (02/12/2011), (b) 2ª campanha de dezembro (16/12/2011), (c) e (d) 1ª campanha de fevereiro (10/02/2012).	47
Figura 8 – Vista superior ampliada do trecho com linhas longitudinais para batimetria.	48
Figura 9 – Aparelho ADCP RDI <i>RiverRay</i> em funcionamento.	49
Figura 10 – Localização da estação fluviométrica utilizada em relação ao trecho de estudo.	53
Figura 11 – Dados de vazões médias diárias coletadas pela estação de Colatina. ..	55
Figura 12 – Amostrador de material do leito Rock-Island.....	56
Figura 13 – Amostrador Helley-Smith.....	57
Figura 14 – Fluxograma da análise de transporte de sedimentos com HEC-RAS....	60
Figura 15 – Edição do arquivo geométrico.	62
Figura 16 – Arquivos geométricos gerado em HEC-RAS: (a) (02/12/2011), (b) (16/12/2011), (c) (10/02/2012), (d) (24/02/2012).	63
Figura 17 – Prova do arquivo de fluxo com arquivo geométrico.....	65
Figura 18 – Janela do HEC-RAS para edição de condições iniciais e de contorno do fluxo quasi-permanente.....	67
Figura 19 – Janela do HEC-RAS para edição de condições iniciais dos sedimentos.	74

Figura 20 – Classificação do tamanho das partículas de sedimento pelo HEC-RAS.	75
Figura 21 – Janela do HEC-RAS para edição de granulometria do leito.....	76
Figura 22 – Janela do HEC-RAS para edição de condições de contorno à montante do arquivo de sedimentos.	76
Figura 23 – Janela do HEC-RAS para análise do plano de sedimentos.	77
Figura 24 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.....	86
Figura 25 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.....	87
Figura 26 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.....	87
Figura 27 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.....	88
Figura 28 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.....	89
Figura 29 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.....	89
Figura 30 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.....	90
Figura 31 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.....	91
Figura 32 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.....	91
Figura 33 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.....	92
Figura 34 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.....	93
Figura 35 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.....	93
Figura 36 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.....	94
Figura 37 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.....	94
Figura 38 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.....	95
Figura 39 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.....	96
Figura 40 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.....	96
Figura 41 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.....	97
Figura 42 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.....	98
Figura 43 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.....	98
Figura 44 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.....	99

Figura 45 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado...	100
Figura 46 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado...	100
Figura 47 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado...	101
Figura 48 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado...	102
Figura 49 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado...	102
Figura 50 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado...	103
Figura 51 – Coeficiente de determinação das elevações das seções simuladas e observadas (16/12/2011) – Engelund e Hansen.	105
Figura 52 – Coeficiente de determinação das elevações das seções simuladas e observadas (10/02/2012) – Engelund e Hansen.	106
Figura 53 – Coeficiente de determinação das elevações das seções simuladas e observadas (24/02/2012) – Engelund e Hansen.	106
Figura 54 – Simulação das alterações no trecho da calha do rio Doce com HEC-RAS	108
Figura 55 – Vista superior do trecho indicando a elevação (m) no início da modelagem – (02/12/2011).....	109
Figura 56 – Vista superior do trecho indicando a elevação (m) ao final da modelagem – (24/02/2012).....	109
Figura 57 – Descarga total de sedimentos (ton/dia).....	111
Figura 58 – Estimativa da descarga sólida de material de leito do trecho do rio Doce (ton/dia).	113
Figura 59 – Balanço de erosão/sedimentação no trecho do rio Doce. Valores negativos indicam erosão, valores positivos indicam sedimentação.	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de parâmetros para aplicação de funções de transporte de sedimentos.....	31
Tabela 2 – Dados geométricos e hidráulicos da seção transversal medidos em campo nas campanhas realizadas por Almeida (2012).....	49
Tabela 3 – Valores do coeficiente de rugosidade de Manning utilizado por Coutinho (2015).....	51
Tabela 4 – Valores do coeficiente de rugosidade de Manning e declividade da linha d'água.....	52
Tabela 5 – Dados de vazões médias diárias obtidas no período entre Dezembro de 2011 a Fevereiro de 2012 da estação de Colatina.....	53
Tabela 6 – Dados de granulometria referente a dezembro de 2011.....	57
Tabela 7 – Dados de granulometria referente a fevereiro de 2012.....	58
Tabela 8 – Estimativa da descarga sólida total pelo método de Einstein Modificado (1955) em ton/dia.....	59
Tabela 9 – Características da seção do trecho do rio Doce.....	68
Tabela 10 – Características da seção do trecho do rio Doce.....	69
Tabela 11 – Total de interações para execução de testes do modelo.....	69
Tabela 12 – Datas dos dados de entrada utilizados para simulações.....	83
Tabela 13 – Resumo das simulações realizadas em HEC-RAS.....	84
Tabela 14 – Resumo dos coeficientes de correlação para todas simulações.....	104
Tabela 15 – Resumo das análises estatísticas das elevações observadas e simuladas com a equação de Engelund & Hansen.....	107
Tabela 16 – Valores mínimos, máximos e médios de descarga total de sedimentos no trecho do rio Doce.....	111
Tabela 17 – Valores mínimos, máximos e médios na seção de concentração de sedimentos (mg/L).....	112

Tabela 18 – Estimativa da descarga de sedimentos de material de leito no trecho do rio Doce.	113
Tabela 19 – Valores de erosão (negativos) e sedimentação (positivos) no trecho do rio Doce, em toneladas.	114
Tabela 20 – Comparação entre métodos de estimativa de transporte.	115
Tabela 21 – Comparação de resultados entre trabalhos anteriores e o presente estudo.	115

LISTA DE SIGLAS

ADCP	Perfilador Acústico de Correntes por efeito Doppler
ANA	Agência Nacional de Águas
BSTEM	Bank Stability and Toe Erosion Model
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
ESRI	Environmental Systems Research Institute
EQM	Erro quadrático médio
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center - River Analysis System
HEC-GeoRAS	Hydrologic Engineering Center – Geographic River Analysis System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MDE	Modelo Digital de Elevação
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
USACE	United States Army Corps of Engineers

LISTA DE SÍMBOLOS

A - Valor do número de Froude em movimento inicial;

A_m - Área molhada;

B - Largura do canal;

C - Coeficiente;

C_{ss} - Concentração de sedimentos em suspensão;

C_t - Concentração total de sedimentos;

D - Profundidade do canal;

d_m - Diâmetro médio das partículas;

DR - Densidade das partículas sólidas;

D35 - Diâmetro da partícula para o qual 35% do material do leito são mais finos;

D50 - Diâmetro da partícula para o qual 50% do material do leito são mais finos;

D90 - Diâmetro da partícula para o qual 90% do material do leito são mais finos;

F - Número de Froude;

F_f - Força devido a perdas externas por atrito;

F_{gr} - Parâmetro de mobilidade do sedimento;

G_{gr} - Descarga sólida;

Gs - Transporte total de sedimentos;

h - Profundidade hidráulica;

J - Perda de carga unitária;

n - Número de classes de tamanho de grão;

P - Perímetro molhado;

Pot - Potência;

Q - Vazão líquida;

Q_s - Carga de sedimentos transportados;

Q_{sb} - Descarga de sedimento em suspensão proveniente da bacia;

Q_{sf} - Descarga de sedimentos por arraste de fundo;

Q_{ss} - Descarga sólida em suspensão;

Q_{st} - Descarga de sedimentos total;

r - Coeficiente de correlação;

R - Raio Hidráulico;

R^2 - Coeficiente de determinação;

Re - Número de Reynolds;

s - Densidade específica do sedimento;

S - Declividade da linha d'água;

t - Tempo;

T - Temperatura da água;

T_c - Capacidade de transporte total;

u - Viscosidade cinemática;

u_* - Velocidade de cisalhamento dos grãos;

U - Velocidade do escoamento;

U^* - Velocidade crítica;

V - Velocidade média do escoamento;

ν - Viscosidade cinemática do fluido;

X - Distância;

W - Largura do canal;

Y_s - Peso específico sedimento;

γ - Peso específico da água;

τ_o - Tensão de cisalhamento no leito;

η - Coeficiente de Manning;

Ω - Energia total;

ω - Velocidade de queda de partículas;

λ_p - Porosidade da camada ativa do leito.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
2. OBJETIVOS.....	22
2.1 OBJETIVO GERAL	22
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1 O CICLO HIDROSSedIMENTOLÓGICO.....	23
3.2 TRANSPORTE FLUVIAL DE SEDIMENTOS	24
3.3 MODELAGEM EM TRECHOS DE RIOS.....	27
3.4 SOFTWARE HEC-RAS	28
3.4.1 Continuidade do Sedimento	29
3.4.2 Equações de transporte de sedimentos	30
3.4.3 Potencial de transporte de sedimentos	33
3.4.4 Velocidade de queda.....	34
3.4.5 Método de classificação	36
3.5 ESTUDOS COM HEC-RAS.....	38
4. METODOLOGIA	43
4.2 DADOS DE ENTRADA.....	47
4.2.1 Dados de topografia	48
4.2.2 Coeficiente de Manning e declividade da linha d'água.....	50
4.2.3 Dados de vazão	52
4.2.4 Dados de sedimento	55
4.3 MODELAGEM EM HEC-RAS.....	59
4.3.1 Arquivo Geométrico	61
4.3.2 Arquivo de fluxo	63
4.3.3 Arquivo de sedimento	67
4.3.4 Plano de Análise de Sedimentos.....	77

4.3.5 Calibração do modelo.....	77
4.3.7 Simulação do transporte de sedimentos	80
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	83
5.1 SIMULAÇÃO COM ENGELUND E HANSEN.....	85
5.1.1 Simulação 1.....	86
5.1.2 Simulação 2.....	88
5.1.3 Simulação 3.....	90
5.2 SIMULAÇÃO COM ACKERS E WHITE.....	92
5.2.1 Simulação 1.....	92
5.2.2 Simulação 2.....	94
5.2.3 Simulação 3.....	95
5.3 SIMULAÇÃO COM YANG	97
5.3.1 Simulação 1.....	97
5.3.2 Simulação 2.....	99
5.3.3 Simulação 3.....	101
5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	103
5.5 ANÁLISE DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	107
6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	118
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120

1. INTRODUÇÃO

Conhecer o comportamento do ciclo hidrossedimentológico é essencial para uma boa gestão e suporte aos recursos hídricos. O estudo do fluxo de sedimentos ainda permite realizar um diagnóstico de possíveis impactos ao longo do tempo, tornando-se um indicador ambiental (CRISPIM et al., 2015).

A dinâmica do escoamento nos canais fluviais advém da atuação da água sobre os sedimentos desde a bacia ao leito fluvial, ocasionando o transporte de sedimentos, a deposição e a escultura da topografia do leito, carregando água e detritos, que percorrem um caminho dos continentes para os oceanos. As redes hidrográficas se apresentam como as principais vias para o transporte de material de diferentes espécies de tamanhos e formas (CHRISTOFOLETTI, 1981).

Vale ressaltar que diversos são os fatores que levam ao desequilíbrio dos processos de erosão dos rios, entre eles a retirada da vegetação, o uso do solo e sua ocupação inadequada. Com isso, há um aumento da frequência de enchentes e custos com tratamento de água, prejuízos para navegação, redução energética e da vida útil dos reservatórios, entre outros (BRANCO, 1998; SCAPIN; PAIVA, 2005).

De acordo com uma análise conjunta das transformações da paisagem na Bacia Hidrográfica do Rio Doce, que abrange os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, foram avaliadas intensas modificações, tendo maior impacto junto ao canal principal e adjacências. O maior manancial de água doce do estado do Espírito Santo apresenta níveis de vazão reduzidos, o que poderia comprometer os solos junto à desembocadura, avanço da cunha salina e alterações na morfologia (COELHO, 2007).

Segundo o levantamento registrado pelo Plano Integrado de Recursos Hídricos - PIRH (2010), 58% de área da bacia do rio Doce está classificada em uma zona de suscetibilidade erosiva forte. O estudo indicou que grande parte dos sedimentos erodidos é depositada nas baixas vertentes e planícies de inundação, apontando que seriam necessários estudos detalhados para quantificar o transporte de material erodido pela erosão acelerada, e que se depositam nos principais canais de drenagem.

Destaca-se que em novembro de 2015 ocorreu um acidente que afetou a bacia do rio Doce, ocasionado pelo rompimento da barragem de rejeitos de mineração de Fundão, localizada em Mariana – MG. O desastre gerou não só um impacto local, mas se estendeu à região costeira do Espírito Santo (ESPINDOLA et al., 2016). Ante o processo de modificação da paisagem já instalada, pouco compreendida na calha, é preciso entender a dinâmica de escoamento e erosão/sedimentação, de modo a contribuir em futuros estudos.

Para aprimorar e tornar mais ágil a análise desses ambientes, modelos numéricos foram desenvolvidos a fim de avaliar a evolução geomorfológica de rios. Eles podem auxiliar em futuros projetos de engenharia, prevendo fenômenos para tomada de decisões preventivas e/ou corretivas (CONDE, 2007; MACHADO, 2002; DOLVITSCH, 2013; CHERO & CASTELLET, 2015).

Um dos softwares de livre acesso que vem sendo empregado em pesquisas para avaliar o transporte de sedimentos em trechos de rio é o HEC-RAS, desenvolvido pelo corpo de engenharia do exército americano. O potencial de transporte de sedimentos é calculado pela fração granulométrica e fornece uma lista de equações distintas. O modelo foi elaborado para simular tendências de erosão e/ou deposição em canais, que podem resultar da modificação da geometria, e ser empregado para avaliar a deposição em reservatórios, projetar condições para manter as profundidades de navegação, entre outros (USACE, 2016a).

Diante desse contexto, esta pesquisa propôs o estudo do fluxo de sedimentos em um trecho do rio Doce, utilizando modelagem computacional. A região escolhida está inserida na localidade de Itapina, município de Colatina – ES, onde já havia um levantamento de dados necessários para realizar a pesquisa, de acordo com os trabalhos realizados por Almeida (2012) e Brune (2014).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o transporte de sedimentos em um trecho de rio utilizando modelagem computacional.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar os parâmetros mais adequados para realizar modelagem de um trecho de rio segundo suas características geomorfológicas e hidráulicas;
- Analisar o transporte de sedimentos em função da geometria, granulometria, vazões líquidas e sólidas;
- Realizar o prognóstico da evolução da calha ao longo do tempo, avaliando condições de erosão e sedimentação;
- Comparar a eficácia do modelo perante os resultados obtidos em estudos anteriores realizados na região por Almeida (2012) e Brune (2014).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O CICLO HIDROSSEDIMENTOLÓGICO

Os processos responsáveis pelo deslocamento de partículas sólidas no ciclo hidrossedimentológico são a desagregação, a erosão, o transporte, a sedimentação, o depósito e a consolidação, que são definidos em sequência por Bordas e Semmelmann (1993):

- Desagregação: se refere ao desprendimento de partículas sólidas do meio à que pertencem, ocorrendo sob forma de reações químicas, flutuações de temperatura, ações mecânicas e outros fatores naturais que não envolvem diretamente o ciclo hidrológico;
- Erosão: processo de deslocamento das partículas sólidas de seu ponto de origem, das partículas sólidas da superfície do solo ou das paredes dos leitos dos córregos e rios, sob efeito do escoamento;
- Transporte: ocasionado pelo carregamento de material erodido pela água, que pode ocorrer de várias formas, sendo que as partículas mais pesadas deslocam-se adjacente ao fundo por rolamento, deslizamento ou por saltação, e compõem a descarga sólida de fundo ou arraste. Já as partículas mais leves constituem a descarga sólida em suspensão;
- Sedimentação: processo em que as partículas mais finas, transportadas em suspensão, tendem a restabelecer contato com o fundo do leito sob ação da gravidade. Nesta ação, verifica-se a resistência do meio fluido em que está envolto, que as impede de se deslocar para o fundo por resultado da turbulência;
- Depósito: entende-se pelo estacionamento total da partícula em suspensão recém decantada sobre o fundo, ou daquela transportada por arraste. Este fenômeno se difere da sedimentação, pois uma partícula recém-decantada pode continuar movimentando-se após entrar em contato com o fundo, de acordo com as forças hidrodinâmicas existentes ao fundo;
- Consolidação: é formada após depósito das partículas, sendo o acúmulo de partículas sobre o fundo e a compactação do depósito resultante sob efeito do

próprio peso dos sedimentos, da pressão hidrostática ou qualquer outro fenômeno que venha a aumentar a densidade dos depósitos.

Dentre os processos mencionados, a erosão e o depósito são os que mais se destacam pela maior relevância de suas ocorrências e pela redistribuição dos sedimentos dentro de uma bacia hidrográfica (BORDAS; SEMMELMANN, 1993).

3.2 TRANSPORTE FLUVIAL DE SEDIMENTOS

A intemperização das rochas originam os constituintes que serão transportados em solução química e que irão compor a carga dissolvida de água, que são os sedimentos fluviais. O transporte desses materiais pode ocorrer em forma de suspensão – representado pelas partículas mais finas; e transporte no leito – ocasionado pela gravidade, por meio de rolamento, saltação e arraste pelo fluxo. Não existe uma separação definida dos tipos de transporte, sendo apenas uma forma de representar as condições reais. Há ainda a falta de informações sobre os mecanismos de transporte de carga dissolvida comparada com a atenção dirigida aos processos de transporte em suspensão e carga do leito (TUCCI, 2007; CRISPIM, 2015).

O transporte de sedimentos nos cursos d'água ocorre por fatores hidrológicos, que são a quantidade e distribuição das precipitações, a estrutura geológica, condições topográficas e cobertura vegetal. Esses componentes interferem no meio de modo a proporcionar a formação de material originado do intemperismo na bacia hidrográfica e o seu carreamento até os rios, sendo o fluxo uma resposta aos processos de estado de equilíbrio atuantes no sistema fluvial (CHRISTOFOLETTI, 1981).

Em relação à carga do leito do rio, esta é composta por partículas de granulometria maior, como as areias e cascalhos, que são transportados através da saltação, deslizamento ou rolamento na superfície do leito, podendo se deslocar de modo intermitente. A velocidade se apresenta mais lenta com relação ao fluxo devido à densidade das partículas. As partículas de granulometria reduzida, como o silte e a argila, permanecem em suspensão pelo fluxo turbulento, constituindo a carga de sedimentos em suspensão (TUCCI, 2007).

Os tipos de transporte que ocorrem em um curso d'água são descritos por Carvalho (2008) como carga sólida de arrasto, carga sólida saltante e carga sólida em suspensão, que são definidos:

- Carga sólida de arrasto: são partículas de sedimento que rolam longitudinalmente no curso d'água, estando em contato com o leito;
- Carga sólida saltante: é composta por partículas que saltam ao longo do curso d'água por efeito da correnteza ou devido ao impacto de outras partículas;
- Carga sólida em suspensão: é composta por partículas que estão suportadas pelos componentes verticais da velocidade do fluxo turbulento, enquanto estão sendo transportadas pelos componentes horizontais destas velocidades, sendo pequenas suficientemente para permanecerem em suspensão.

O controle do transporte da carga em suspensão ocorre pelo volume de sedimentos que são fornecidos ao curso d'água, pois a carga em suspensão é carregada quase na mesma velocidade da água e, quando a turbulência atinge ao limite crítico, as partículas em suspensão se precipitam. A deposição da carga em suspensão pode ocorrer em trechos de águas muito calmas ou nos lagos. Já o controle de transporte dos sedimentos mais grosseiros que compõe o fundo advém da capacidade de transporte (TUCCI, 2007).

Segundo Paranhos et al. (2003), a capacidade de transporte é a capacidade máxima de sólido que um escoamento na superfície livre pode transportar, dividindo-se em capacidade em suspensão, que será alterada pela carga de sedimento transportado; e capacidade de arraste, que se modifica com a existência de deformações como rugas, dunas e outros que dissipam por atrito parcelas de energia do escoamento e deixa de ser utilizada para transporte de sedimentos. Nos casos em que a descarga sólida for maior que a capacidade de transporte, predomina-se o assoreamento do curso d'água. O contrário encontra-se nos casos de erosão, onde o material de fundo é removido e ocorre alteração da capacidade de transporte (TUCCI, 2007).

De acordo com Conde (2007), a capacidade de transporte de sedimentos depende de diversos fatores, entre os quais se destacam a vazão líquida, a declividade, as características dos sedimentos de fundo, e a forma da seção transversal.

Importante mencionar que o transporte de sedimentos nos cursos d'água é explicado pela relação entre a capacidade do escoamento de carregamento e a força que se faz necessária para deslocar as partículas sólidas. Dentre as partículas mais leves, como as argilas e siltes, é necessária uma quantidade menor de energia para serem carregadas, ao contrário das areias, que são mais pesadas. Os escoamentos turbulentos possuem alta capacidade de carregamento de sedimentos, mas à medida que a velocidade diminui, o transporte vai se tornando seletivo entre os sedimentos finos e grossos. Dessa forma, os processos de transporte de sedimentos dependem da granulometria do material particulado nas bacias hidrográficas (CHRISTOFOLETTI, 1981; LEOPOLD et al., 1964).

Com relação aos processos de erosão e sedimentação, destaca-se que o limiar da força crítica restringe a separação dessas duas fases. No primeiro caso, a fase acontece quando a capacidade de transporte da calha é maior que o volume de sedimentos transferidos pelas encostas, ocasionando expansão das calhas. No segundo exemplo, a fase acontece quando o fluxo de entrada de sedimentos é maior que a capacidade de transportá-los, o que acarreta na redução dos canais (LANE, 1955; BULL, 1979; FARIA, 1994; FARIA; MARQUES, 1998).

No tocante à concentração de sedimentos nos cursos d'água, quando ocorre um aumento por intensificação dos processos erosivos, pode haver um comprometimento dos recursos hídricos, além de afetar barragens, captações e estações de tratamento de água. No caso de barragens, ocorre também a redução do aporte de sedimentos à jusante, alterando os mecanismos de transporte e consequentemente a geometria da calha (BRANDT, 2000).

Desse modo, avaliar o comportamento de sedimentos transportados é fundamental para estudos de bacias hidrográficas e consequente uso de seus recursos hídricos em projetos de obras hidráulicas devido ao fato de que o sedimento, tanto em suspensão, quanto no fundo do leito, pode provocar problemas estruturais e ambientais (CARVALHO, 2008).

3.3 MODELAGEM EM TRECHOS DE RIOS

Existem modelos numéricos de escoamento de domínio público que simulam o transporte de água e do sedimento. A maioria deles para simulações de calha de rios são unidimensionais (1D) ou bidimensionais (2D), modelando processos hidrodinâmicos de fluxo e morfodinâmicos de canais. Os modelos unidimensionais requerem menor informação na fase de calibração e testes (CONDE, 2007; DUAN; LI, 2003).

Para Tucci (1998), os modelos visam à representação de um sistema de uma forma que seja acessível, a fim de facilitar sua compreensão.

Softwares para simulação em calhas foram os primeiros a serem utilizados, sendo empregados pela necessidade de definição da carga de sedimentos que atravessa uma seção, dados que são importantes para operações de barragens (DOLVITSCH, 2013).

Os modelos de transporte de sedimentos se baseiam em modelos hidrodinâmicos para calcular o transporte de materiais, obtendo assim a variação do escoamento e concentração de escalares, como salinidade, poluentes, sedimentos, entre outros. A geometria é representada por seções transversais, sendo o fluxo perpendicular às seções, e a velocidade adotada é a velocidade média do escoamento. Todavia, esses modelos não são apropriados para simulações em rios sinuosos (ESTIGONI, 2016).

Dentre os programas existentes para análise de transporte de sedimentos em trechos de rios, destacam-se o SED2D-WES, Mike 21-ST, e HEC-RAS.

O programa SED2D – WES da US Army Engineer Research And Development Center, foi elaborado para a simulação de transporte bidimensional de sedimentos em trechos de rios, que permite estudos de erosão e deposição dos sedimentos arenosos ou argilosos. Todavia, não permite a simulação simultânea de rios com essas duas composições, apenas um diâmetro para cada cálculo. As equações presentes são somente Ackers e White (1973), e Krone (1962). Outra limitação do modelo é o fato de não permitir avaliar descarga de fundo e carga em suspensão de sedimentos (LETTER et al., 2011).

A DHI Software desenvolveu uma expansão do MIKE 21, que simula somente transporte de sedimentos arenosos em rios. Este software foi elaborado para a simulação das mudanças na taxa de transporte e capacidade de transporte de sedimentos arenosos que podem ocorrer nos rios devido às alterações no seu regime hidráulico (DHI SOFTWARE, 2007). As equações existentes são Engelund e Hansen (1967); Engelund e Fredsoe (1976), Meyer-Peter e Müller (1948) e Van Rijn (1984). Pode simular rios com sedimentos de granulometria de areias até cascalhos, podendo ser inseridos dados de gradação do material do leito, variando entre 0,19mm à 30mm.

Outro exemplo é o programa HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System), desenvolvido pelo Corpo de Engenharia do Exército dos EUA, que em sua versão a partir de 4.1(2007), permite a simulação de transporte unidimensional de sedimentos em trechos de rios, considerando erosão e deposição destes sedimentos ao longo do tempo, o que admite estimar as consequências de modificações do leito ou margens em um canal. Permite a simulação simultânea de sedimentos com diferentes granulometrias, podendo fornecer dados de curva granulométrica, e calcular a erosão no leito do rio, devido ao transporte de sedimento. A versão mais atual conta com equações de transporte total de sedimentos – Ackers e White (1973), Engelund e Hansen (1967), Copeland's Laursen (1968,1989), Toffaleti (1968), MPM-Toffaleti e Yang (1973); uma para transporte de fundo – Meyer, Peter e Müller (MPM) (1948); e outra para transporte em suspensão – Wilcock e Crowe (2001) (USACE, 2016a).

3.4 SOFTWARE HEC-RAS

Simular o transporte de sedimentos é algo que pode ser complexo, visto que a teoria foi elaborada de forma empírica e é altamente sensível a uma gama de variáveis físicas e parâmetros que podem ser difíceis de estimar. Entretanto, um modelo bem calibrado pode prever tendências regionais e de longo prazo, auxiliando em planejamentos, alternativas de projetos e tomada de decisões (USACE, 2016b).

O programa HEC-RAS oferece duas abordagens hidrodinâmicas para simulação de transporte de sedimentos a partir da versão 5.0, que são: fluxo quasi-permanente e não permanente. O modelo de fluxo quasi-permanente simplifica a hidrodinâmica, e

é representado por um hidrograma contínuo com uma série de perfis discretos de fluxo estável. O fluxo permanente é mantido para cada registro de fluxo, calculando a duração do registro do fluxo de transporte. Os perfis de fluxo permanente são mais estáveis que a solução matricial das equações instáveis de Saint-Venant (USACE, 2016a).

3.4.1 Continuidade do Sedimento

As rotinas de cálculo de sedimentos no programa HEC-RAS resolvem a equação de continuidade de sedimentos, também conhecida como equação de Exner:

$$(1 - \lambda_p)B \frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial Q_s}{\partial x} \quad (1)$$

Onde:

- B: Largura do canal;
- T: Tempo;
- X: Distância;
- Q_s : Carga de sedimentos transportados;
- λ_p : Porosidade da camada ativa do leito;
- η : Elevação do canal;

De acordo com a equação de Exner, a diferença entre o sedimento que entra e sai de um volume de controle deve ser armazenada ou removida do armazenamento. O armazenamento de sedimentos ocorre no leito em uma mistura multifásica com água, exigindo porosidade para realizar a mudança de massa em mudança de volume. Essa equação explana a diferença entre o influxo e as cargas de saída em mudança de leito, como erosão e/ou deposição de sedimentos (USACE, 2016b).

Ao calcular uma capacidade de transporte de sedimento para o volume de controle associada a cada seção transversal, faz uma comparação ao fornecimento de sedimento entrando no volume de controle. Quando a capacidade é maior do que a oferta, o programa satisfaz o déficit através da erosão dos sedimentos no leito. Já o

inverso, se o suprimento excede a capacidade, o HEC-RAS deposita o excedente de sedimentos (USACE, 2016b).

O lado direito da equação de continuidade, compara o fluxo de sedimentos que entra, com o fluxo que sai do volume de controle. O influxo de sedimento é representado pelo sedimento que entra no volume de controle à montante e/ou de qualquer fonte local, como as entradas laterais. O fluxo que sai é representado por uma medida da massa de sedimentos que a água pode mover (USACE, 2016b).

Para isso, o HEC-RAS divide o material de sedimento em múltiplas classes de grãos, sendo subdivididas em faixas de material transportável – entre 0,002 mm a 2048 mm – totalizando 20 classes. É então utilizada a média geométrica da classe de grãos que possa ser representativa no trecho. (USACE, 2016b).

3.4.2 Equações de transporte de sedimentos

As equações existentes para transporte de sedimentos a partir da versão 5.0 são:

- Meyer, Peter e Müller (1948) – (MPM);
- Engelund e Hansen (1967);
- Copeland's de Laursen (1968,1989);
- Toffaleti (1968);
- MPM-Toffaleti;
- Ackers e White (1973);
- Yang (1973,1984);
- Wilcock e Crowe (2001).

As equações disponíveis em HEC-RAS para cálculo de transporte de sedimentos foram desenvolvidas e aplicadas sob diferentes condições físicas, onde se esperam resultados distintos. Nesse sentido, é necessário escolher a que mais se adequa a um determinado fluxo de acordo com os parâmetros descritos na tabela 1.

Tabela 1 – Valores de parâmetros para aplicação de funções de transporte de sedimentos.

Função	d_m	s	V	D	S	W	T
Ackers e White	DN	1.0- 2.7	0.021-0,82	0.003-0,426	0.00006-0.037	0.070-1.219	7.77-31.66
Engelund e Hansen	0.19-0.93	DN	0.19-1.93	0.057-0,405	0.000055-0.019	DN	7.22-33.88
Copeland's Laursen	0.011-29	DN	0.21-2,86	0.009-1.097	0.00025-0.025	0.076-2.011	7.77-28.33
Meyer-Petter e Müller	DN	1.25-4.0	0,36-2,86	0.009-1,188	0.0004-0.02	0.152-2.011	DN
Tofaletti	0.45-0.91	DN	0.21-1.92	0.021-0,335(R)	0.00014-0.019	0.243-2.438	4.44-33.88
Yang (areia)	DN	DN	0.24-1.95	0.012-15,240	0.000043-0.028	0.134-533,400	0-34.44
Yang (cascalho)	DN	DN	0,42-1,55	0.024-0.219	0.0012-0.029	13.411-533,400	0-34.44

Fonte: USACE (2016b).

Onde:

- Dm: Diâmetro médio das partículas (mm);
- S: Densidade específica do sedimento (adimensional);
- V: Velocidade média do canal (m/s);
- D: Profundidade do canal (m);
- S: Declividade da linha d'água (m/m);
- W: Largura do canal (m);
- T: Temperatura da água (°C);
- (R): Raio Hidráulico (m);

- DN: Dados não disponíveis.

A equação de Meyer-Peter e Müller (MPM) (1948) foi uma das primeiras equações desenvolvidas e ainda é uma das mais utilizadas, onde realiza uma relação simples de excesso de cisalhamento. É restrita a calcular a descarga de sedimentos de leito e foi desenvolvida a partir de experimentos de areia e cascalho sob condições de leito plano. As experiências de MPM examinaram principalmente cascalho uniforme, fazendo com que a função de transporte fosse mais aplicável a esse tipo de sistema, subestimando transporte de materiais mais finos.

A função de Engelund e Hansen (1967) calcula carga total de sedimentos, onde fornece resultados adequados para rios arenosos e formado por dunas, sendo extensivamente testada em campo para obtenção de dados consistentes. Destaca-se que esta equação tem sido empregada amplamente fora dos intervalos de parâmetro, todavia, tem gerado bons resultados (USACE, 2016a).

O método de Laursen (1968) é um indicador de carga total de sedimentos, derivado de uma combinação de análise qualitativa, experimentos originais e dados suplementares. O transporte de sedimentos é definido principalmente com base nas características hidráulicas da velocidade média do canal, profundidade de fluxo, gradiente de energia e das características de gradação e velocidade de queda do sedimento. Posteriormente, Copeland (1989) generalizou a equação para o transporte de cascalho, tornando aplicável a leitos graduados.

O método Toffaleti (1968) é uma função de carga total de Einstein modificada que divide a distribuição da carga suspensa em zonas verticais. Quatro zonas são usadas para definir a distribuição de sedimentos: zona superior, zona intermediária, zona inferior e zona do leito, onde são calculadas de forma independente para se chegar ao transporte total de sedimentos. A função descreve a relação entre sedimentos, hidráulica e temperatura da água com um conjunto de regressões. O USACE aplicou a função com sucesso a grandes sistemas, como os rios Mississippi, Arkansas, Sacramento e Atchafalaya, ambos nos Estados Unidos, entretanto não houve um bom desempenho para partículas de tamanho de cascalho, e devido a isso a versão HEC-RAS 5.0 incluiu uma função combinada Toffaleti-MPM para atenuar essa limitação.

A equação de Ackers e White (1973) é uma função de carga total, desenvolvida a partir de dados de canal para gradações relativamente uniformes, que variam de areia a cascalhos finos. Os coeficientes foram ajustados à equação com base em experimentos que incluíram uma gama de configurações de leito incluindo ondulações, dunas e condições de leito plano.

O método de Yang (1973) é uma equação de transporte de carga total que foi desenvolvida por dados obtidos em experimentos de campo sob uma ampla gama de condições encontradas em canais aluviais. Essa função tende a ser muito sensível à velocidade da corrente e à velocidade de queda do que a maioria. Yang (1984) expandiu a aplicabilidade de sua função para incluir sedimentos do tamanho de cascalho.

A função de Wilcock e Crowe (2001) é utilizada para estimar sedimentos em suspensão baseado na teoria de que o transporte é dependente do material em contato direto com o fluxo. Foi desenvolvida com base nas gradações de superfície de canais e rios. Portanto, as propriedades do leito devem refletir as propriedades da superfície. Para a função deve ser escolhido o método de classificação/mistura de leito Active Layer.

3.4.3 Potencial de transporte de sedimentos

Para calcular o potencial de transporte de sedimentos, são necessários os seguintes parâmetros:

- H: Altura da lâmina d'água (m);
- U: Velocidade do escoamento (m/s);
- J: Perda de carga unitária (m/m);
- B: Largura (m);
- D: Diâmetro das partículas;
- D: Densidade da água (kg/m³);
- DR: Densidade das partículas sólidas (kg/m³);
- Ff: Força devido a perdas externas por atrito;

- T: Temperatura (°C).

O programa HEC-RAS calcula o potencial de transporte para cada classe de grãos com uma das várias equações de transporte de sedimentos disponíveis. O potencial de transporte de sedimentos é a massa transportável de uma determinada classe de grãos em resposta a parâmetros hidráulicos do canal. As equações de transporte são empíricas e traduzem a hidrodinâmica para o transporte, onde o programa aplica as equações a cada classe de grãos de forma independente, calculando assim um potencial de transporte. Uma vez que o HEC-RAS calcula o potencial de transporte, a capacidade de transporte para cada classe de grãos é o potencial de transporte multiplicado pela porcentagem dessa classe de grãos no leito. Portanto, a capacidade de transporte total é:

$$T_c = \sum_{j=1}^n \beta_j \beta_j \quad (2)$$

Onde:

- T_c : Capacidade de transporte total;
- n: número de classes de tamanho de grão;
- β_j : É a porcentagem da camada ativa composta de material na classe de tamanho de grão “j” e T_j é o potencial de transporte calculado para o material na classe de grãos “j”.

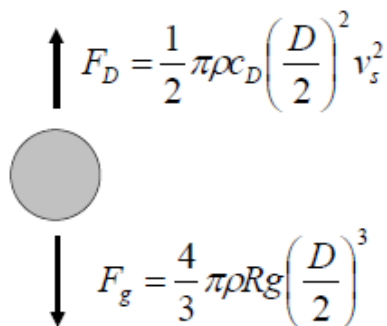
Dessa forma, ocorre então o equilíbrio da equação de continuidade para cada classe de grãos separadamente. Em seguida, o modelo compara a capacidade calculada para fornecer para cada classe de grãos e calcula um excedente ou déficit de sedimentos por classe de grãos.

3.4.4 Velocidade de queda

A maioria das teorias de velocidade de queda deriva do balanço da força gravitacional e da força de arraste de uma partícula em queda através de uma

coluna d'água (USACE, 2016a). O diagrama de corpo livre está representado na figura 1:

Figura 1 – Diagrama de corpo livre usado para calcular a velocidade de queda.



$$F_D = \frac{1}{2} \pi \rho C_D \left(\frac{D}{2} \right)^2 v_s^2$$

$$F_g = \frac{4}{3} \pi \rho R g \left(\frac{D}{2} \right)^3$$

Fonte: USACE (2016b).

A escolha da equação de velocidade de queda se baseia nos seguintes métodos encontrados:

- Rubey;
- Toffaleti;
- Van Rijn;
- Report 12.

Rubey (1933) desenvolveu uma relação analítica entre o fluido, as propriedades do sedimento e a velocidade de queda. A equação deve ser aplicada para silte, areias e cascalho, com densidade específica de 2,65.

Toffaleti (1968) apresenta uma tabela de velocidades de queda com um fator de forma de 0,9, com densidade específica de 2,65. Diferentes velocidades de queda estão disponíveis para valores de temperatura e tamanhos de partículas classificados como areias muito finas e médias.

Van Rijn (1933) aproxima as curvas de velocidade de queda com um fator forma de 0,7 e uma temperatura de água em torno de 20°C.

Report 12 é uma solução iterativa que utiliza as mesmas curvas que Van Rijn, mas

com a velocidade de queda calculada para computar um novo número de Reynolds. A velocidade de queda também depende do fator de forma da partícula. Todas as equações assumem um fator de forma ou constroem um em sua curva experimental. Dessa forma, o HEC-RAS apresenta o fator de forma como uma variável de entrada do usuário, mas somente o requer se a opção Report 12 for selecionada (USACE, 2016b).

3.4.5 Método de classificação

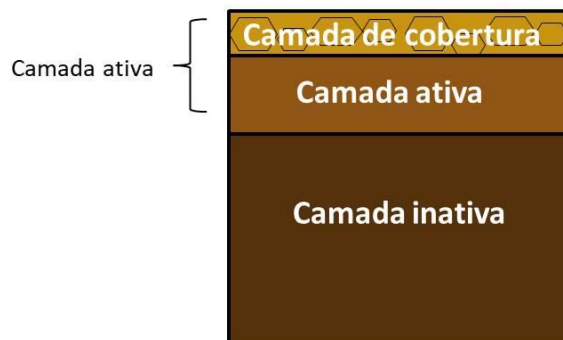
O método de classificação é utilizado para calcular a espessura do leito móvel. Ele mantém um registro da graduação usado para calcular capacidades de transporte de sedimentos e também simula processos que regulam o processo de erosão.

A graduação do leito é coberta por uma camada de material grosso, chamada de camada de blindagem. Essa camada pode ser formada por uma blindagem estática ou pela diferença de transporte de materiais finos. A maioria dos fluxos transportam partículas finas, enquanto o material grosso é estático e protege o material mais profundo do transporte (ELSAYED, 2013).

Dessa forma, no programa existem três opções de algoritmos que calculam essa camada.

No método de Thomas (Exner 5) é utilizado um modelo de leito de três camadas que forma uma camada independente, que é a camada ativa, que limita a erosão de camadas mais profundas. O cálculo da capacidade de transporte é baseado na graduação de toda a camada ativa. Quando a graduação do leito é variada, a utilização do Exner 5 é essencial, pois simula a classificação real.

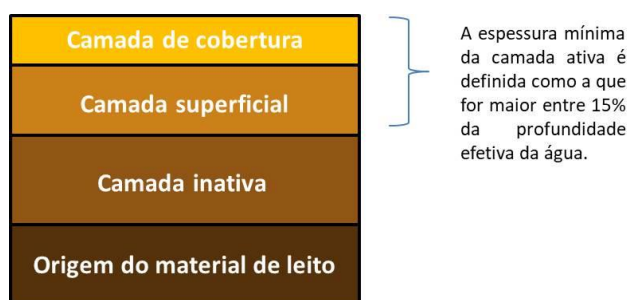
Figura 2 – Representação do método de classificação de Thomas.



Fonte: Adaptado de USACE, 2016b.

O método de Copeland (Exner 7) foi projetado para rios de leito de areia, formando uma camada de forma mais lenta e consequentemente calculando mais erosão. Copeland ajustou o método de Thomas, para torná-lo mais aplicável aos leitos de areia. Ele subdivide a camada ativa em camadas de cobertura e superficial, permitindo que a gradação da primeira regule a erosão a partir da última. O cálculo é em função dos diâmetros de partículas equivalentes das classes de grãos mais grossos, permitindo mais erosão e tornando adequado para grandes rios.

Figura 3 – Representação do método de classificação de Copeland.



A espessura mínima da camada ativa é definida como a que for maior entre 15% da profundidade efetiva da água.

Fonte: Adaptado de USACE, 2016b.

No método Active Layer a espessura da camada é definida como padrão para o d_{90} , sendo editável. É válido para cascalho e utilizando equação de transporte de Wilcock e Crowe. É possível especificar gradações separadas manualmente.

Figura 4 – Representação do método de classificação Active Layer.



Fonte: Adaptado de USACE, 2016b.

3.5 ESTUDOS COM HEC-RAS

Neste subitem foram reunidos alguns trabalhos realizados utilizando HEC-RAS para simulação de transporte de sedimentos em trechos de rio. Há ainda escassez de pesquisas produzidas com o referente tema, o que corrobora com a importância de se desenvolver mais estudos.

Conde (2007) realizou a modelagem com HEC-RAS na versão 4.0, em um rio aluvionar de Portugal, utilizando o regime de fluxo permanente. Foi feito um estudo da evolução do leito ao longo do tempo, comparando com levantamentos batimétricos e granulométricos. Com relação à condição de fronteira de montante, a vazão sólida que entrava no sistema se mostrou pouco expressiva na geração de resultados devido à existência da barragem à montante do sistema. A análise da distribuição granulométrica revelou que uma distribuição menor ocorre maior erosão, visto que as partículas mais finas são arrastadas mais facilmente. Já com relação às fórmulas de transporte, as fórmulas de Meyer-Peter e Müller conduziram a maiores valores de erosão, comparadas com Ackers e White.

Chacón & Pazmiño (2010) avaliaram o programa HEC-RAS 4.1 para análise de fluxo não permanente e transporte de sedimentos em um rio no Equador. Escolheram esse tipo de fluxo devido às condições do rio que se apresentavam com curvas sinuosas, encostas íngremes, velocidade altas, além das frequentes mudanças de regime subcrítico para supercrítico. Foi elaborada uma metodologia que poderia ser aplicada em outros rios com características semelhantes ao local de estudo, além de avaliar condições de erosão ou deposição. Foram realizadas calibrações do modelo e análise de sensibilidade para diferentes condições, como variações de parâmetros

geométricos e dinâmicos na simulação numérica do fluxo; variações do hidrograma para fluxo não permanente; variações de simulação numérica de sedimentos; e análise de sensibilidade sobre restrições de tipo numérico. Essas análises tiveram como objetivo determinar os parâmetros ou condições para as quais o modelo é mais sensível. Com relação aos hidrogramas, houve variação dos parâmetros correspondentes às vazões e área molhada das seções, e os demais, como velocidade e níveis de energia permaneceram constantes nos 3 exemplos testados. Os modelos de transporte de sedimentos apresentaram grandes variações de resultados, concluindo que apenas duas equações foram adequadas ao estudo na região: Meyer-Petters e Müller e Ackers e White.

Skipworth (2010) indicou a importância de se considerar os impactos do desenvolvimento às margens de rios e aplicar estudos de modelagem hidrológica e hidráulica para compreender os processos de transporte de sedimentos, bem como alterações na geometria. O modelo hidráulico utilizado foi o HEC-RAS, que identificou algumas alterações significativas no comportamento de fluxo e inundação como resultado da urbanização. A modelagem da erosão consistiu em uma análise de fluxo estável para eventos de inundação de 2 e 100 anos, além de comparações dos resultados com relação aos níveis de água, extensões de inundação, tensões de cisalhamento, larguras de inundação e risco de inundação, o que mostrou um aumento significativo na geometria do canal.

Garcia (2012) elaborou um trabalho para análise e avaliação do transporte de sedimentos a uma região na Espanha utilizando regime de fluxo quasi-permanente, concluindo que o emprego do HEC-RAS é eficaz sempre quando se consideram suas limitações a respeito do seu caráter unidimensional. Com relação à análise de transporte de sedimentos, foram aplicadas sete fórmulas diferentes para simulação da erosão, transporte e sedimentação em função da geometria, granulometria e hidrogramas. Foi constatado que a equação Engelund e Hansen, e Toffaleti, não são aptas para modelagem da região; e Ackers e White, Yang e Wilcock tenderam a subestimar os valores. Com Copeland's Laursen o efeito foi o contrário, sobrestimando. A única equação que se manteve no entorno de valores médios foi a Meyer-Peter e Müller.

Aguirre (2013) desenvolveu um trabalho implementando HEC-RAS para o sistema formado pelo rio Jubones, rio São Francisco e as obras concebidas para o projeto hidroelétrico Minas-San Francisco, no Equador. Foram simulados cenários e identificados os principais processos de fluxo, uma análise das relações mais representativas para o cálculo do transporte de sedimentos e posterior sedimentação nos rios. Foi realizada uma análise dos aspectos relacionados ao desempenho hidráulico das obras que tem a ver com os processos de transporte de sedimentos, erosão e sedimentação, como também análises de desempenho do modelo matemático. As equações que representaram melhor a região foram Meyer-Peter e Müller, Ackers e White, concluindo que o programa respondeu adequadamente às variações de hidrogramas, entre outros. Ainda conclui que uma vez implementados os parâmetros iniciais do modelo, se recomenda realizar simulações com fluxo permanente para identificar erros na estimação dos parâmetros preliminares.

Song, Schamlz, Foher (2014), integraram os softwares SWAT e HEC-RAS, criando um modelo para análise dos processos de transporte e acúmulo de sedimentos em 10 seções de um rio da bacia Upper Stör, na Alemanha, simulando processos sedimentares entre os períodos de 2001 a 2010. Foram combinadas as capacidades de variação de geometria do HEC-RAS e a vantagem de geração de dados do SWAT para configurar o modelo da bacia em estudo. Os resultados mostraram que os processos de deposição dominaram a bacia Upper Stör na escala de tempo em décadas com uma profundidade de sedimentação média de 2,85 cm. Aproximadamente 1% do sedimento foi retido pela planície de inundação, e os outros 99% foram depositados no leito do rio. O sedimento na calha se mostrou mais espesso e com maior variabilidade do que o sedimento da planície aluvial. Constataram que a altitude da seção do rio afeta o tamanho do grão de sedimento na calha, enquanto o tamanho do sedimento da planície de inundação depende do poder do córrego da planície aluvial.

Pender, Patidar e Haynes (2015) apresentaram uma metodologia utilizando HEC-RAS para avaliar inundações futuras como resultado de mudanças na morfologia de rio para estudar a influência de 50 anos de mudança morfológica. O teste de sensibilidade das fórmulas mais adequadas mostrou que a equação de Ackers e

White apresentou menores estimativas de transporte de sedimentos. Além disso, este modelo foi usado no transporte de sedimentos em estudos anteriores, sendo considerado o mais apropriado para região.

Nistoran et al. (2017) estudaram as mudanças morfológicas no Baixo rio Danúbio, entre 2008 e 2011, utilizando HEC-RAS. O modelo hidráulico não permanente foi calibrado para os valores médios diários de descarga observados em 2008, e depois validado para os dados hidrológicos do ano chuvoso em 2010. Os coeficientes de Manning foram ajustados no intervalo de 0,028 para o canal principal, e 0,07 para as margens. As condições de fronteira do fluxo à montante foram em função da vazão, descarga de sedimento e temperatura, e à jusante, a curva de classificação. As condições iniciais do arquivo de sedimentos foram as curvas de classificação e os limites máximos erodíveis. Para funções de transporte de sedimentos, foram escolhidas Engelund e Hansen, Tofaletti e Copeland's Laursen. Destaca-se que nesse estudo, a carga total de sedimentos foi considerada igual à carga suspensa devido à falta de dados. Nesse processo concluíram que as mudanças morfológicas verticais na seção transversal apresentadas no programa indicaram comportamento morfológico próximo do observado por trabalho realizado anteriormente.

Bilal et al. (2017) estudaram 32 km do rio Tenryu no Japão utilizando HEC-RAS, tendo como principal objetivo analisar a capacidade preditiva de dados disponíveis e ferramentas existentes quando seções transversais do canal, distribuição do tamanho dos grãos do rio e vazão, são obtidos através de premissas e fontes de qualidade variável. O foco do estudo foi simular mudanças batimétricas ocorridas no rio Tenryu devido à construção da barragem de Sakuma. As simulações foram utilizadas para prever também possíveis mudanças futuras no perfil do leito do rio e a estimativa de qual período Sakuma não seria capaz de exercer mais sua função. Os dados observados disponíveis para 1956 a 2004 incluíram perfil do leito do rio com intervalos de cinco anos, carga de sedimentos, e registros de alguns eventos de pico de fluxo junto com respectivos dados de sedimentos. O histórico de fluxo foi usado como condição de contorno na estação do rio à montante. Para a condição de limite à jusante, estágios associados à curva de classificação de descarga foram desenvolvidos. A condição de limite para o arquivo de sedimento para a montante era inicialmente a "carga de equilíbrio" e "curva de classificação" de sedimento à

jusante. Foi utilizado o coeficiente de determinação para comparar a modelagem com os dados observados, o que indicou bons resultados. O leito do rio é composto de areia e, aplicando a equação de transporte de Toffaletti, garantiram-se os melhores resultados em comparação com outras opções disponíveis. Contudo, a fórmula Englund e Hansen também apresentou resultados razoáveis para alguns testes. O modelo foi simulado até 2040 para prever alterações batimétricas, desse modo, assumiu-se que o fluxo foi periódico desde 1957 até 2004.

4. METODOLOGIA

Neste tópico é descrita a metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho, onde é apresentada a área de estudo do trecho do rio Doce e os dados de entrada necessários para modelagem computacional. São discutidos os passos de cada etapa da modelagem, bem como a calibração e validação do modelo. Os dados de entrada para as simulações foram obtidos em trabalhos anteriores realizados por Almeida (2012) e Brune (2014). A metodologia se baseou nos passos do Manual do Usuário (USACE, 2016a) para análise de transporte de sedimentos em HEC-RAS.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica do rio Doce se localiza no Sudeste do Brasil, abrangendo os Estados de Minas Gerais (86%) e Espírito Santo (14%), com área de 83.465 km² e extensão de 853 km. Possui três Unidades Regionais: Alto, Médio e Baixo rio Doce. A Unidade Regional do Baixo rio Doce apresenta morfologia com variação de oeste para leste de colinas, tabuleiros e planície costeira, com altitudes variadas decrescendo em direção ao canal principal e à planície costeira (COELHO, 2007).

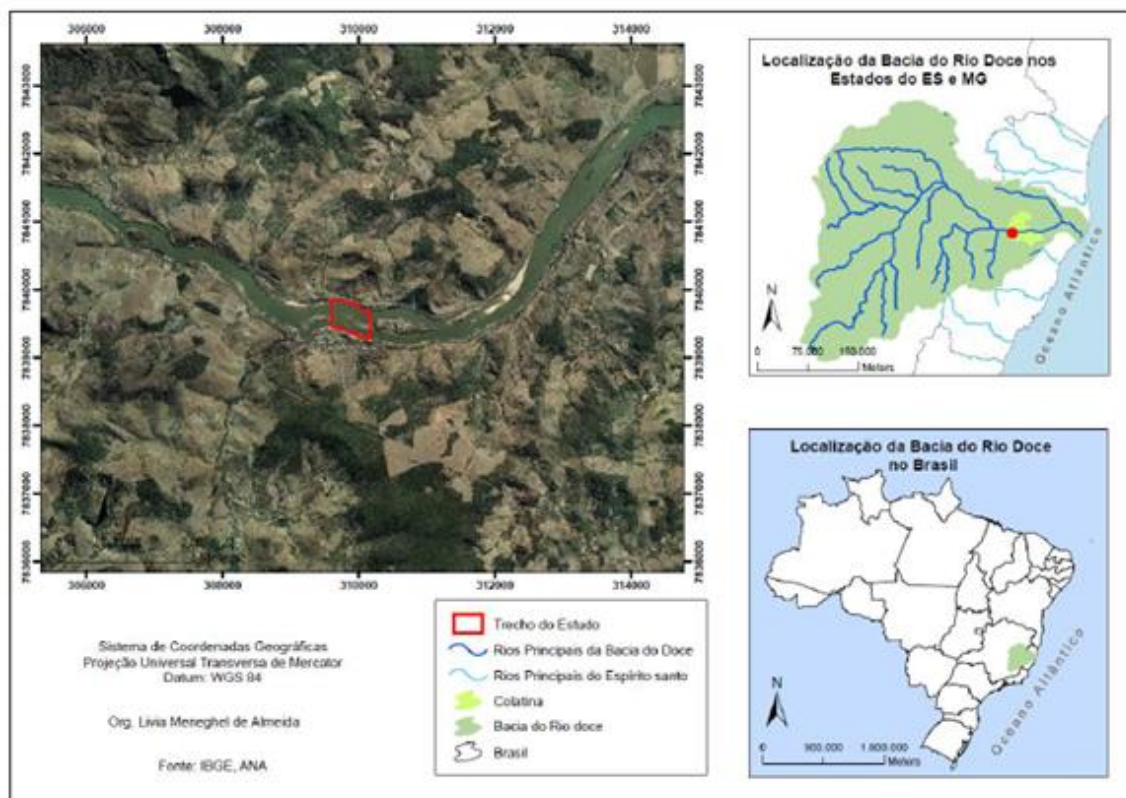
Há o predomínio de duas classes de solos na bacia, sendo a primeira o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico e/ou álicos. A segunda classe é o Argissolo Vermelho-Amarelo, ocorrendo desde o relevo plano e suave ondulado até o forte ondulado e montanhoso. Outros solos que ocorrem em menor proporção são o Latossolo Ácrico, Cambissolo, Neossolo Litólico e Neossolo Regolítico (EMBRAPA, 1999).

O clima é do tipo tropical úmido, apresentando ainda uma não uniformidade climática. No mês de novembro se inicia a estação chuvosa, que se prolonga até maio, com uma distribuição heterogênea no interior da bacia com totais anuais maiores que 700 mm. As regiões de maiores altitudes, bem como as litorâneas, apresentam as maiores totais anuais, variando entre 900 mm e 1500 mm. Os menores totais anuais se encontram nos fundos de vale e regiões deprimidas, como exemplo o município de Colatina, com 700 a 1000 mm (COELHO, 2007).

O regime fluvial se caracteriza como perene, com picos de cheias nos meses de dezembro, janeiro e março; e as vazantes extremas nos meses de agosto e setembro. A bacia hidrográfica apresenta temperaturas médias anuais elevadas durante a maior parte do ano, obtendo temperaturas médias anuais superiores a 18°C e, no litoral, superior a 24°. As características do clima, relevo e solo acarretam maior velocidade de decomposição sofrida pelos minerais constituintes do material de origem; maior atividade no processo de pedogênese dos solos tropicais e processos naturais de erosões (COELHO, 2007).

Devido à grande supressão da cobertura vegetal, os remanescentes florestais da bacia encontram-se restritos às áreas com maior declividade. Acrescenta-se a isso as áreas de pastagens que estão bem degradadas, tornando maior a erosão do solo e carreando um grande volume de sedimentos até os cursos d'água. A Figura 5 a seguir apresenta a produção de sedimentos calculada em toneladas/km²/ano na bacia, considerada muito baixa na região do trecho estudado (< 5 toneladas/km²/ano), com alguns locais de baixa produção (5 a 70 toneladas/km²/ano) (ANA, 2016).

Figura 6 - Localização do trecho de estudo do rio Doce.



Fonte: Almeida (2012).

No trabalho de Almeida (2012), foram realizadas três campanhas de campo, sendo um levantamento em agosto de 2011 – período seco, dois levantamentos em dezembro de 2011, e dois levantamentos em fevereiro de 2012, ambos em período chuvoso. Para este trabalho foram utilizados dados de batimetria das duas últimas campanhas de campo, sendo o intervalo entre os dois levantamentos realizados em dezembro de 2011 (02 e 16/12/11) e fevereiro de 2012 (10 e 24/02/12) de aproximadamente 15 dias.

A figura 7 apresenta a situação do trecho do rio Doce durante as campanhas. Os dados de sedimentos foram coletados apenas em um levantamento em cada campanha, sendo em dezembro (02/12/2011) e fevereiro (10/02/2012).

Figura 7 – Imagens do trecho do rio Doce obtidas nas campanhas: (a) 1ª campanha de dezembro (02/12/2011), (b) 2ª campanha de dezembro (16/12/2011), (c) e (d) 1ª campanha de fevereiro (10/02/2012).



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Almeida (2012).

4.2 DADOS DE ENTRADA

Para realizar a modelagem do transporte de sedimentos, foram necessários os seguintes dados:

- Levantamento batimétrico;
- Vazões líquidas médias diárias;
- Vazões sólidas totais dos sedimentos;
- Temperatura;

- Granulometria do material de leito.

4.2.1 Dados de topografia

O levantamento batimétrico do fundo do rio foi obtido em trabalho anterior realizado por Almeida (2012). Para isso, foi utilizado um ecobatímetro *Raytheon DE719D-MK2*, sendo sincronizado com um receptor GPS *Trimble Pro-XR*, com pós-processamento para correção. Também foi empregado um receptor GPS *Garmin 12* acoplado a um computador portátil para navegação.

Nessa etapa foram feitas varreduras com linhas longitudinais à calha do rio Doce utilizando um espaçamento de 20 m entre cada uma delas. O ecobatímetro emitiu valores de profundidade que foram registrados diante de seu posicionamento pelo GPS. Com isso, foram obtidos pontos de profundidades com suas devidas referências geográficas. Para coleta de dados, foram definidos 4 pontos uniformes na seção transversal, no início das linhas de navegação.

A Figura 8 apresenta a vista superior do trecho estudado, indicando as linhas longitudinais para obtenção da batimetria do leito.

Figura 8 – Vista superior do trecho com linhas longitudinais para levantamento batimétrico.



Fonte: Almeida (2012).

Foi necessário ainda utilizar mapas em formato raster, gerados anteriormente por Almeida (2012) a partir dos dados de batimetria, que foram trabalhados em ArcGIS 10.1 para criação de arquivo geométrico e utilização na modelagem em HEC-RAS, que será discutido nos próximos tópicos.

Dados das características da seção, como largura, área e temperatura da água, foram fornecidos por um ADCP - Perfilador Acústico de Correntes por efeito Doppler (Figura 9), que foram processados no programa WinRiver II (ALMEIDA, 2012).

Figura 9 – Aparelho ADCP RDI *RiverRay* em funcionamento.



Fonte: Almeida (2012).

A tabela 2 apresenta os dados geométricos e hidráulicos da seção transversal que foram medidos em campo no trecho do rio Doce.

Tabela 2 – Dados geométricos e hidráulicos da seção transversal medidos em campo nas campanhas realizadas por Almeida (2012).

(continuação)

Parâmetro	Dezembro (02/12/2011)	Fevereiro (10/02/2012)
Largura da superfície do rio - B (m)	420,0	400,0
Perímetro molhado - P (m)	432,34	407,82
Raio Hidráulico - Rh (m)	5,99	3,84
Profundidade hidráulica - h (m)	6,17	3,91

Tabela 3 – Dados geométricos e hidráulicos da seção transversal medidos em campo nas campanhas realizadas por Almeida (2012).

Parâmetro	(conclusão)	
	Dezembro (02/12/2011)	Fevereiro (10/02/2012)
Área molhada - A_m (m ²)	2591,53	1564,90
Velocidade média da superfície - U (m/s)	0,96	0,76
Vazão - Q (m ³ /s)	2494,53	1180,00
Declividade da linha d'água - S (m/m)	0,000257	0,000286
Temperatura - T° (°C)	25,0	29,2
Viscosidade cinemática - ν (m ² /s)	0,00000093	0,00000084
Coeficiente de Manning - η	0,055	0,055
D35 (mm)	0,312	0,294
D50 (mm)	0,364	0,342
D90 (mm)	1,239	0,489
Peso específico sedimento - γ_s (kgf/m ³)	2650	2650
Peso específico da água - γ (kgf/m ³)	1000	1000
Número de Reynolds (Re)	6155320	3476311
Número de Froude (F)	0,12	0,12
Energia total - Ω (W/m)	6421,0	3378,4
Energia específica - ω (W/m ²)	15,29	8,45
Tensão de cisalhamento - τ_0 (N/m ²)	15,43	10,99
Velocidade crítica - U^* (m/s)	0,12	0,10
Potência -Pot (N/m.s)	14,74	8,36

Fonte: Adaptado de Almeida (2012).

4.2.2 Coeficiente de Manning e declividade da linha d'água

Nesta etapa, foram selecionados diferentes coeficientes de Manning a serem configurados nos arquivos geométricos em HEC-RAS para calibração do trecho. Os valores de declividade da linha d'água foram utilizados como condição de contorno do fluxo, à jusante.

Almeida (2012) utilizou um valor de 0,055, com declividade da linha d'água de $S = 0,000257$ em dezembro (02/12/2011). Brune (2014) calculou esses valores com base na granulometria obtida do leito e encontrou dados de coeficiente de Manning de 0,0126, e declividade da linha d'água de 0,00013 para a mesma data. Coutinho

(2015) calibrou o modelo hidráulico em HEC-RAS para uma região do rio Doce à jusante do presente trecho em estudo, com base em dados obtidos pela CPRM em 2014, em uma região muito próxima à jusante do trecho desta pesquisa.

A Tabela 3 indica os valores que encontrou serem mais adequados no momento da calibração e validação do modelo. Para este trabalho, foram escolhidos também como calibração os valores de coeficiente de Manning de 0,029 para calha principal, e 0,055 para margens direita e esquerda, encontrando-se uma declividade da linha d'água igual a 0.00007 pela seguinte equação de Manning:

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

Onde:

- S: Declividade da linha d'água (m/m);
- Q: Vazão (m³/s);
- n: Coeficiente de rugosidade de Manning (adimensional);
- A: Área da seção transversal (m²);
- Rh: Raio hidráulico da seção (m).

Segundo Julien (1995), um leito de rio com configuração de dunas, como é o caso do rio Doce, possui características de coeficientes variando entre 0,020 a 0,040. Fagundes et al. (2017) utilizou coeficiente de Manning de 0,030 para o rio Doce, valor próximo ao utilizado por Coutinho (2015).

Tabela 4 – Valores do coeficiente de rugosidade de Manning utilizado por Coutinho (2015).
(continuação)

Seção	Margem esquerda	Calha principal	Ilhas	Margem direita
1500	0,055	0,029	-	0,055
1400	0,055	0,029	-	0,055
1300	0,060	0,028	-	0,055
1200	0,060	0,028	0,055	0,060
1100	0,055	0,028	-	0,060
1000	0,055	0,028	0,060	0,060

Tabela 5 – Valores do coeficiente de rugosidade de Manning utilizado por Coutinho (2015).
(conclusão)

Seção	Margem esquerda	Calha principal	Ilhas	Margem direita
900	0,055	0,028	-	0,060
800	0,055	0,028	-	0,060
700	0,060	0,028	0,060	0,060
600	0,060	0,028	0,060	0,060
500	0,060	0,028	0,060	0,060
400	0,060	0,028	-	0,060
300	0,060	0,028	0,060	0,060
200	0,060	0,028	-	0,060
100	0,060	0,033	-	0,060

Fonte: Adaptado de Coutinho (2015).

A tabela 4 apresenta um resumo dos valores utilizados de coeficiente de Manning e declividade da linha d'água para calibração deste trabalho, conforme revisão bibliográfica.

Tabela 6 – Valores do coeficiente de rugosidade de Manning e declividade da linha d'água.

Autores	Coeficiente de rugosidade de Manning – Calha principal	Coeficiente de rugosidade de Manning – Margens	Declividade da linha d'água
Almeida (2012)	0,055	0,055	0,00025
Brune (2014)	0,0126	0,0126	0,00013
Coutinho (2015)	0,029	0,055	0,00007

Fonte: Almeida (2012), Brune (2014), Coutinho (2015).

4.2.3 Dados de vazão

Para dados de vazão, foram utilizadas vazões médias diárias da estação fluviométrica de Nº 56992400 da Agência Nacional de Águas (ANA), localizada em Colatina (Figura 10), à montante do trecho (Tabela 5).

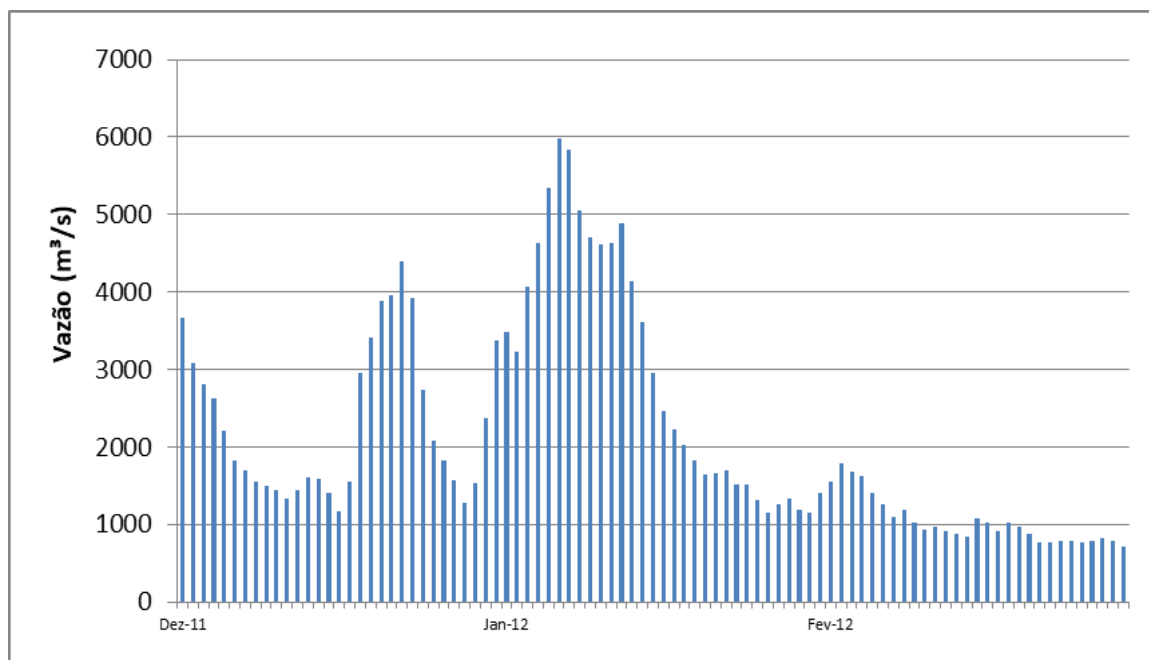
Tabela 8 – Dados de vazões médias diárias (m³/s) obtidas no período entre Dezembro de 2011 a Fevereiro de 2012 da estação de Colatina.

Dias	(conclusão)		
	Dezembro 2011	Janeiro 2012	Fevereiro 2012
19	3419.27	1820	969.5
20	3890.21	1639	886.53
21	3957	1654	762.34
22	4389	1701	771.48
23	3923	1510	793
24	2732	1522	783
25	2081	1323	775
26	1826	1150	781
27	1579	1266	817.32
28	1286.18	1333	781
29	1541	1184	719
30	2375	1153	-
31	3378	1408	-

Fonte: ANA (2016).

A princípio, foi preciso avaliar os valores de vazão para os meses simulados a fim de compreender sua influência nos resultados do fluxo de sedimentos. A figura 11 mostra as vazões médias diárias da estação de Colatina – ES entre os períodos de dezembro de 2011 a fevereiro de 2012, dados que foram utilizados como entrada para a modelagem em HEC-RAS. Como o regime de precipitações na bacia é sazonal, a região irá apresentar épocas de vazões muito elevadas, com alta quantidade de sólidos em suspensão, alternando com épocas de vazões muito baixas. O período chuvoso ocorre em outubro/novembro a março/abril, e o período seco em março/abril a setembro/outubro (FAGUNDES et al., 2017). Dessa forma, foi analisado o período chuvoso, onde ocorreram algumas variações durante o mês de dezembro, com um aumento da vazão em janeiro, e consequente redução em fevereiro.

Figura 11 – Dados de vazões médias diárias coletadas pela estação de Colatina.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.4 Dados de sedimento

Os dados de sedimentos, como granulometria e descarga sólida total, foram obtidos nos trabalhos de Almeida (2012) e Brune (2014).

O material de leito foi coletado por um amostrador *Rock-Island* (Figura 12) em pontos distribuídos ao longo da seção transversal do trecho do rio Doce. Esse amostrador realiza penetração horizontal de caçamba de dragagem coletando uma camada superior de aproximadamente 5 cm de material de leito.

Figura 12 – Amostrador de material do leito *Rock-Island*.



Fonte: Almeida (2012).

Para medição de descarga de sedimentos de fundo, foi utilizado um amostrador *Helley-Smith* (Figura 13), que permaneceu 20 minutos no leito, conforme testes na seção, para garantir sua eficiência. Após o içamento do equipamento, o material coletado foi colocado em sacos plásticos e devidamente etiquetado com informações do ponto de coleta, data, hora e profundidade, sendo levados para laboratório de análise da UFES.

Figura 13 – Amostrador *Helley-Smith*.

Fonte: Almeida (2012).

Para obtenção da distribuição granulométrica do material de leito foi utilizado o método de peneiramento a seco, onde realiza-se a agitação da série de peneiras com malhas padronizadas. A porção de material retido na peneira foi pesada, e a porcentagem de cada diâmetro de malha de peneira foi obtida pela divisão do total da amostra.

As tabelas 6 e 7 apresentam os valores utilizados para geração do arquivo de sedimentos em HEC-RAS que também será discutido mais adiante.

Tabela 9 – Dados de granulometria referente a dezembro de 2011.

(continuação)

Abertura (mm) (peneira)		Média da Seção		
		Retido	Passante	Passante %
		100.86		
9.5	9,5 mm	0.00	100.86	100.00
6.35	6,35mm	0.00	100.86	100.00

Tabela 10 – Dados de granulometria referente a dezembro de 2011.

(conclusão)

Abertura (mm) (peneira)		Média da Seção		
		Retido	Passante	Passante %
4	4mm	0.00	100.86	100.00
2	2mm	4.74	96.12	95.30
1	1mm	7.39	88.73	87.98
0.5	0,5mm	8.34	80.39	79.71
0.25	0,25mm	66.44	13.95	13.83
0.177	0,177mm	10.87	3.08	3.06
0.125	0,125mm	2.50	0.59	0.58
0.062	0,062mm	0.53	0.06	0.06

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 11 – Dados de granulometria referente a fevereiro de 2012.

Abertura (mm) (peneira)		Média da Seção		
		Retido	Passante	Passante %
		100.74		
9.5	9,5 mm	0.00	100.74	100.00
6.35	6,35mm	0.00	100.74	100.00
4	4mm	0.00	100.74	100.00
2	2mm	0.22	100.52	99.78
1	1mm	1.46	99.06	98.33
0.5	0,5mm	5.91	93.15	92.47
0.25	0,25mm	76.02	17.13	17.00
0.177	0,177mm	12.37	4.76	4.72
0.125	0,125mm	3.95	0.81	0.80
0.062	0,062mm	0.75	0.06	0.06

Fonte: Elaborado pela autora.

A tabela 8 apresenta os valores de descarga total de sedimentos que foi utilizado como dado para condição de contorno do arquivo de sedimentos para simulação do modelo.

Tabela 12 – Estimativa da descarga sólida total pelo método de Einstein Modificado (1955) em ton/dia.

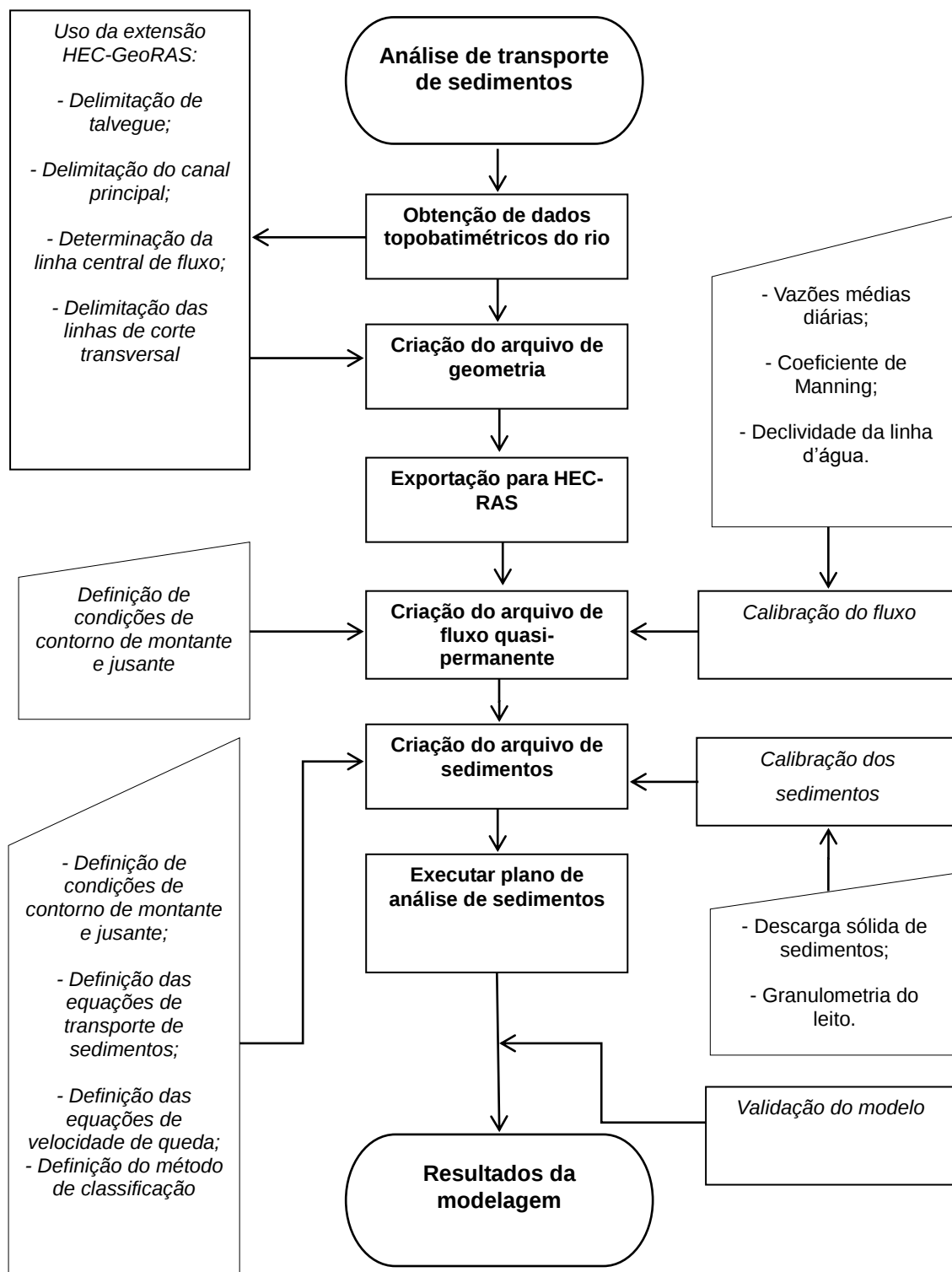
Data de coleta	Qss medida	Método de Einstein Modificado (1955)
02/12/2011	23.529,13	24.892,37
10/02/2012	4.267,06	6.574,75

Fonte: Adaptado de Brune (2014).

4.3 MODELAGEM EM HEC-RAS

Neste tópico serão discutidos os procedimentos que foram realizados para simular o transporte de sedimentos em HEC-RAS. Foi elaborado um fluxograma para exemplificar o passo a passo, como apresentado na figura 14.

Figura 14 – Fluxograma da análise de transporte de sedimentos com HEC-RAS.



Fonte: Elaborado pela autora.

Uma vez que todas as informações necessárias foram obtidas, foi preciso integrar, armazenar e editar os dados geograficamente referenciados. Para obter os resultados de transporte de sedimentos em HEC-RAS, o programa utilizou da ferramenta de plano de análise de sedimentos, que requereu os seguintes dados de entrada:

- Arquivo geométrico;
- Arquivo de fluxo;
- Arquivo de sedimento.

Cada arquivo acima foi obtido em etapas, que são descritas em sequencia.

4.3.1 Arquivo Geométrico

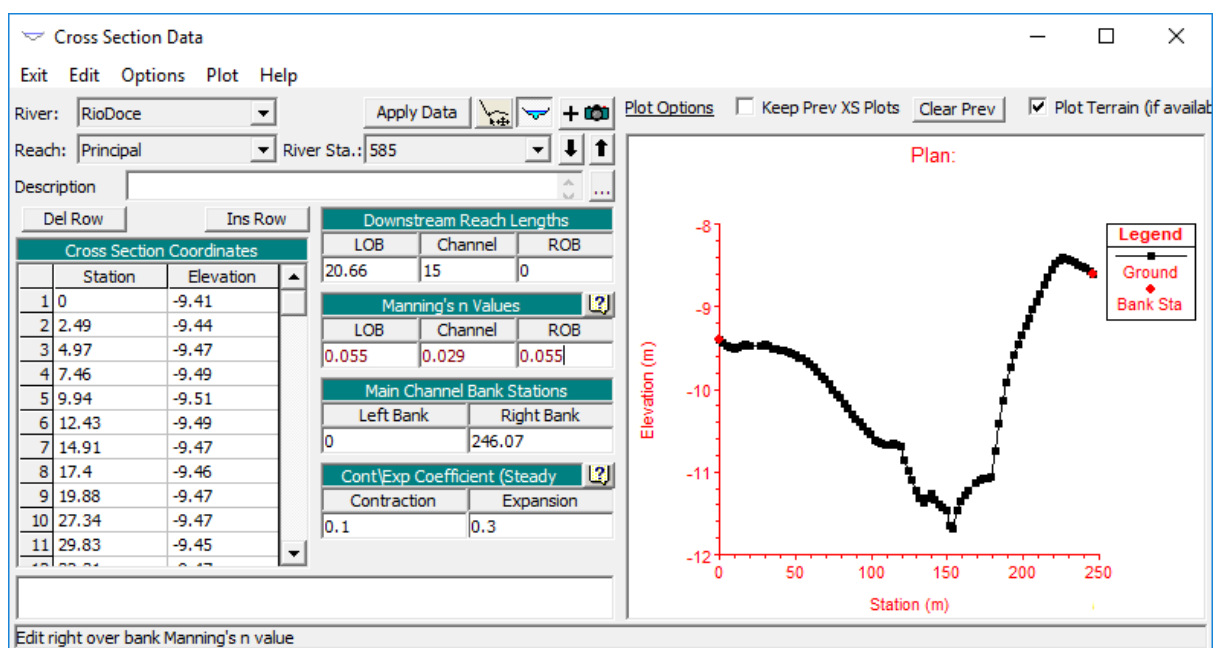
Utilizando a extensão HEC-GeoRAS, que foi trabalhada no programa ArcMap na versão 10.1, foi preciso seguir algumas etapas para confecção de um arquivo geométrico para exportação em formato compatível com HEC-RAS.

A partir de arquivos de batimetria obtidos do trabalho de Almeida (2012), foram criados layers de informações, delimitação de talvegue, delimitação do rio principal, trajetórias de fluxo, cortes transversais e definição dos coeficientes de Manning para cada seção transversal criada. Nesta etapa foram definidas as características referentes ao contorno e estruturas do rio.

Após a configuração espacial da calha, o arquivo de geometria foi gerado para dar início à modelagem de transporte de sedimentos em HEC-RAS. Foram elaborados 4 arquivos geométricos para os períodos de dezembro (02/12/2011 e 16/12/2011) e fevereiro (10/02/2012 e 24/02/2012).

Foram realizados ajustes de variáveis hidráulicas no arquivo de geometria, que são coeficiente de Manning, expansão e contração. Para o rio Doce, o coeficiente de expansão é 0,3 e contração de 0,1 (Figura 15) (USACE, 2016a).

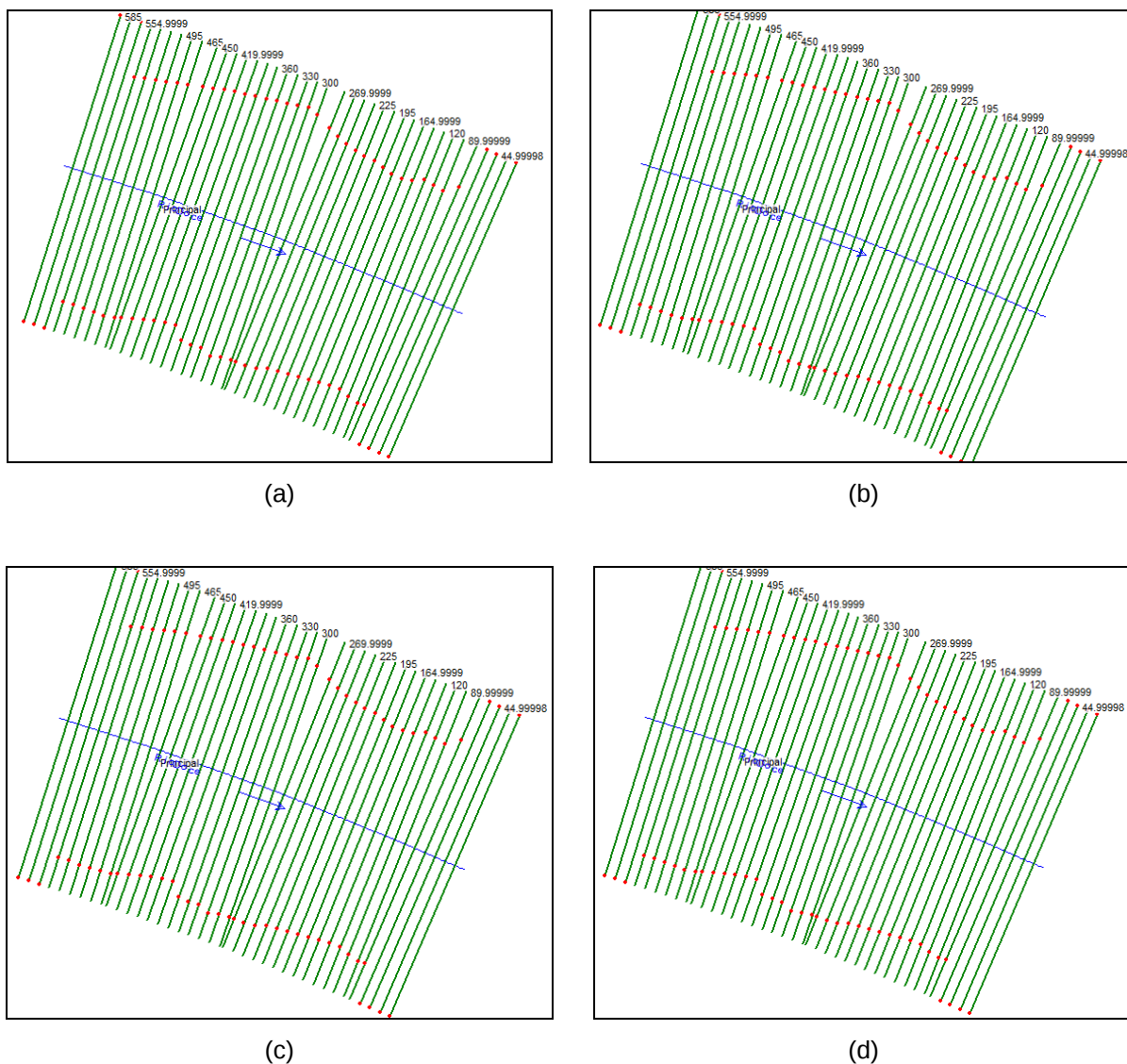
Figura 15 – Edição do arquivo geométrico.



Fonte: Elaborado pela autora.

A figura 16 representa os arquivos geométricos importados em HEC-RAS elaborados para as respectivas datas mencionadas em HEC-GeoRAS, indicado pelo canal principal e seções criadas. O traçado das seções transversais foi gerado a partir da ferramenta *Construct XS Cut Lines*, onde foi possível gerar um espaçamento de 15 m a cada seção.

Figura 16 – Arquivos geométricos gerado em HEC-RAS: (a) (02/12/2011), (b) (16/12/2011), (c) (10/02/2012), (d) (24/02/2012).



Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.2 Arquivo de fluxo

É essencial calibrar o modelo de modo a minimizar os efeitos resultantes da modelagem, tentando aproximá-lo ao máximo da realidade observada. A calibração compreende em uma série de execuções do programa, solucionando possíveis erros, tendo em conta os resultados obtidos em cada uma das execuções (CHACÓN, 2010; USACE, 2016a).

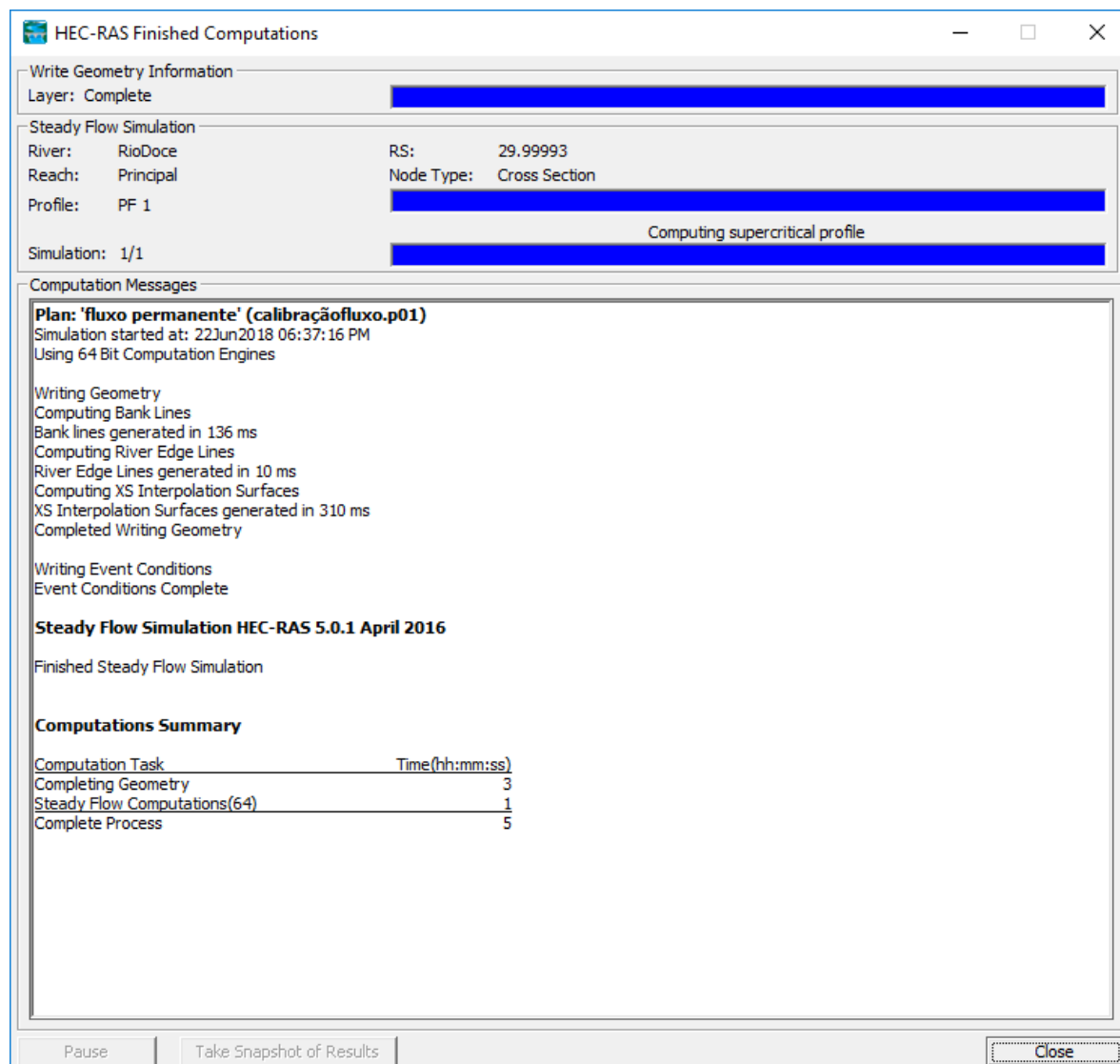
A prova de calibração do fluxo ocorre para o tipo de fluxo permanente, definindo as

condições de contorno e inserindo valores de vazões médias diárias para as seções. No modelo existem as opções de *Known WS*, quando se conhece a superfície da água; *Critical Depth*, que é profundidade crítica calculada pelo programa; *Normal Depth*, que é a profundidade normal, onde é inserido o valor da declividade da linha de energia ou linha d'água; e *Rating Curve*, onde são inseridos valores de vazões de cada seção transversal.

Foi criado um arquivo de fluxo permanente para testar a calibração. Nele, foram inseridas as vazões médias para testar os meses de dezembro a fevereiro, e selecionadas como condição de contorno a opção *Normal Depth*, onde foi inserida a declividade da linha d'água para os respectivos meses.

Um bom resultado se demonstra por valores que não alteram o comportamento do fluxo, por vezes dentro do esperado para as condições inseridas, sem geração de picos que possam suspeitar de um erro de representação. A figura 17 indica o resumo da simulação do fluxo permanente que foi gerado sem nenhum tipo de erro, testando todas as geometrias criadas com as respectivas vazões médias referentes ao mês.

Figura 17 – Prova do arquivo de fluxo com arquivo geométrico.



Fonte: Elaborado pela autora.

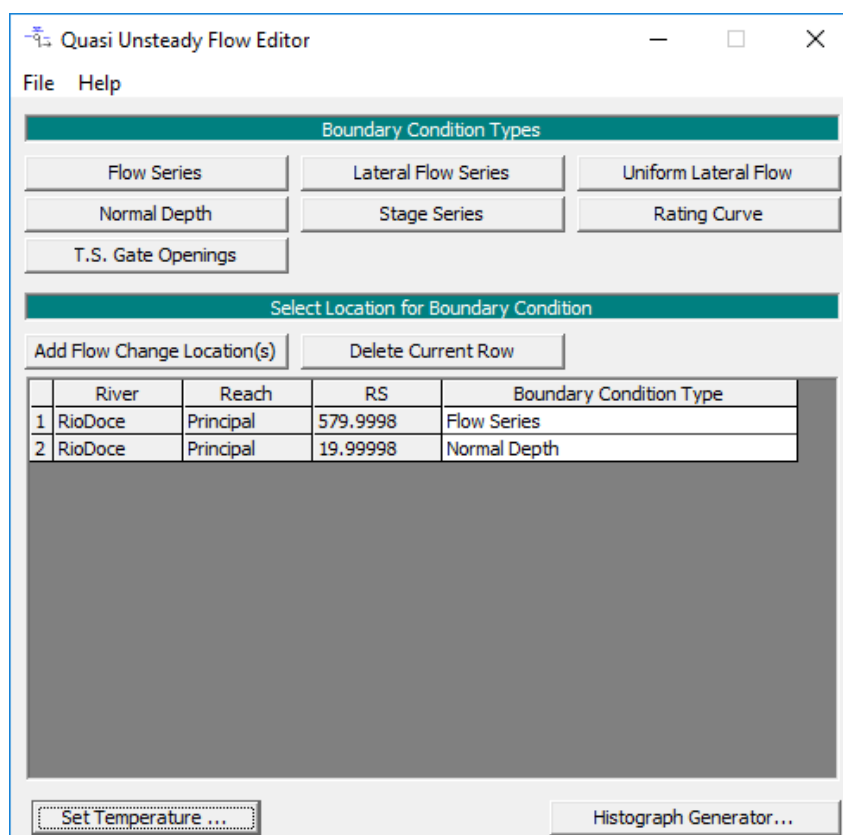
O cálculo de transporte de sedimentos está fundamentado no fluxo quasi-permanente, o qual é a aproximação de um hidrograma em séries de fluxo permanente com suas respectivas durações (USACE, 2016a).

O HEC-RAS inclui várias condições de contorno para o tipo de fluxo quasi-permanente, mas apenas um tipo de limite à montante, definido pela ferramenta *Flow Series*. O programa inclui três opções para definir condições de contorno à jusante: *Stage Time Series*, *Rating Curve* ou *Normal Depth*. Os limites internos opcionais incluem: *Lateral Flow Series*, *Uniform Lateral Flow Series*, e *Time Series Gate Operations*.

Na opção *Flow Series*, insere-se os valores de vazões médias diárias, associados a uma duração de fluxo e incremento de cálculo. Já nas opções à jusante, *Stage Time Series* é utilizado quando os dados do estágio estiverem disponíveis ou projetados para o período de simulação, definindo o limite à jusante, o que não foi o caso desta pesquisa. Para *Rating Curve*, na ausência de dados de séries temporais, uma curva de classificação pode definir uma relação entre estágio e fluxo, computando estádios de limite em resposta à série de fluxo de simulação. O HEC-RAS interpõe um estágio de contorno da curva de classificação para cada passo de tempo com base no fluxo. Por último, *Normal Depth* solicita um único parâmetro: a inclinação de fricção. A inclinação de fricção é a inclinação da linha de grau de energia e pode ser estimada previamente ao medir a inclinação do leito (USACE, 2010a).

Em sequencia, foi criado o arquivo de fluxo quasi-permanente, estabelecidas as condições de contorno à montante e à jusante, que foram *Flow Series* e *Normal Depth*, sendo as opções mais adequadas à modelagem do trecho, visto os dados disponíveis de vazão e declividade de linha d'água (Figura 18). Também foi inserida a temperatura para o mês de dezembro a fevereiro.

Figura 18 – Janela do HEC-RAS para edição de condições iniciais e de contorno do fluxo quasi-permanente.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.3 Arquivo de sedimento

O editor de dados de sedimentos é dividido em três partes: *Initial Conditions and Transport Parameters*, *Sediment Boundary Conditions*, e *Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM)*, sendo apenas os dois primeiros obrigatórios para modelo de transporte de sedimentos (USACE, 2010a). Nesta etapa encontram-se funções de transporte, método de classificação, método de velocidade de queda, granulometria e condições de contorno.

Para condições iniciais, foram especificadas as profundidades e delimitações do rio, onde as opções disponíveis no programa são:

- Profundidade máxima: Calcula a cota mínima de erosão como a do fundo do canal menos a profundidade máxima.

- Profundidade mínima: Permite definir uma cota na qual o rio não pode ser erodido, para definir o leito do rio.
- *Station Left / Station Right*: São os pontos que fazem referência à delimitação do rio principal e planície de inundação.

Foram escolhidas a profundidade mínima como zero, e estações esquerda e direita como as próprias margens do trecho.

4.3.3.1 Equações de transporte de sedimentos

O programa HEC-RAS apresenta uma relação de equações de transporte de sedimentos a ser aplicada de acordo com as características físicas do rio ou canal.

De acordo com a revisão bibliográfica, a equação que mais se adequa ao trecho estudado é Yang (1973,1984). As demais não se aplicam principalmente pela questão da profundidade (D) do rio (Tabela 9).

Entretanto, das equações disponíveis, Almeida (2012) e Brune (2014) aplicaram também as equações de Ackers e White (1973), Engelund e Hansen (1967). Por motivos de comparação, foram reproduzidas as três equações para verificar qual se adequaria melhor ao modelo.

Tabela 13 – Características da seção do trecho do rio Doce.

	d_m	s	V	D	S	W	T
Dezembro	0.314	2.65	0.955	6.17	0.000257	420	25.0
Fevereiro	0.295	2.65	0.761	3.912	0.000286	457.75	29.2

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 14 – Equações adequadas ao trecho do rio Doce.

Equações	d	d_m	s	V	D	S	W	T
Ackers & White				X	X		X	
Engelund & Hansen					X			
Laursen					X			
Meyer-Peter & Müller					X	X	X	
Toffaleti					X			
Yang								

Legenda: X – Dados do rio Doce que não foram compatíveis com as equações de transporte de sedimentos.

Fonte: Elaborado pela autora.

Sendo assim, para o presente trabalho, foram testadas as equações Engelund e Hansen (1967), Ackers e White (1973) e Yang (1973) na calibração. A tabela 11 abaixo apresenta um resumo do número de interações necessárias para execução dos testes de calibração e escolha do melhor parâmetro para o trecho do rio Doce para análise de transporte de sedimentos.

Tabela 15 – Total de interações para execução de testes do modelo.

Equações de transporte de sedimentos	Valores de Manning			Interações
Engelund & Hansen	0,055	0,0126	0,029	3
Ackers & White	0,055	0,0126	0,029	3
Yang	0,055	0,0126	0,029	3
Total				9

Fonte: Elaborado pela autora.

A equação geral de transporte para a função Engelund e Hansen (1967) é representada por:

$$g_s = 0.05\gamma_s V^2 \sqrt{\frac{d_{s0}}{g(\frac{\gamma_s}{\gamma}-1)}} \left[\frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)d_{s0}} \right]^{3/2} \quad (4)$$

Onde:

- g_s : Transporte total de sedimentos (ppm);
- γ : Peso específico do fluido (kgf/m³);
- γ_s : Peso específico das partículas sólidas (kgf/m³)
- V : Velocidade média do canal (m/s);
- τ_o : Tensão de cisalhamento no leito (N/m²);
- d_{50} : Diâmetro médio das partículas (m).

Para Ackers e White (1973), a equação geral de transporte é representada por:

$$X = \frac{G_{gr} s d_s}{D \left(\frac{u^*}{V} \right)^n} \quad (5)$$

$$G_{gr} = C \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right) \quad (6)$$

Onde:

- X : Concentração de sedimentos (ppm);
- G_{gr} : Descarga sólida (adimensional);
- s : Densidade específica dos sedimentos;
- d_s : Diâmetro médio das partículas (m);
- D : Profundidade efetiva (m);
- u^* : Velocidade de cisalhamento (m/s);
- V : Velocidade média do canal (m/s);
- N : Expoente de transição, que depende da granulometria do sedimento
- C : Coeficiente
- F_{gr} : Parâmetro de mobilidade do sedimento (adimensional);
- A : Valor do numero de Froude em movimento inicial.

Em Yang (1973), as equações gerais de transporte para areia e cascalho são representadas por:

$$\log C_t = 5.435 - 0.286 \log \frac{\omega d_m}{\nu} - 0.457 \log \frac{u_*}{\omega} + (1.799 - 0.409 \log \frac{\omega d_m}{\nu} - 0.314 \log \frac{u_*}{\omega}) \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr} S}{\omega} \right) \quad (7)$$

$$\log C_t = 6.681 - 0.633 \log \frac{\omega d_m}{\nu} - 4.816 \log \frac{u_*}{\omega} + (2.784 - 0.305 \log \frac{\omega d_m}{\nu} - 0.282 \log \frac{u_*}{\omega}) \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr} S}{\omega} \right) \quad (8)$$

Para areia $d_m \geq 2mm$

Onde:

- C_t : Concentração total de sedimentos (ppm);
- Ω : Velocidade de queda de partículas (m/s);
- d_m : Diâmetro médio das partículas (m);
- ν : Viscosidade cinemática do fluido (m²/s);
- u_* : Velocidade de cisalhamento dos grãos (m/s);
- V : Velocidade média do escoamento (m/s);
- S : Declividade da linha d'água (m/m).

4.3.3.2 Método de classificação

A princípio, o método de Copeland (Exner 7) havia sido escolhido. O método é uma nova versão baseada no método Exner 5, sendo próprio para rios de leito de areia. Todavia, ao testar o modelo com essa opção, nenhuma simulação funcionou para o trecho, apresentando erro em todas as tentativas. Isso pode ter acontecido devido à

equação de Copeland calcular mais erosão, sendo que na região há um predomínio de deposição de material, e a equação de Exner 5 limitar a erosão nas camadas mais profundas. Desse modo, foi escolhida a opção de Thomas (Exner 5), que funcionou sem apresentar erros.

4.3.3.3 Equações de velocidade de queda

A equação de Rubey foi escolhida por ser mais adequada para o trecho e englobar diversos tamanhos de partículas, como silte, areia e cascalho, sugerindo que a densidade específica do sedimento seja em torno de 2,65. A equação é apresentada abaixo:

$$\omega = F_1 \sqrt{(s-1)gd_s} \quad (9)$$

No qual:

$$F_1 = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{gd^3(s-1)}} - \sqrt{\frac{36v^2}{gd^3(s-1)}}$$

4.3.3.4 Condições de contorno

Para condições de contorno de sedimentos, o HEC-RAS inclui opções para definir condições à jusante, que seguem:

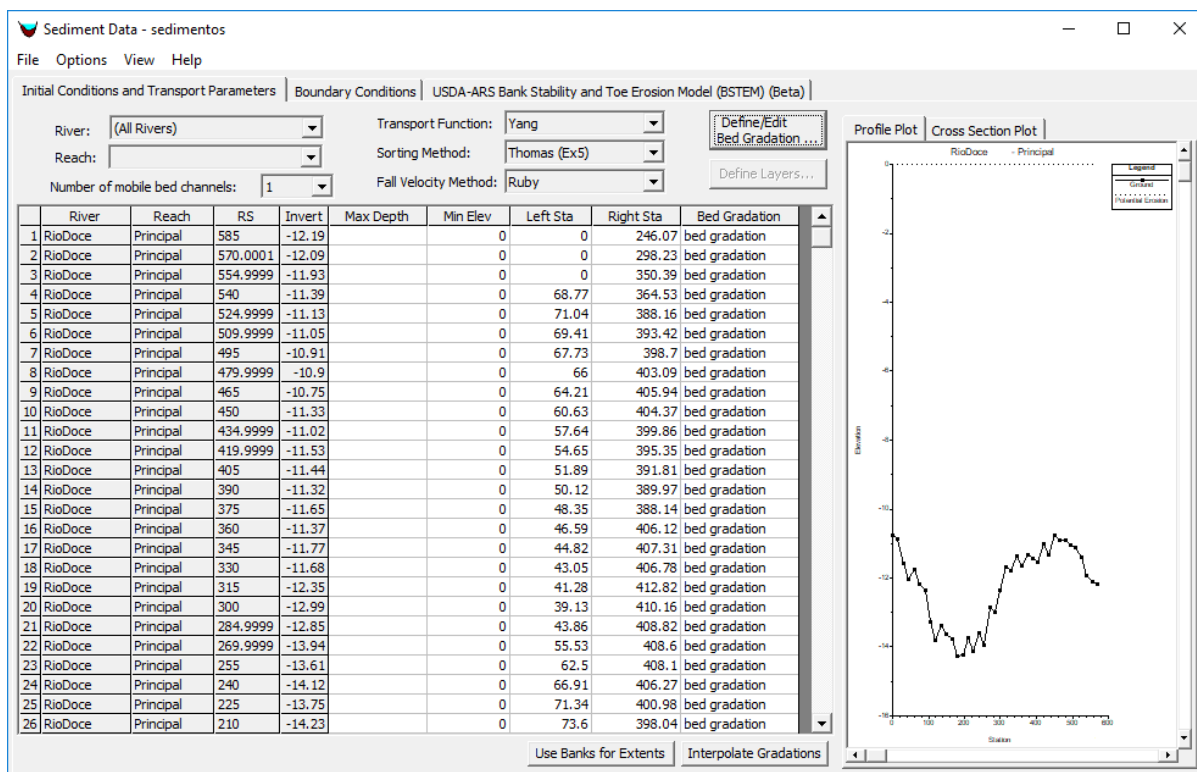
- *Rating Curve*: A curva de descarga, que avalia a produção de sedimentos baseando-se no incremento da vazão. O incremento de vazão pode ocorrer pela entrada de vazão na seção transversal à montante ou por incrementos laterais.
- *Sediment Load Series*: Se existem incrementos de sedimentos que não estão associados a incrementos de fluxo, estes podem ser inseridos em qualquer seção, salvo a seção limite à jusante, como uma carga total durante um intervalo de tempo. Uma curva de distribuição, em porcentagens ou frações decimais, para cada tamanho de partícula dentro de uma faixa de cargas deve ser inserida.
- *Equilibrium Load*: A carga de equilíbrio, que está disponível para seções transversais externas à montante do trecho, é determinada pela capacidade de transporte. O programa irá calcular a capacidade de transporte para cada divisão de

tempo na seção especificada e este valor será utilizado para avaliar a magnitude da entrada de sedimentos. Uma vez que a carga iguale à capacidade de transporte, não haverá sedimentação ou erosão nesta seção.

Como havia dados de vazão, descarga total de sedimentos e granulometria, foi escolhida a primeira opção, *Rating Curve*, onde foram inseridos os dados de dezembro (02/12/2011) e fevereiro (10/02/2012), já que *Sediment Load Series* requer dados muito precisos para cada seção transversal delimitada do rio e *Equilibrium Load* serve apenas para seções transversais para se conectarem ao rio principal.

Desse modo, foi criado um arquivo de sedimento a partir de uma curva granulométrica média para todas as seções do rio Doce (Figura 19). A condição de contorno definida à montante foi *Rating Curve*, onde se gera uma curva associando a vazão líquida com a vazão de sólidos totais.

Figura 19 – Janela do HEC-RAS para edição de condições iniciais dos sedimentos.



Fonte: Elaborado pela autora.

O HEC-RAS disponibiliza uma tabela em que o próprio programa classifica o sedimento transportado entre 0,002 mm a 2048 mm em 20 tipos, como apresenta a Figura 20.

Figura 20 – Classificação do tamanho das partículas de sedimento pelo HEC-RAS.

Grain Classes		Lower Bound	Upper Bound	Mean Diameter	Geometric Mean
Clay	Clay	0.002	0.004	0.003	0.00283
Very Fine Silt	VFM	0.004	0.008	0.006	0.00566
Fine Silt	FM	0.008	0.016	0.011	0.0113
Medium Silt	MM	0.016	0.032	0.023	0.0226
Coarse Silt	CM	0.032	0.0625	0.045	0.0447
Very Fine Sand	VFS	0.0625	0.125	0.088	0.0884
Fine Sand	FS	0.125	0.25	0.177	0.177
Medium Sand	MS	0.25	0.5	0.354	0.354
Course Sand	CS	0.5	1	0.707	0.707
Very Course Sand	VCS	1	2	1.41	1.41
Very Fine Gravel	VFG	2	4	2.83	2.83
Fine Gravel	FG	4	8	5.66	5.66
Medium Gravel	MG	8	16	11.3	11.3
Coarse Gravel	CG	16	32	22.6	22.6
Very Coarse Gravel	VCG	32	64	45.3	45.3
Small Cobbles	SC	64	128	90.5	90.5
Large Cobbles	LC	128	256	181	181
Small Boulders	SB	256	512	362	362
Medium Boulders	MB	512	1024	724	724
Large Boulders	LB	1024	2048	1448	1450

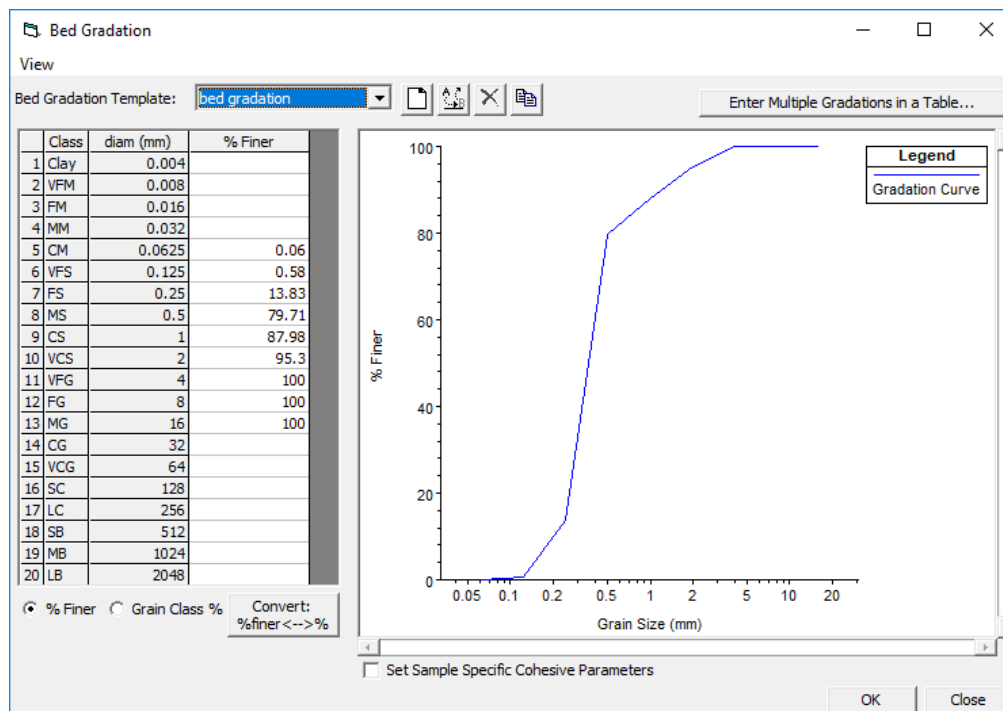
Fonte: USACE, 2016a.

A partir do primeiro termo Clay, temos a argila, variando entre 0,002 mm a 0,004mm; se estendendo até grandes pedregulhos, entre 1024 mm a 2048 mm. O material coletado do rio Doce variou entre 0,0625 mm a 2 mm, indicando uma classificação entre areia muito fina a areia muito grossa pelo programa, tendo maior retenção de partículas na peneira de 0,125mm, ou seja, areia média.

A figura 21 apresenta a janela de edição para inserir dados de granulometria das seções. É possível acrescentar dados de granulometria para cada seção, mas neste caso foi adotado um mesmo valor de distribuição, em porcentagem, para todo o trecho.

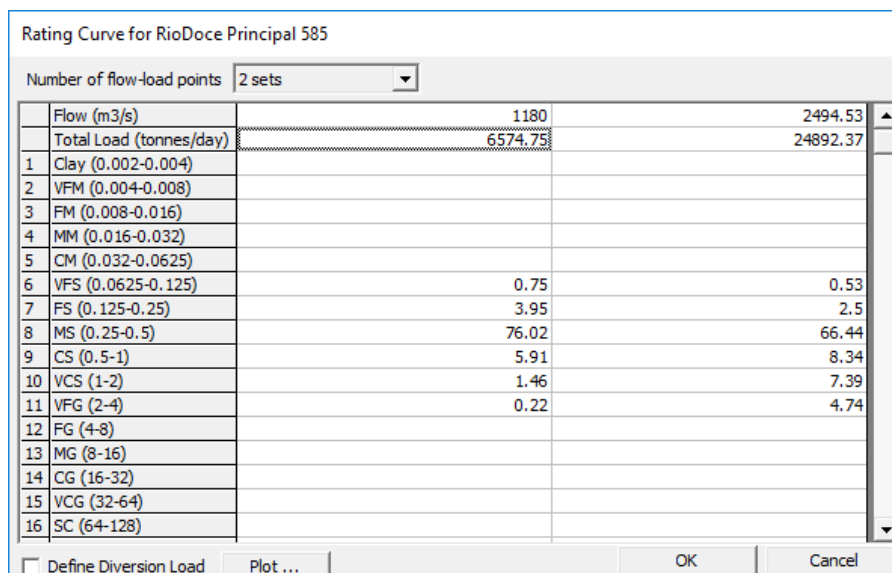
A figura 22 indica as opções de edição para condição de contorno do arquivo de sedimentos. Como foi escolhida a opção Rating Curve, foi preciso colocar dados de vazão associados a valores de descarga de sedimentos e a respectiva granulometria, em frações decimais do que ficou retido para cada classe de grãos.

Figura 21 – Janela do HEC-RAS para edição de granulometria do leito.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 22 – Janela do HEC-RAS para edição de condições de contorno à montante do arquivo de sedimentos.



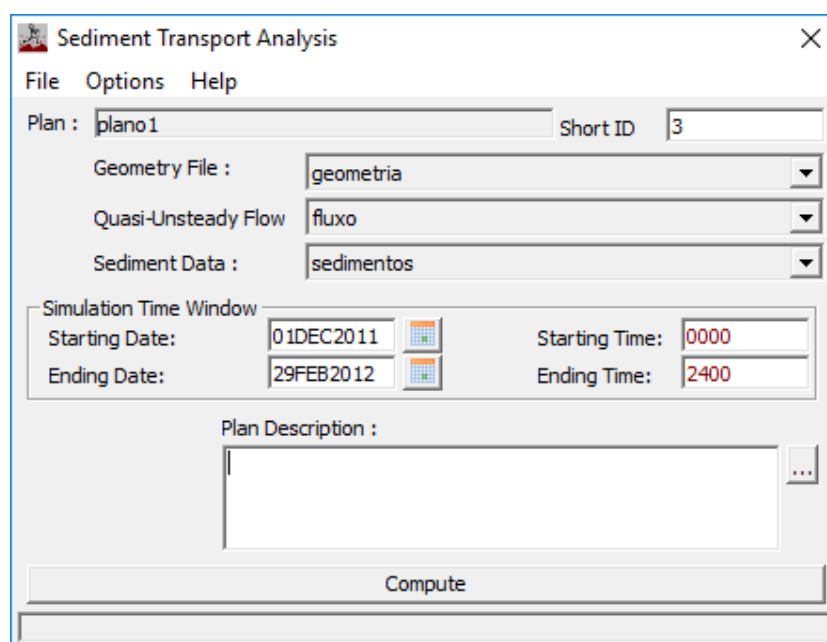
Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.4 Plano de Análise de Sedimentos

A ferramenta “Plano de Análise de Transporte de Sedimentos” realiza o cálculo do transporte de sedimentos, onde são inseridos os arquivos gerados – arquivo geométrico, arquivo de fluxo, e arquivo de sedimentos – e são definidas as configurações de saída dos resultados, bem como período de análise.

A figura 23 representa a janela de edição da ferramenta para executar o plano de análise de sedimentos, onde resultam os resultados do transporte de sedimentos.

Figura 23 – Janela do HEC-RAS para análise do plano de sedimentos.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para isso, como os dados de vazão compreendiam o período de 01/12/2011 a 29/02/2012, foi escolhido esse intervalo para análise de transporte de sedimento no trecho.

4.3.5 Calibração do modelo

Conde (2007) afirma que os modelos unidimensionais requerem uma menor quantidade de informações na fase de calibração e testes por serem mais estáveis, o que torna uma boa ferramenta de engenharia para prever a evolução de leitos.

Fazendo um breve resumo, foram utilizados os seguintes dados de entrada para calibração do modelo:

- Arquivo geométrico criado a partir de batimetrias (m) de dezembro (02/12/2011) e fevereiro (10/02/2012 e 24/02/2012);
- Vazões médias diárias (m^3/s) de 01/12/2011 à 29/02/2012, como condição de contorno à montante do fluxo;
- Dados de descarga total de sedimentos (ton/dia) de dezembro (02/12/2011) e fevereiro (10/02/2012) como condição de contorno à montante do arquivo de sedimentos;
- Coeficientes de Manning (1ª alternativa - 0,055 (calha) e 0,055 (margens); 2ª alternativa - 0,0126 (calha) e 0,0126 (margens); e 3ª alternativa - 0,029 (calha) e 0,055 (margens));
- Coeficiente de expansão (0,3) e contração (0,1), indicado pelo Manual do HEC-RAS (USACE, 2016a);
- Declividades de linha d'água como condição de contorno à jusante do fluxo (0,000257; 0,00013 e 0,00007);
- Granulometria de dezembro (02/12/2011) e fevereiro (10/02/2012);
- Temperaturas de dezembro a fevereiro, que variaram de 25 °C a 29,2°C;
- Equações de transporte de sedimentos: Engelund e Hansen (1967), Ackers e White (1973), e Yang (1973);
- Velocidade de queda: Rubey (1933);
- Método de classificação: Exner 5.

Para verificar a calibração do modelo, foi avaliada a elevação da batimetria observada em campo com a simulada em HEC-RAS, partindo do início de dezembro (02/12/2011) para as respectivas datas:

- 16/12/2011
- 10/02/2012

- 24/02/2012

Foi preciso elaborar gráficos para comparação visual e aplicação do coeficiente de correlação (r) e determinação (R^2) nos valores das cotas observadas e modeladas para mensurar a aproximação dos valores obtidos.

O coeficiente de correlação ou Pearson indica a correlação quantitativa entre variáveis por meio de uma associação linear, sendo o seu valor ao quadrado denominado coeficiente de determinação (MARTINS, 2014).

Representando $(x,y) = \{(X_i, Y_i)\}$, com $i = 1, \dots, n$, uma amostra de dados bivariados, o coeficiente de correlação de Pearson é calculado pela seguinte fórmula:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (10)$$

Onde:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad \text{e} \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$$

O coeficiente de correlação r para o par de variáveis (x,y) é o quociente entre a covariância amostral das variáveis x e y e o produto dos desvios padrões:

$$r = \frac{Cov(x,y)}{s_x s_y} \quad (11)$$

O coeficiente de correlação assume valores entre -1 e 1, indicando que, quanto mais próximo de 1, maior será a associação entre as variáveis. Valores pequenos de correlação (r) compreendem a faixa entre 0,10 a 0,29; médios entre 0,30 a 0,49; e grandes a partir de 0,50 (COHEN, 1988).

Em uma regressão linear em que a variável explanatória é x e a variável resposta é y , o coeficiente de determinação (R^2) fornece a percentagem de variabilidade dos y 's, onde explica em função da variabilidade dos x 's. Desse modo, se um coeficiente de correlação parecer elevado, como no caso de $r=0,7$, a variabilidade que fica por explicar chega a (100-49%), indicando um relacionamento moderado (MARTINS, 2014). Bilal et al. (2017) aplicaram o coeficiente de determinação (R^2) e encontraram

bons resultados na comparação das elevações do perfil do rio estudado, que seriam dados observados e simulados em HEC-RAS.

Timbadiya, Patel e Porey (2011) aplicaram também a raiz do erro quadrático médio (EQM) para validar o modelo HEC-RAS, obtendo bons resultados na calibração. Valores próximos a zero indicam um ajuste perfeito. A equação de EQM pode ser calculada como:

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{medida_i} - \bar{y}_{calc_i})^2}{n-v}} \quad (12)$$

Onde:

- y_{medida_i} : A variável dependente observada para cada elemento do conjunto de dados;
- $\bar{y}_{calc_i}$: O valor médio da variável dependente calculado para todo o conjunto de dados;
- N: O número de elementos contidos no conjunto de dados da amostra;
- V: O número de variáveis independentes envolvidas no modelo.

Nesta etapa, os valores das elevações observadas e simuladas em HEC-RAS foram então comparados a fim de se obter o melhor ajuste para o trecho do rio Doce e indicar o melhor coeficiente de Manning em conjunto com a equação de transporte de sedimentos.

4.3.7 Simulação do transporte de sedimentos

Após a calibração e análise estatística, foram obtidos os seguintes valores do plano de análise de sedimentos do programa HEC-RAS de acordo com o melhor ajuste do modelo escolhido:

- *Sediment discharge*: vazão mássica/descarga total de sedimentos (toneladas/dia) que sai do volume de controle de sedimentos de uma determinada seção transversal.
- *Mass Bed Change*: Alteração do leito, indicando condições de erosão/sedimentação (toneladas);
- *Sediment concentration*: Concentração de sedimentos em mg/L.

Com dados de vazão e obtenção de concentração de sedimentos pelo HEC-RAS, estimou-se a descarga sólida de sedimentos em suspensão pela seguinte fórmula descrita por Santos et al. (2012):

$$Q_{ss} = 0,0864 \cdot Q \cdot C_{ss} \quad (13)$$

Onde:

- Q_{ss} : Descarga sólida em suspensão (ton/d);
- Q : Vazão líquida (m^3/s);
- C_{ss} : Concentração de sedimentos em suspensão (ppm ou mg/L).

De acordo com Paiva (2001), a descarga total de sedimentos transportados pode ser estimada na seguinte equação:

$$Q_{st} = Q_{sf} + Q_{ss} + Q_{sb} \quad (14)$$

Onde:

- Q_{st} : Descarga de sedimentos total (ton/dia);
- Q_{sf} : Descarga de sedimentos por arraste de fundo (ton/dia);
- Q_{ss} : Descarga de sedimentos em suspensão proveniente do leito (ton/dia);
- Q_{sb} : Descarga de sedimento em suspensão proveniente da bacia (ton/dia).

Como o programa apenas fornece a descarga total de sedimentos para a maioria das equações existentes, procurou-se estimar dados para encontrar a descarga de

material de leito, como forma de comparação com trabalhos anteriores.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das simulações de transporte de sedimentos do trecho do rio Doce são apresentados neste tópico. Após a calibração do modelo de fluxo e de sedimentos, descrita na metodologia, houve a análise estatística e o ajuste para que fossem obtidos os resultados mais próximos da realidade, comparando a batimetria medida em campo com a simulada em HEC-RAS.

Ao encontrar o ajuste mais próximo entre as batimetrias medidas e simuladas, nos meses de dezembro de 2011 a fevereiro de 2012, foram então obtidos os dados de descarga total de sedimentos (ton/dia) e as condições de erosão e deposição no trecho (ton) para o mesmo período. Além disso, também foram estimadas as descargas de sedimentos no leito (ton/dia).

Para tornar mais clara a apresentação do período de utilização dos dados de entrada, foi elaborada a tabela 12, que descreve como ocorreram as simulações em HEC-RAS:

Tabela 16 – Datas dos dados de entrada utilizados para simulações.

Dados de entrada	Datas dos dados utilizados
Batimetrias	02/12/2011
	16/12/2011
	10/02/2012
	24/02/2012
Vazões líquidas	01/12/2011 a 29/02/2012
Vazões sólidas	02/12/2011
	10/02/2012
Temperatura	01/12/2011 a 29/02/2012
Granulometria	02/12/2011
	10/02/2012

Fonte: Elaborado pela autora.

Em sequencia, são apresentadas as comparações realizadas das elevações simuladas para cada equação de transporte de sedimentos - Engelund e Hansen (1967), Ackers e White (1973), e Yang (1973), e diferentes valores de coeficiente de Manning e declividade da linha d'água.

Foram aplicadas análises estatísticas nessa fase da calibração para encontrar o melhor ajuste de parâmetros. Para isso, o critério de classificação de um bom resultado para ser selecionado como configuração na análise de transporte de sedimentos foi estabelecido de modo que todas as três simulações para as datas de 16/12/2011, 10/02/2012 e 24/02/2012 obtivessem alta correlação, ou seja, $r = 0,70$ a 1 (HINKLE; WIERSMA; JURS, 2003). Para melhor representar os resultados a seguir, foi feita a seguinte analogia:

- Simulação 1: utilizando coeficiente de Manning 0,055
- Simulação 2: utilizando coeficiente de Manning 0,0126
- Simulação 3: utilizando coeficiente de Manning 0,029

Tabela 17 – Resumo das simulações realizadas em HEC-RAS.

(continuação)

Etapa	Coeficiente de Manning	Declividade da linha d'água	Equações de transporte	Condição de contorno	Objetivo
Simulação 1	0,055 (calha) e 0,055 (margens)	0,000257	Engelund e Hansen (1967)	<u>Para fluxo quasi-permanente:</u> - Vazões médias diárias (montante); - Temperatura diária	Comparar as elevações do perfil longitudinal observadas em campo com simuladas em HEC-RAS
Simulação 2	0,0126 (calha) e 0,0126 (margens)	0,00013		- Normal Depth (profundidade normal - jusante);	
Simulação 3	0,029 (calha) e 0,055 (margens)	0,00007		<u>Para sedimentos:</u> - Vazões sólidas; - Granulometria do leito.	

Tabela 18 – Resumo das simulações realizadas em HEC-RAS.

(conclusão)

Etapa	Coefficiente de Manning	Declividade da linha d'água	Equações de transporte	Condição de contorno	Objetivo
Simulação 1	0,055 (calha) e 0,055 (margens)	0,000257	Ackers e White (1973)	<u>Para fluxo quasi-permanente:</u> - Vazões médias diárias (montante); - Temperatura diária - Normal Depth (profundidade normal - jusante);	Comparar as elevações do perfil longitudinal observadas em campo com simuladas em HEC-RAS
Simulação 2	0,0126 (calha) e 0,0126 (margens)	0,00013			
Simulação 3	0,029 (calha) e 0,055 (margens)	0,00007			
Simulação 1	0,055 (calha) e 0,055 (margens)	0,000257	Yang (1973)	<u>Para sedimentos:</u> - Vazões sólidas; - Granulometria do leito.	
Simulação 2	0,0126 (calha) e 0,0126 (margens)	0,00013			
Simulação 3	0,029 (calha) e 0,055 (margens)	0,00007			

Fonte: Elaborado pela autora.

5.1 SIMULAÇÃO COM ENGELUND E HANSEN

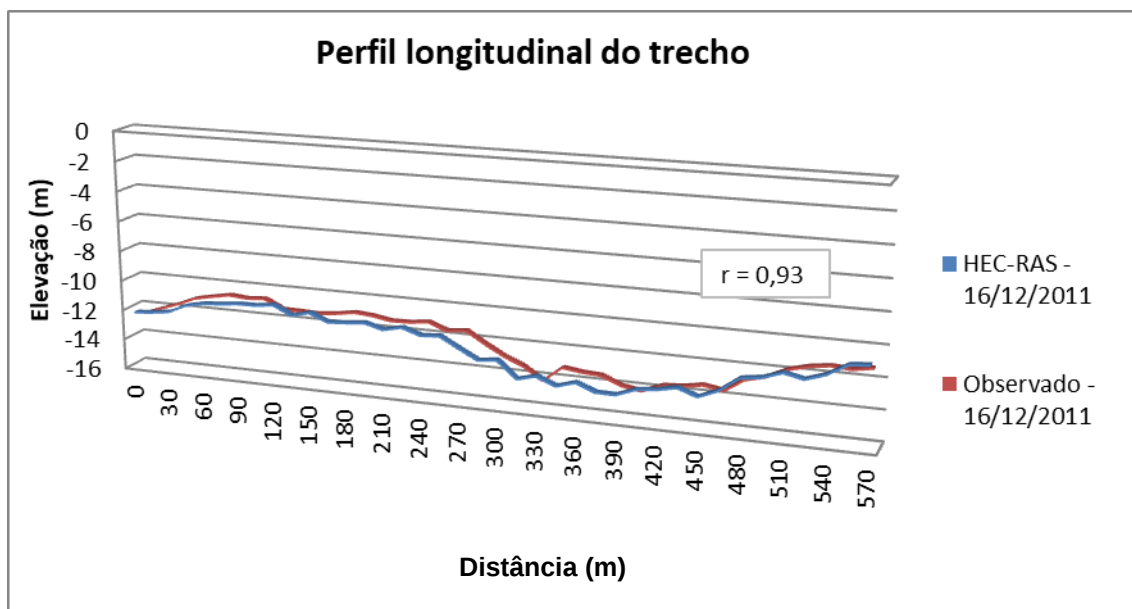
A seguir são apresentadas as simulações realizadas de transporte de sedimentos utilizando diferentes valores de Manning com a equação de transporte de Engelund e Hansen (1967), que é uma função para leito arenoso e formado por dunas. São comparadas as elevações do trecho do rio observadas e modeladas nos períodos de 16/12/2011, 10/02/2012 e 24/02/2012.

Dentre as equações disponíveis em HEC-RAS, essa foi a que mais se adequou ao trecho, apresentando os melhores coeficientes de correlação com a última configuração (Simulação 3), ou seja, todos os resultados de coeficiente de correlação com $r > 0,70$.

5.1.1 Simulação 1

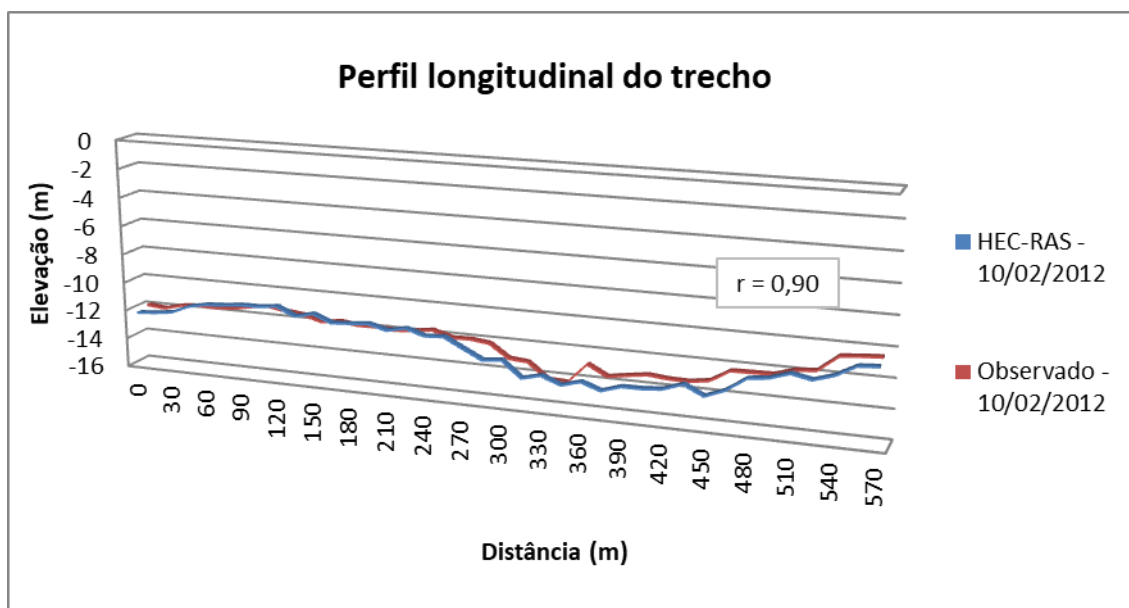
As figuras 24, 25 e 26 apresentam os resultados da comparação das elevações utilizando coeficiente de Manning de 0,055 para calha e margens:

Figura 24 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.



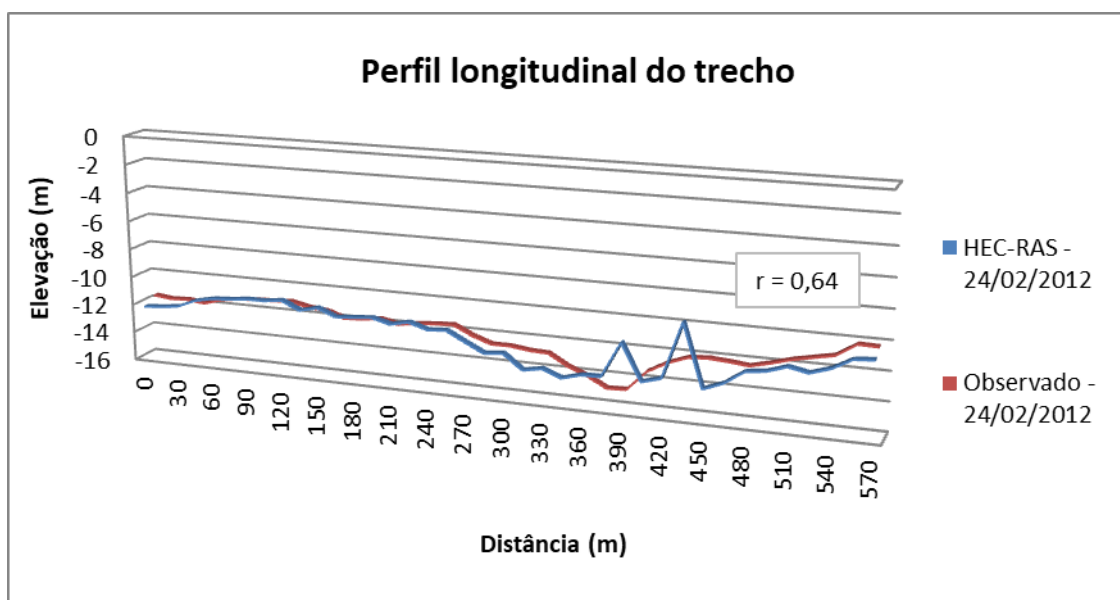
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 25 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 26 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.



Fonte: Elaborado pela autora.

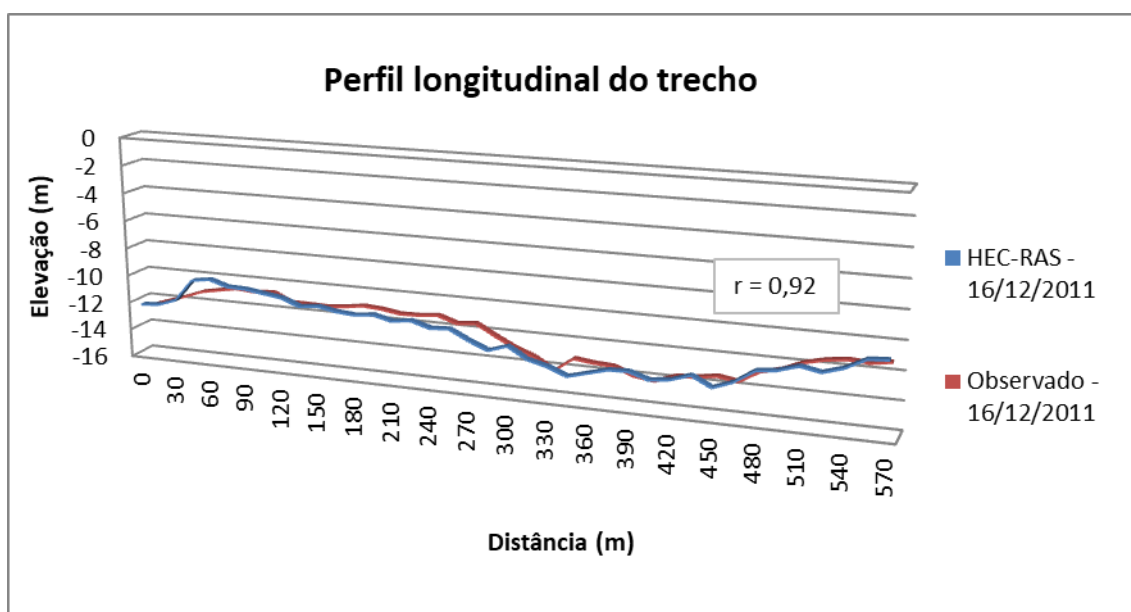
Os dois primeiros gráficos foram satisfatórios, apresentando coeficientes de correlação de 0,93 e 0,90, exceto pelo último, de 0,64, que não atendeu ao critério,

por estar com o coeficiente abaixo de 0,70. Sendo assim, essa configuração não foi considerada.

5.1.2 Simulação 2

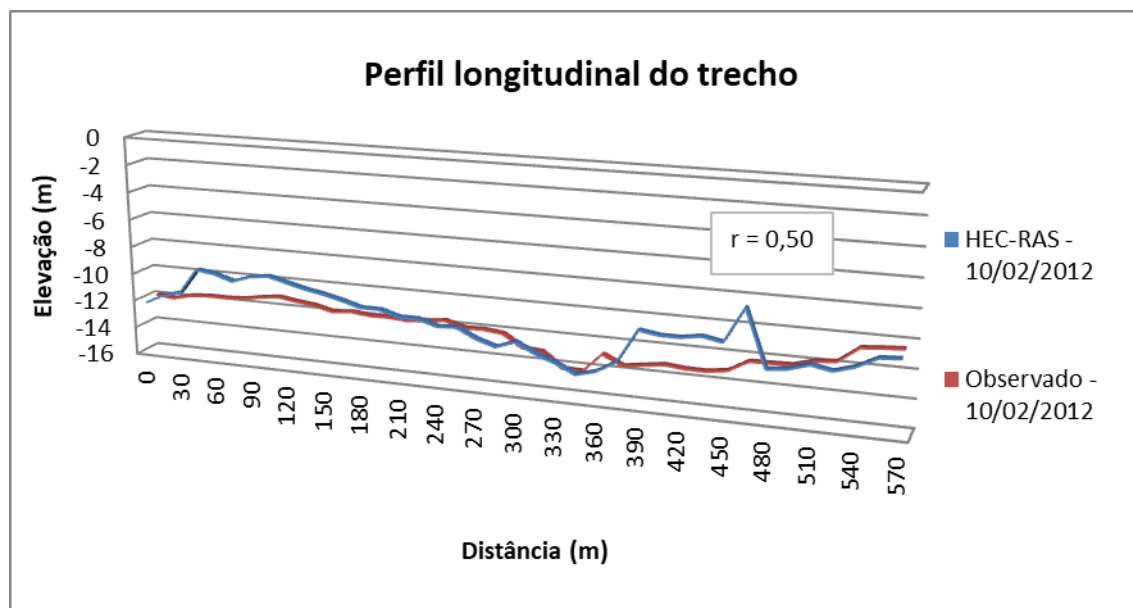
Utilizando agora o coeficiente de Manning de 0,0126 na calha e 0,0126 nas margens, houve queda na correlação, não sendo adequada para o trecho, pois para ambos os dias simulados em fevereiro, a correlação estava abaixo de 0,70.

Figura 27 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.



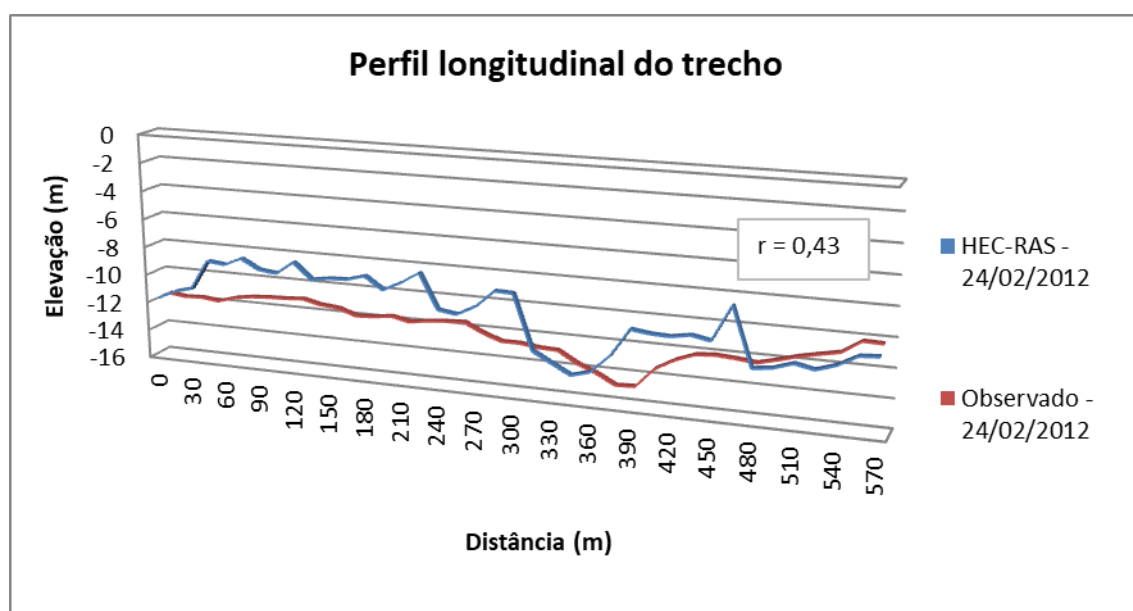
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 28 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 29 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.

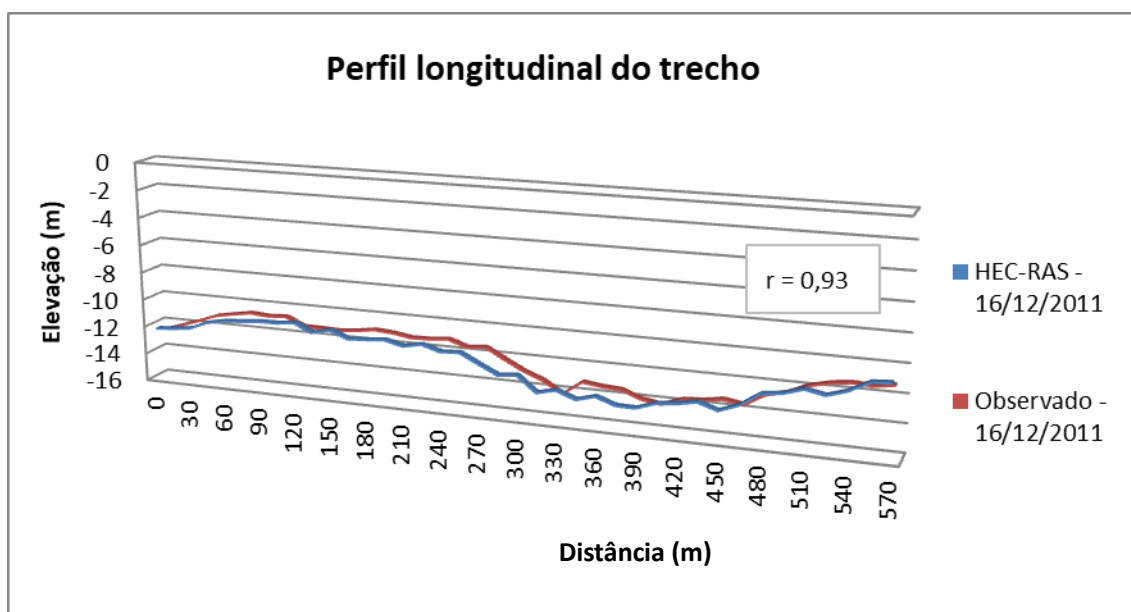


Fonte: Elaborado pela autora.

5.1.3 Simulação 3

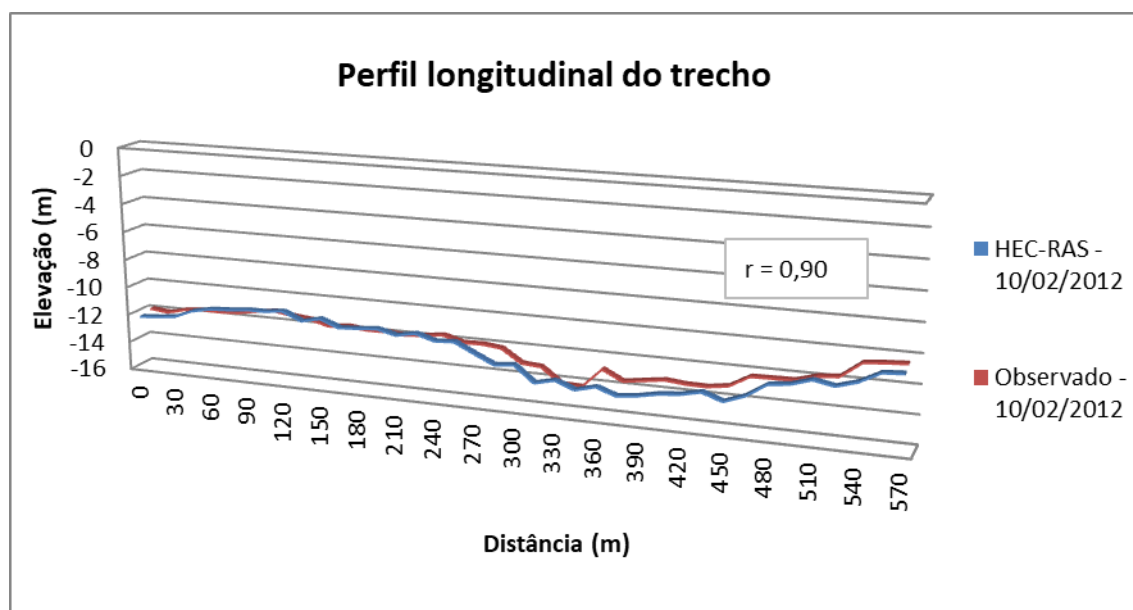
Utilizando coeficiente de Manning de 0,029, para calha, e 0,055, para as margens, foi possível observar que esse valor, combinado à equação, foi a configuração que mais se adequou ao trecho, apresentando as melhores correlações para todas as datas simuladas, com $r = 0,93$, $0,90$, e $0,85$, respectivamente, atendendo ao critério de forte correlação, ou seja, $r > 0,70$.

Figura 30 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.



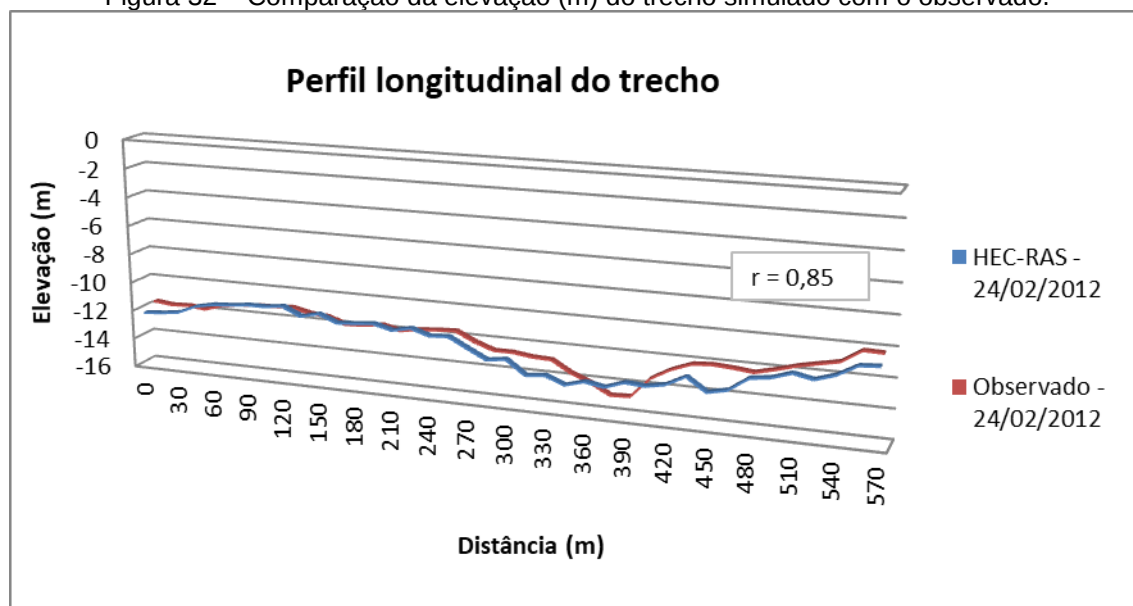
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 31 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 32 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.



Fonte: Elaborado pela autora.

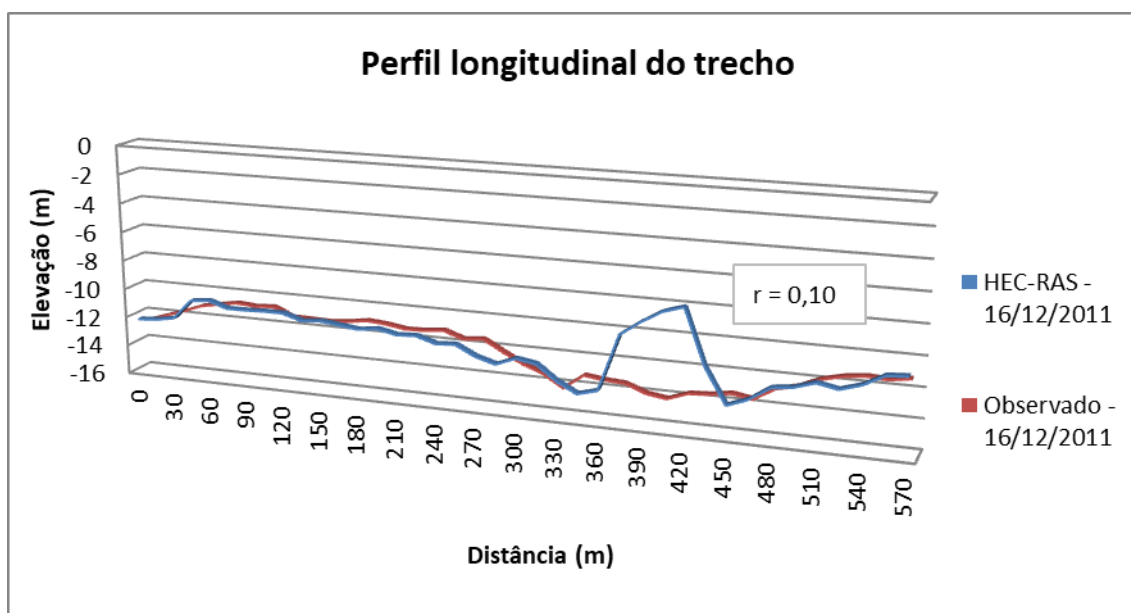
5.2 SIMULAÇÃO COM ACKERS E WHITE

As simulações com esta equação apresentaram as piores correlações, o que era esperado, pois a configuração do leito do rio Doce não se adequa à função devido ao parâmetro de profundidade, apesar de ser apropriada para leitos formados por dunas.

5.2.1 Simulação 1

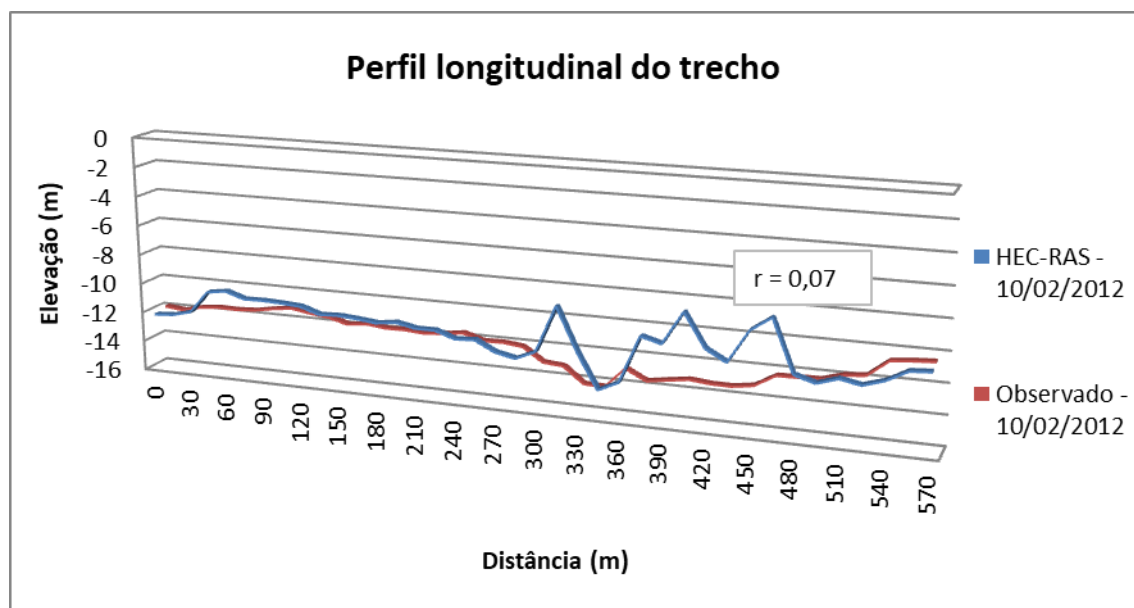
Com coeficiente de Manning de 0,055, a equação gerou os resultados de correlação mais fraca, com $r = 0,10$; 0,07 e 0,11, como mostram as figuras a seguir.

Figura 33 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.



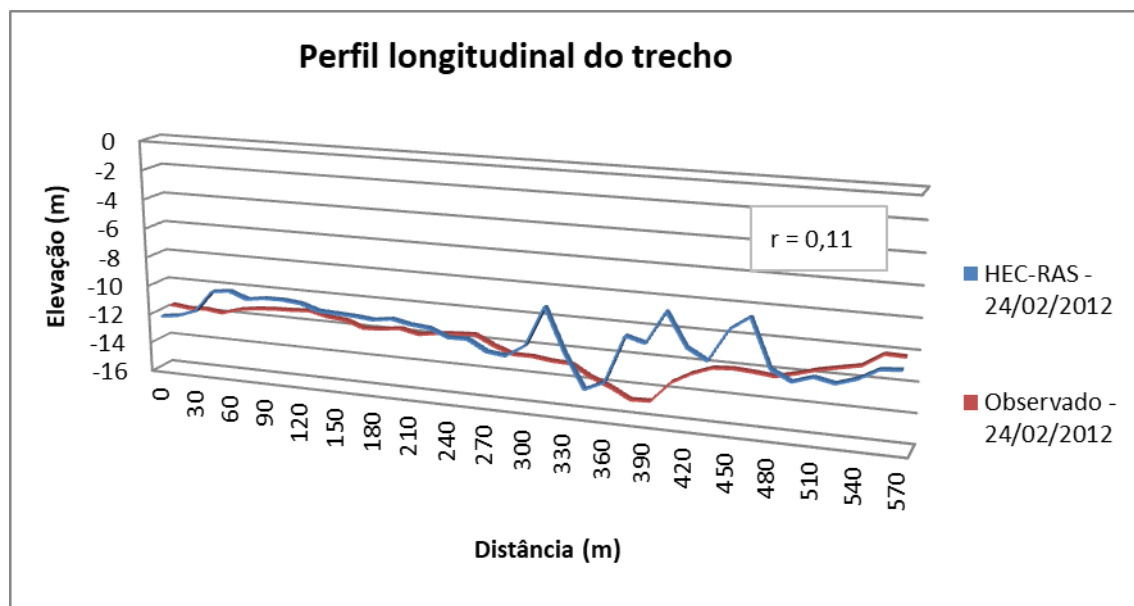
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 34 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 35 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.

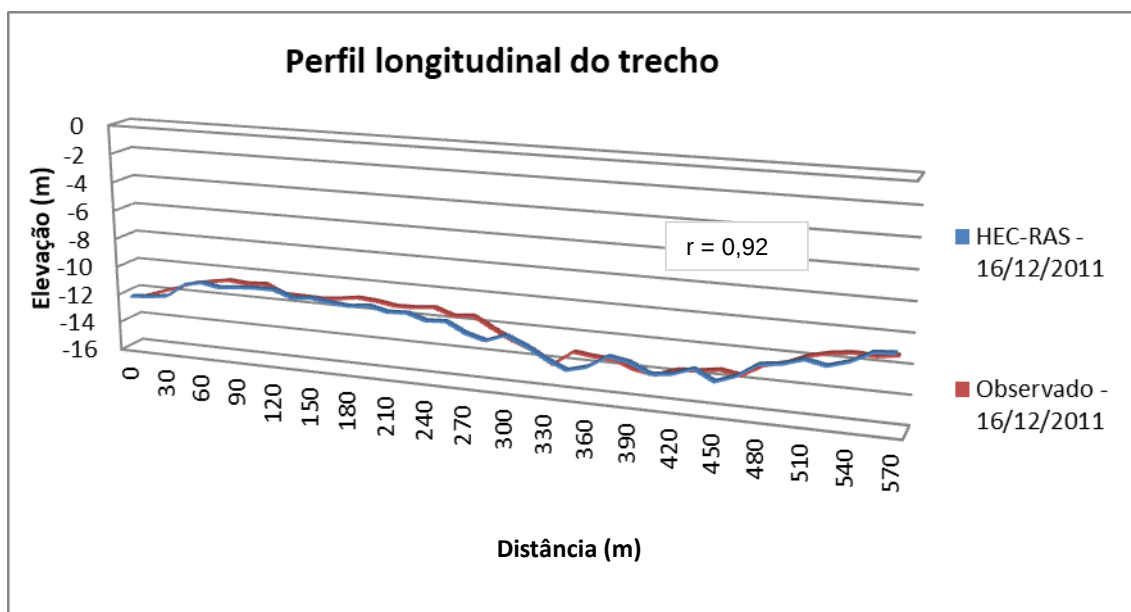


Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.2 Simulação 2

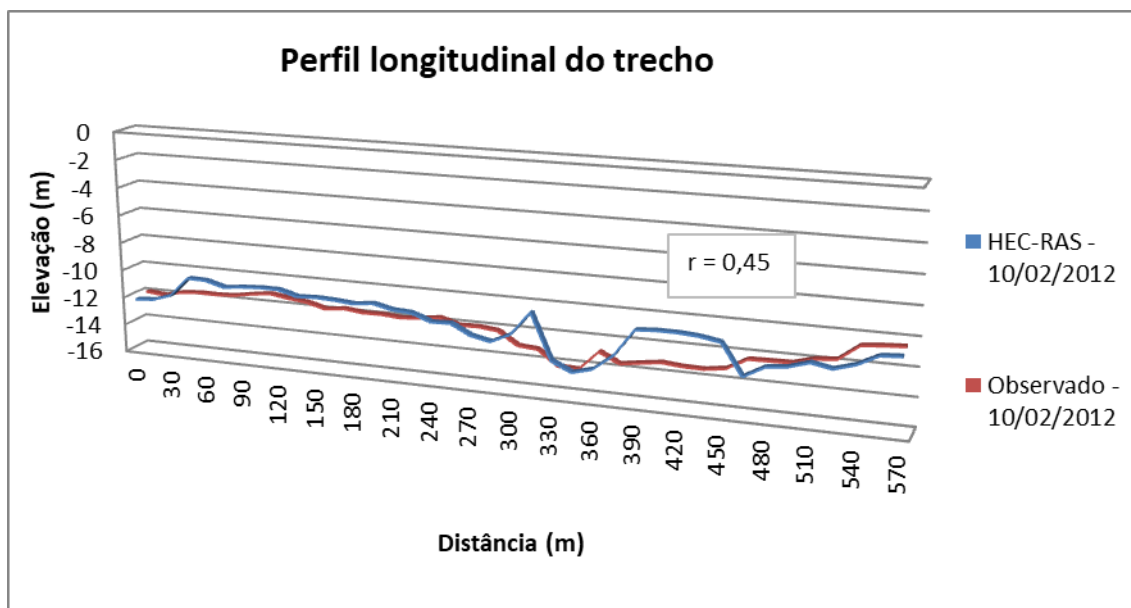
Para essa simulação, os resultados também apresentaram fraca correlação, exceto no dia 16/12/2011. Todavia, também não atendeu aos critérios, apresentado $r = 0,92$, $0,45$ e $0,42$, fracas correlações nas duas últimas simulações.

Figura 36 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.



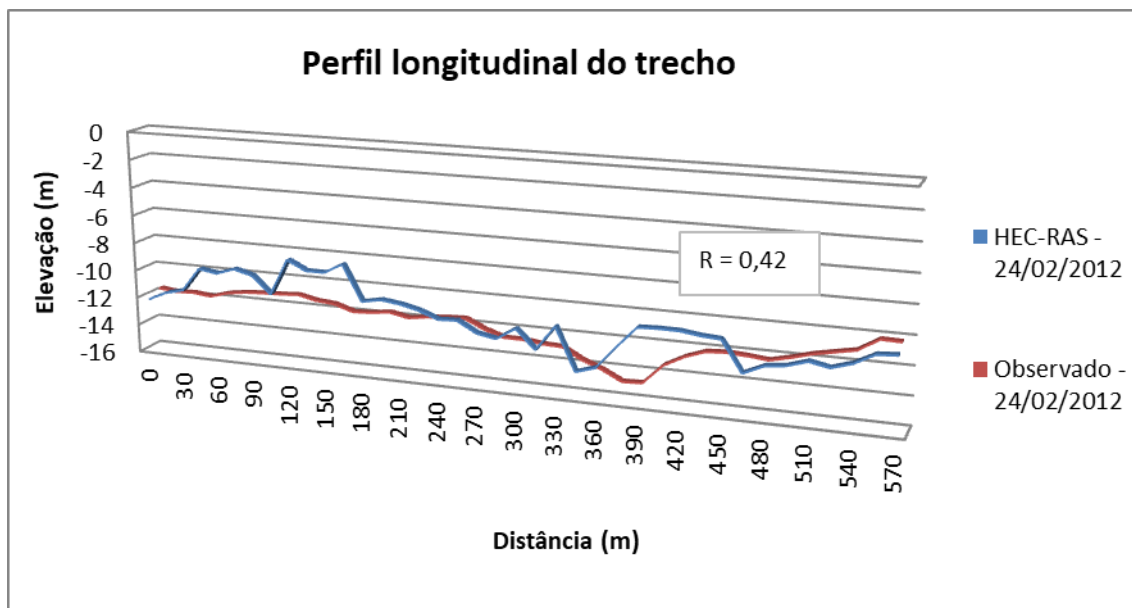
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 37 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 38 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.

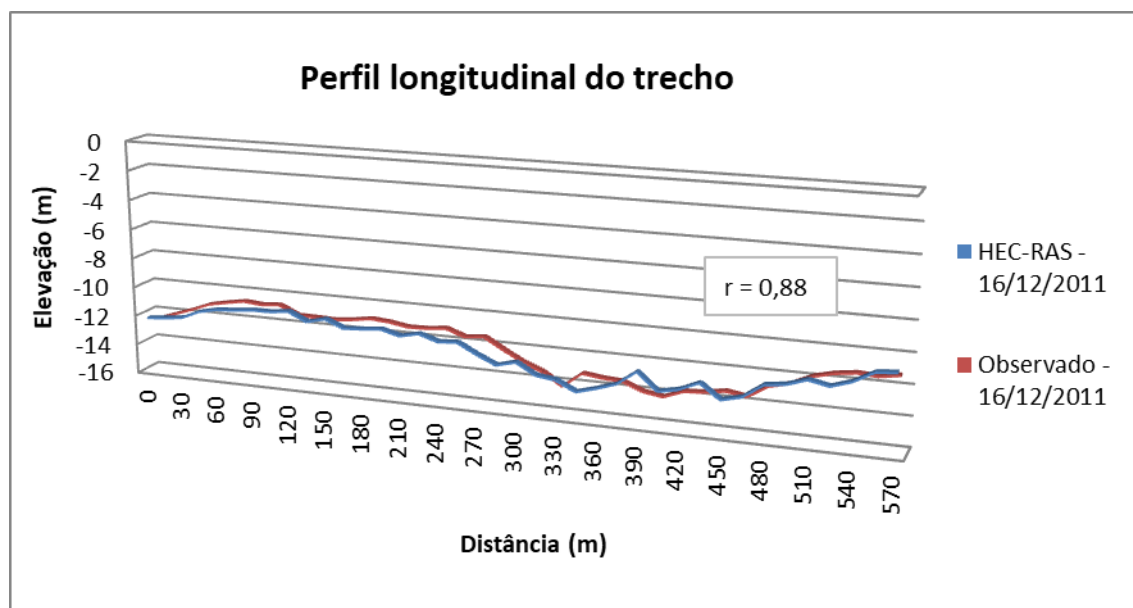


Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.3 Simulação 3

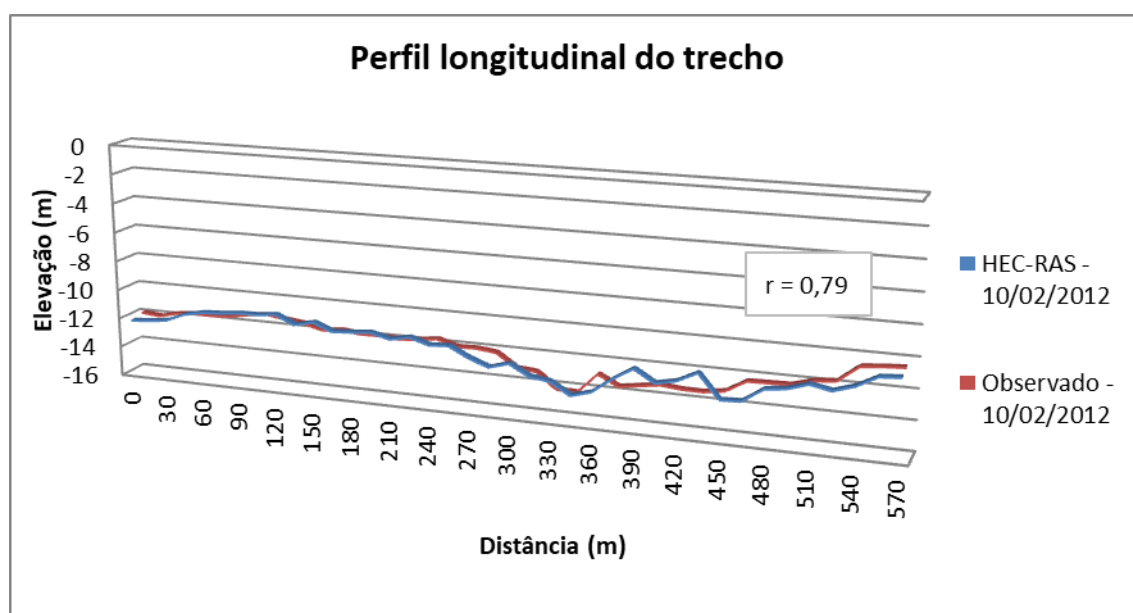
Com coeficiente de Manning de 0,029 para calha principal e 0,055 para margens para esta equação também não foi satisfatório quando observado todos os períodos analisados, com $r = 0,88$; $0,79$ e $0,19$, obtendo fraca correlação na última simulação.

Figura 39 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.



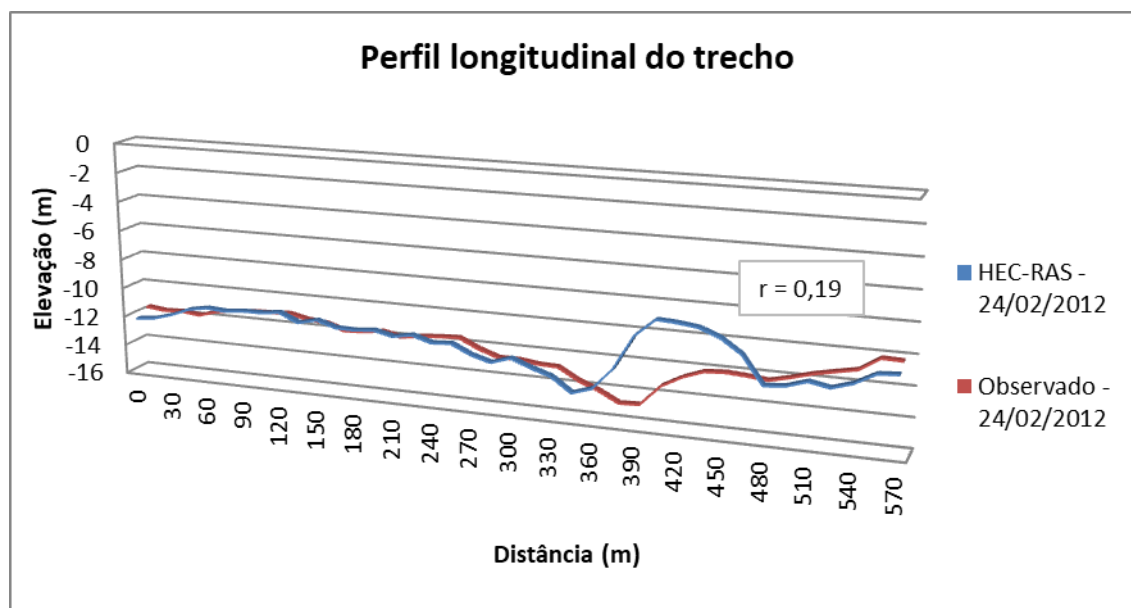
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 40 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 41 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.



Fonte: Elaborado pela autora.

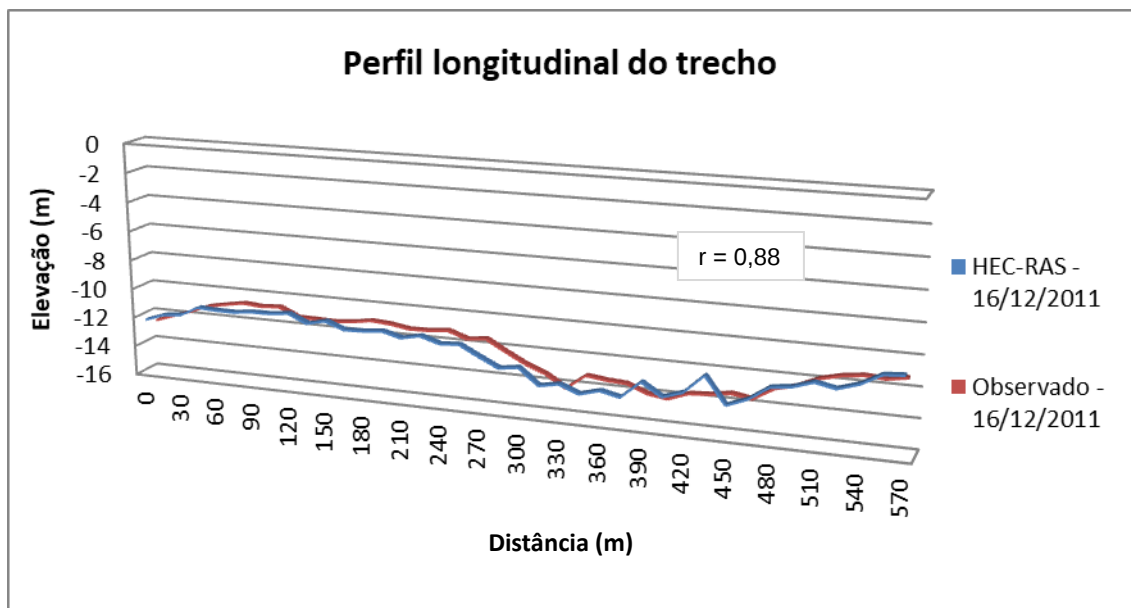
5.3 SIMULAÇÃO COM YANG

Conforme descrito na metodologia, a equação de Yang (1973) é a única aplicável ao trecho do rio Doce de acordo com as características da seção. Entretanto, não atendeu a todos os critérios estabelecidos que pudesse indicar forte correlação para todos os períodos analisados.

5.3.1 Simulação 1

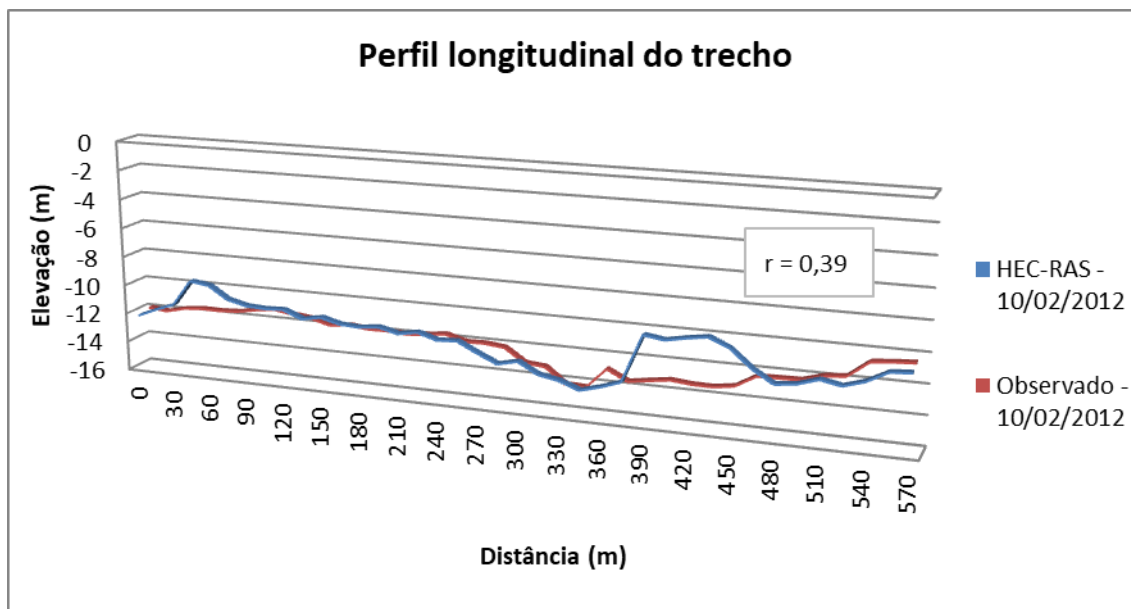
Com coeficiente de Manning de 0,055, nota-se que apenas a primeira simulação é satisfatória, com $r = 0,88$ em 16/12/2011, sendo as demais com fraca correlação, com $r = 0,39$ e $0,08$:

Figura 42 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.



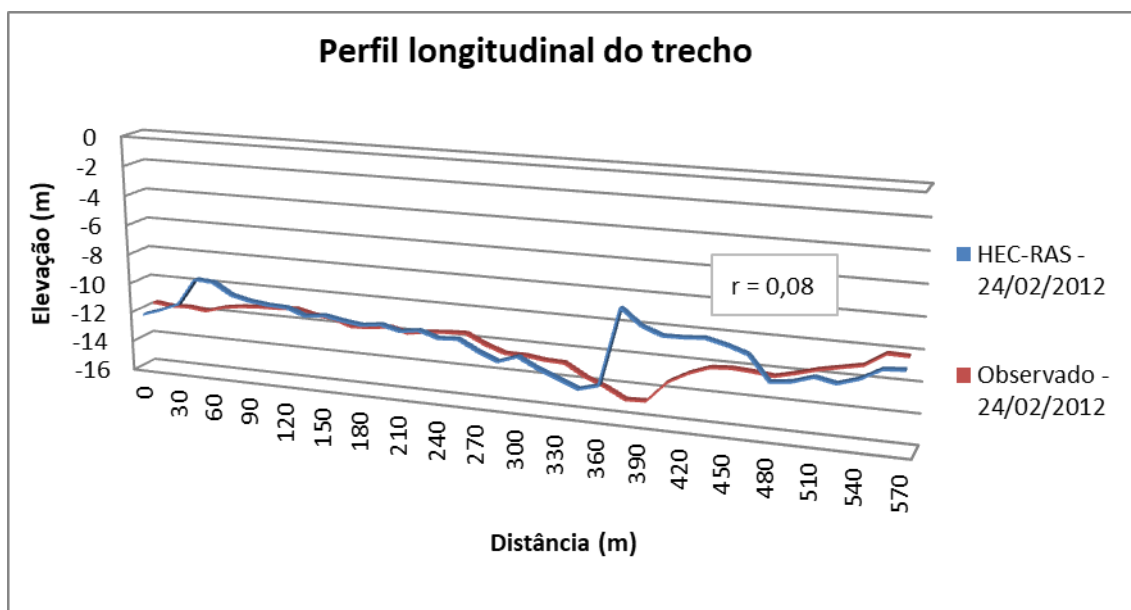
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 43 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 44 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.

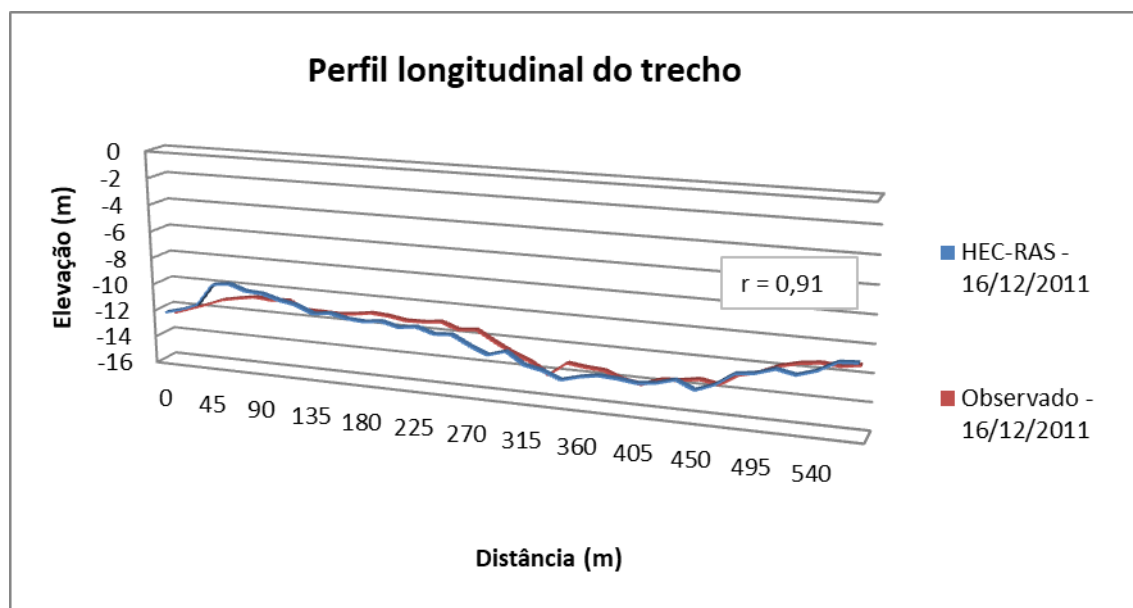


Fonte: Elaborado pela autora.

5.3.2 Simulação 2

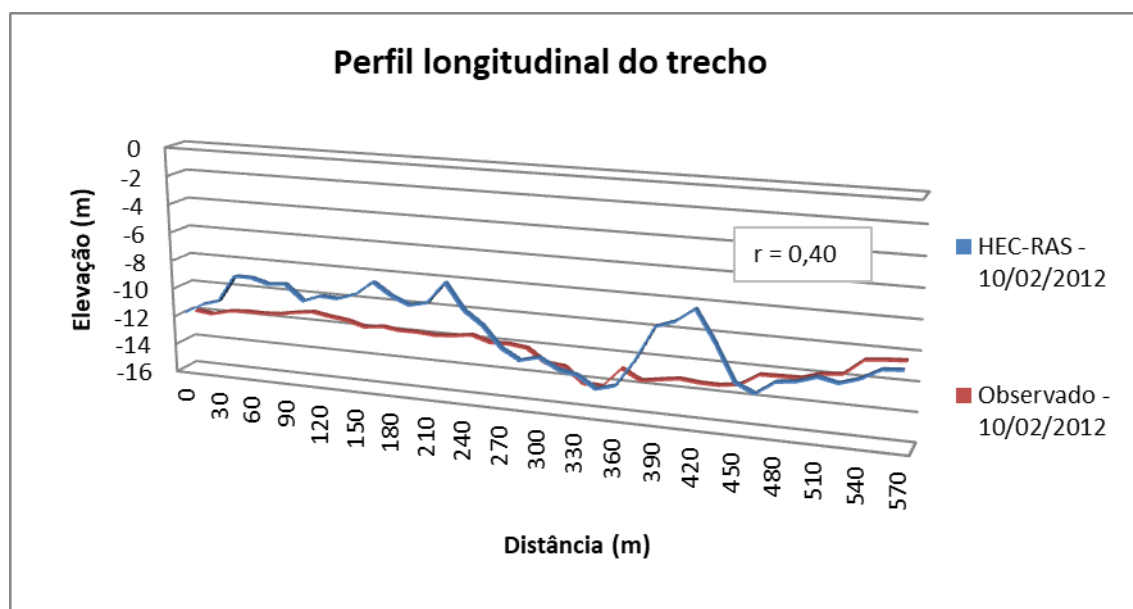
Com coeficiente de Manning de 0,0126, os resultados tenderam ao mesmo resultado da configuração anterior, como nota-se nas figuras 42, 43 e 44. Os coeficientes de correlação obtidos foram de 0,91, 0,40 e -0,23:

Figura 45 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.



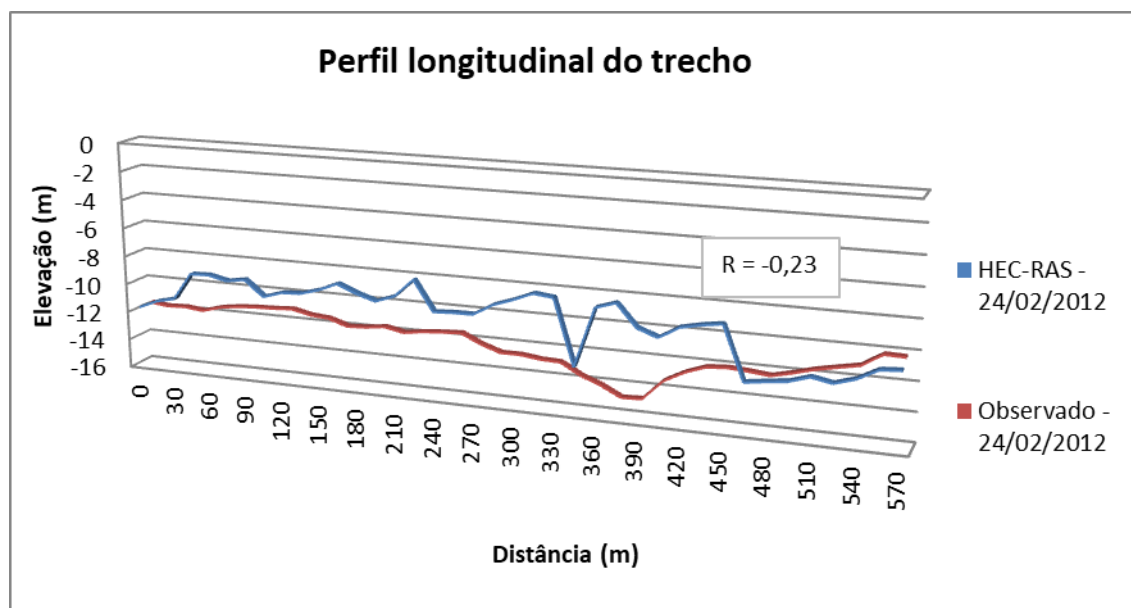
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 46 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 47 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.

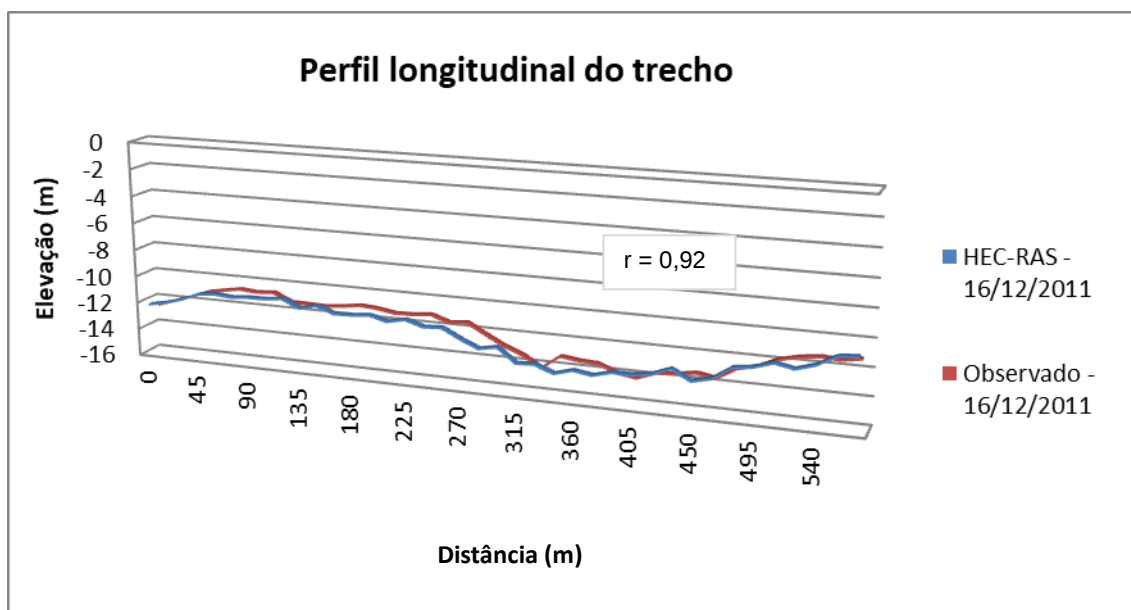


Fonte: Elaborado pela autora.

5.3.3 Simulação 3

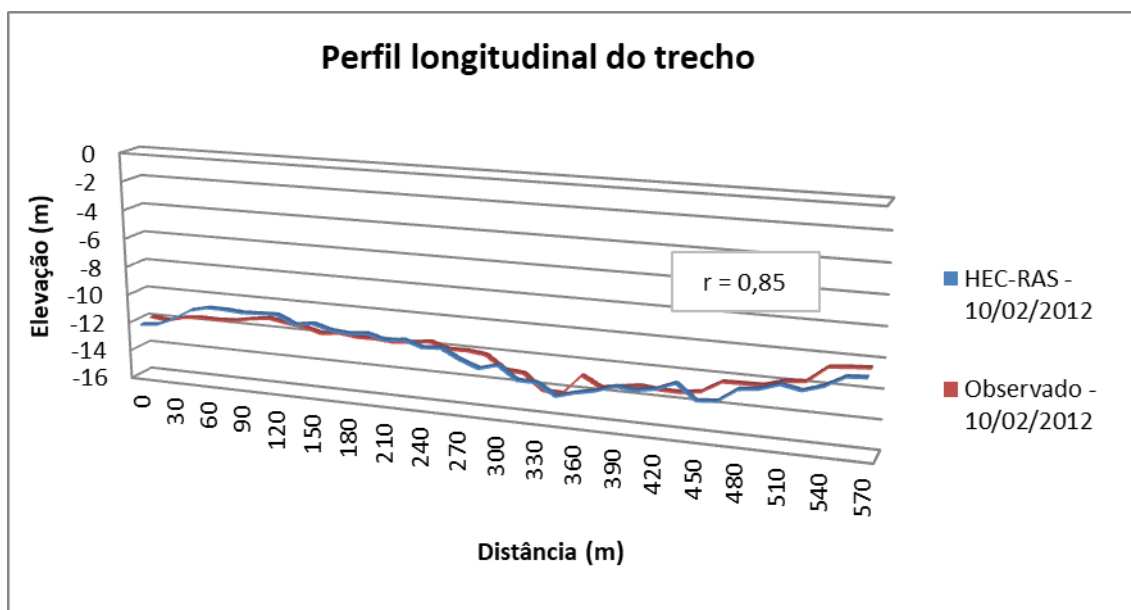
Com coeficiente de Manning de 0,029 para calha e 0,055 para margens, o modelo quase atingiu uma forte correlação para todas as datas, exceto pelo último período (24/02/2012), que apresentou $r = 0,66$.

Figura 48 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.



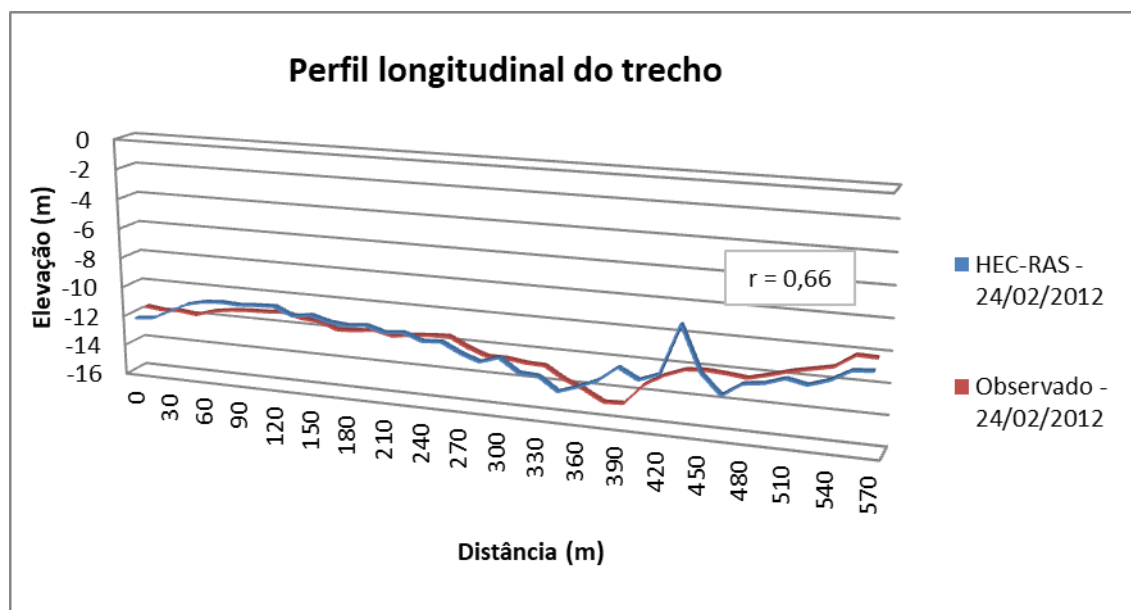
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 49 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 50 – Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Como discutido na metodologia, valores pequenos de correlação (r) compreendem a faixa entre 0,10 a 0,29; médios entre 0,30 a 0,49; e grandes a partir de 0,50 (COHEN, 1988). Entretanto há uma outra classificação que sugere que valores de $r = 0,10$ a $0,30$ são fracos; $0,40$ a $0,60$ moderados; e $0,70$ a 1 , fortes (HINKLE; WIERSMA; JURS, 2003). Para a presente pesquisa, foi adotado o critério de forte correlação que se verifica entre $r = 0,70$ a 1 .

Com as simulações foi possível perceber que, em quase todos os exemplos, o início da modelagem parecia atender às condições do trecho, apresentando fortes valores de correlação.

É importante mencionar que à medida que se prolongava o tempo de simulação, a correlação apresentava um declínio. Esse fato pode ser explicado pela quantidade de dados de entrada fornecida, principalmente no que tange à condição de contorno de sedimentos.

Os dados de vazão de sedimentos e granulometria não acompanharam todas as datas de batimetria, como apresentado anteriormente, o que pode ter interferido no

resultado, visto que o modelo é bem sensível a esses parâmetros (USACE, 2016b).

No entanto, mesmo com essa observação, os resultados obtidos em HEC-RAS identificaram a melhor configuração para simular o transporte de sedimentos na calha do rio Doce.

A tabela 14 resume os resultados obtidos de correlação nas diferentes simulações. Nota-se que equação de Engelund e Hansen (1967), de modo geral, apresentou as melhores correlações. Os elaboradores do programa HEC-RAS (USACE, 2016b) afirmam sobre sua utilização em rios com diferentes características físicas, obtendo-se bons resultados em diversos estudos. A equação de Ackers e White (1973) produziu as piores correlações, e não foi adequada para ser aplicada ao trecho do rio Doce nesse caso.

Tabela 19 – Resumo dos coeficientes de correlação para todas simulações.

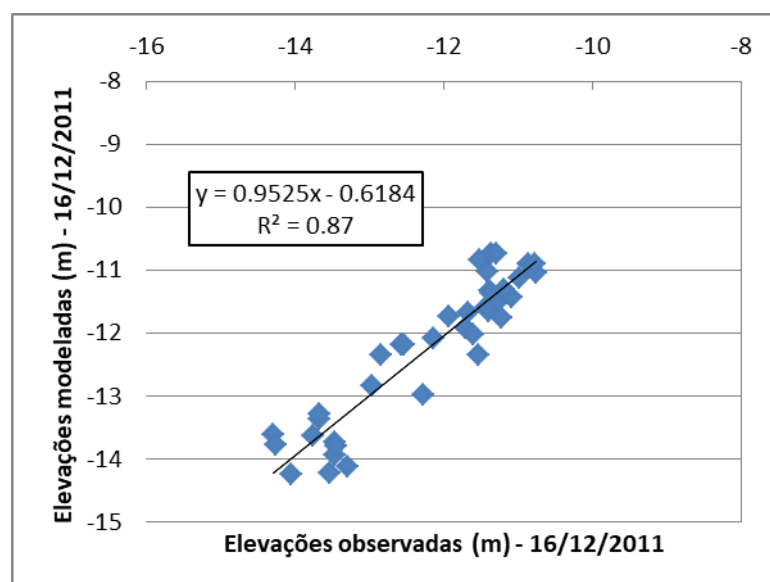
Equações de transporte	Coeficientes de Manning	Valores de correlação (r)			Atendeu ao critério
		16/12/2011	10/02/2012	24/02/2012	
Engelund e Hansen	0,055	0,93	0,90	0,64	NÃO
	0,0126	0,92	0,50	0,43	NÃO
	0,029	0,93	0,90	0,85	SIM
Ackers e White	0,055	0,10	0,07	0,11	NÃO
	0,0126	0,92	0,45	0,42	NÃO
	0,029	0,88	0,79	0,18	NÃO
Yang	0,055	0,88	0,39	0,09	NÃO
	0,0126	0,91	0,40	-0,23	NÃO
	0,029	0,92	0,85	0,66	NÃO

Fonte: Elaborado pela autora.

Utilizando o coeficiente de Manning de 0,029 para calha e 0,055 para as margens, foram obtidos os melhores resultados para todas as equações. Junto a ele, a equação de Engelund e Hansen (1967) produziu as correlações mais fortes, sendo então a configuração escolhida para a análise de transporte de sedimentos no trecho do rio Doce.

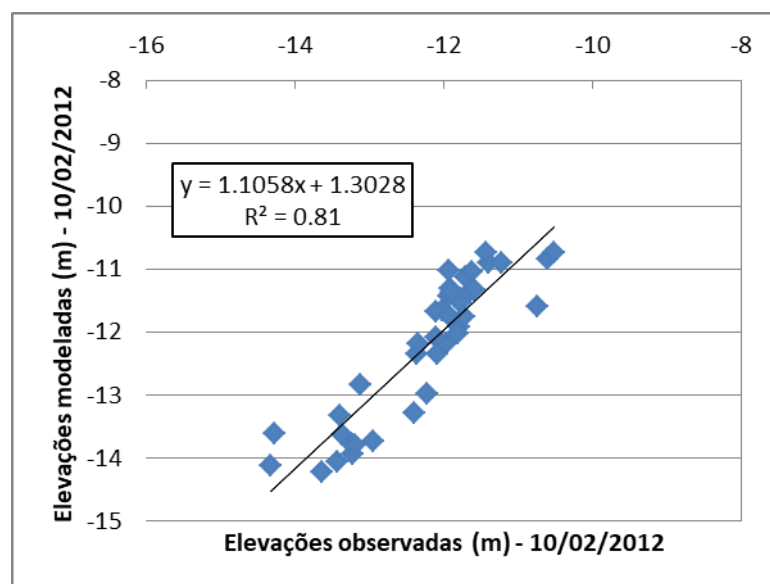
Foram ainda realizados os cálculos de coeficiente de determinação (R^2), sendo o valor ao quadrado do coeficiente de correlação, que demonstra, em porcentagem, o quanto o modelo explica os valores observados. Nas figuras 51, 52 e 53 é apresentado que a correlação é explicada em 87%, 81% e 73%, para 16/12/2011, 10/02/2012 e 24/02/2012, respectivamente, o que foi satisfatório. É preciso mencionar a redução da confiabilidade do modelo à medida que se propagaram os dias de simulação. Porém, ainda está dentro de um limite forte de correlação.

Figura 51 – Coeficiente de determinação das elevações das seções simuladas e observadas (16/12/2011) – Engelund e Hansen.



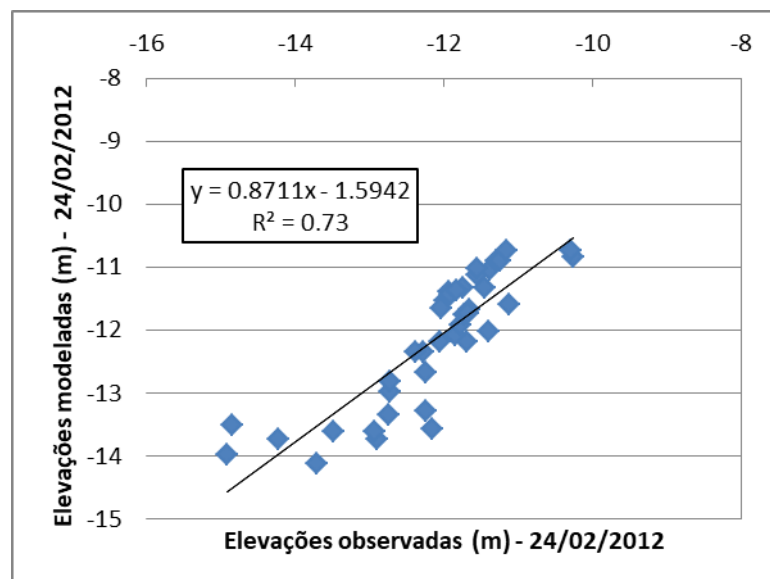
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 52 – Coeficiente de determinação das elevações das seções simuladas e observadas (10/02/2012) – Engelund e Hansen.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 53 – Coeficiente de determinação das elevações das seções simuladas e observadas (24/02/2012) – Engelund e Hansen.



Fonte: Elaborado pela autora.

A tabela 15 abaixo apresenta um resumo dos valores de r , R^2 e EQM para todos os períodos analisados.

Tabela 20 – Resumo das análises estatísticas das elevações observadas e simuladas com a equação de Engelund & Hansen.

Data	r	R²	EQM
16/12/2011	0,93	0,87	0,03
10/02/2012	0,90	0,80	0,04
24/02/2012	0,85	0,73	0,06

Fonte: Elaborado pela autora.

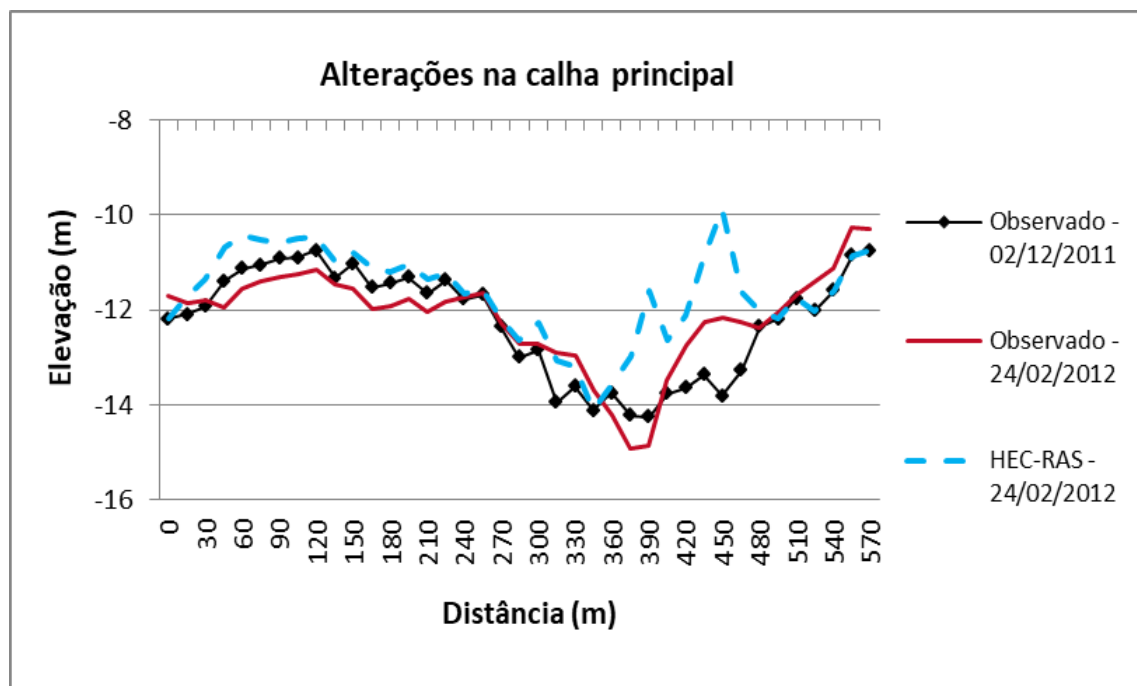
Após o ajuste do modelo, foram obtidos os valores gerados pelo plano de sedimentos, que simulou a análise de transporte de sedimentos no trecho entre 01/12/2011 a 24/02/2012.

5.5 ANÁLISE DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

A figura 54 apresenta a condição observada em campo do fundo do leito inicial (02/12/2011) e final (24/02/2012), comparando com o final da simulação em HEC-RAS (24/02/2012), utilizando a equação de transporte de Engelund e Hansen (1967), velocidade de queda de Rubey (1933) e Método de Classificação de Thomas (Ex5).

O programa permitiu simular de forma bem próxima da realidade para o período analisado, apenas estimando um pouco mais de sedimentação ao final do trecho, entre as seções 360 m a 480 m.

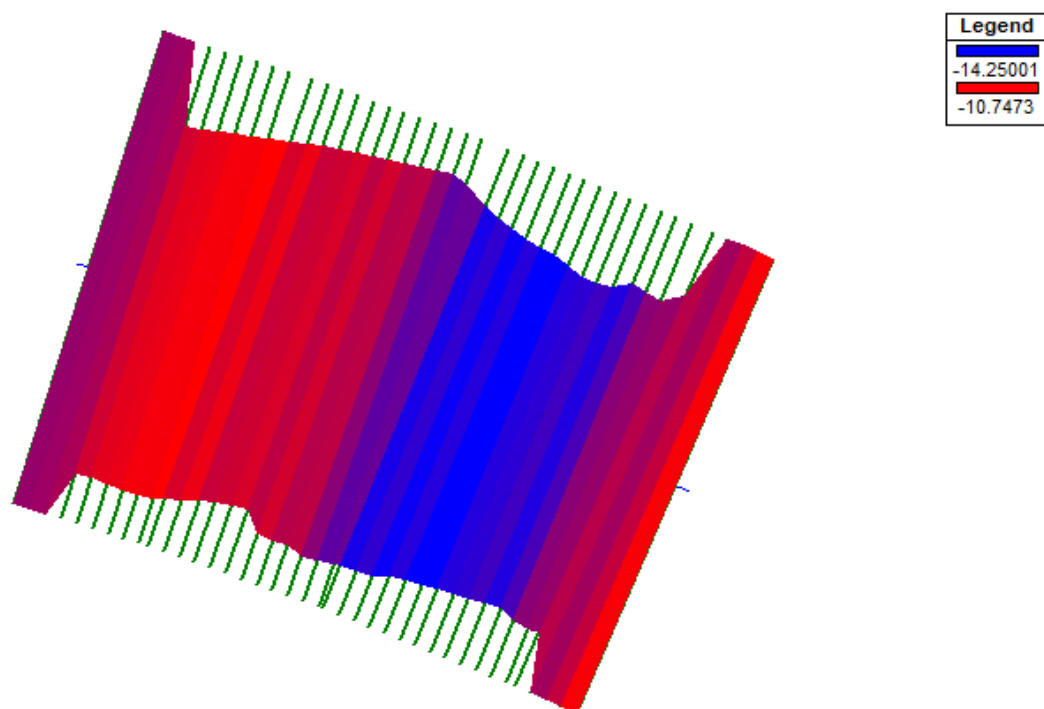
Figura 54 – Simulação das alterações no trecho da calha do rio Doce com HEC-RAS



Fonte: Elaborado pela autora.

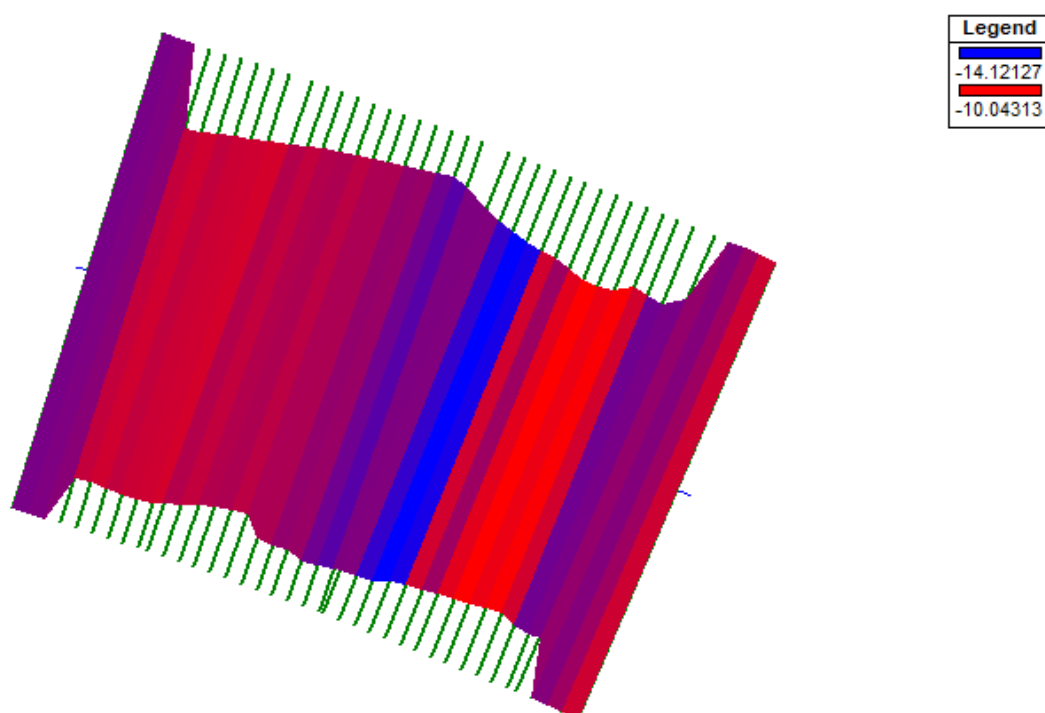
As figuras 55 e 56 mostram as alterações de elevação da calha do rio Doce, em metros, do início (02/12/2011) ao final da simulação (24/02/2012) em uma vista superior do trecho, indicando as alterações ocorridas de deposição em toda a sua extensão. Na legenda, a coloração azul indica a menor elevação, e a vermelha, a maior. Essa representação foi gerada pelo programa HEC-RAS.

Figura 55 – Vista superior do trecho indicando a elevação (m) no início da modelagem – (02/12/2011).



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 56 – Vista superior do trecho indicando a elevação (m) ao final da modelagem – (24/02/2012).



Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se então uma tendência ao assoreamento do leito, visto que na data inicial (02/12/2011) o perfil compreendia valores variando entre -14,25 m a -10,74 m; e ao final (24/02/2012), esse perfil foi alterado para -14,12 m a -10,04 m. Contando da máxima elevação, houve um acréscimo de 70 cm.

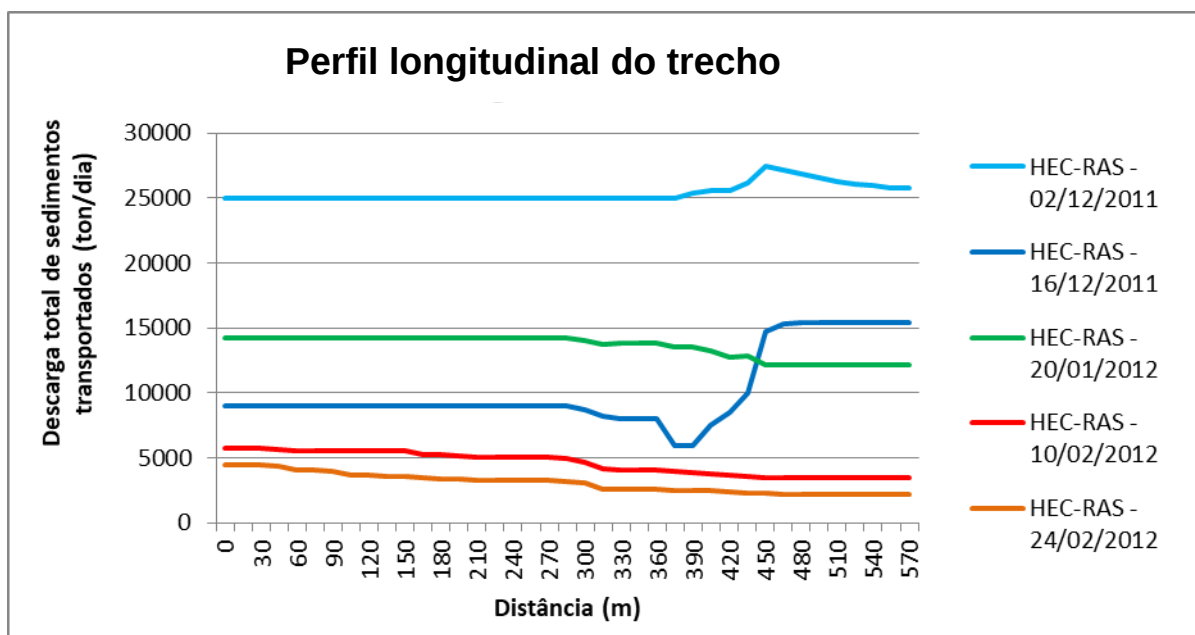
Em sequencia, são apresentados os seguintes resultados que foram simulados em HEC-RAS gerados no Plano de Sedimentos:

- *Sediment discharge* – Descarga de Sedimentos (ton/dia);
- *Mass Bed Change* – Alteração no leito em massa (ton), onde apresenta as condições de erosão e/ou sedimentação no leito.

Para sediment discharge, que é a vazão mássica/descarga total de sedimentos em toneladas ao dia, foram obtidos os valores representados no gráfico da figura 57. Nota-se que a descarga de sedimentos transportados para todos os períodos analisados atinge um valor maior em 02/12/2011, ocorrendo o decréscimo com o passar dos dias, exceto em janeiro, onde se observa novamente o aumento da vazão e consequente concentração de sedimentos.

É possível verificar que em 02/12/2011 houve uma descarga praticamente constante em torno de 25.000 toneladas/dia e, em fevereiro, os valores foram os menores registrados. Esse comportamento pode ser explicado em função da vazão, visto que há um ligeiro aumento em janeiro, com redução em fevereiro. Na figura 59 também nota-se uma maior deposição em janeiro (20/01/2012) e fevereiro (10/02/2012), o que corrobora com a discussão, visto que a vazão foi reduzindo, atenuando o transporte e ocasionando a deposição de sedimentos.

Figura 57 – Descarga total de sedimentos (ton/dia).



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 21 – Valores mínimos, máximos e médios de descarga total de sedimentos no trecho do rio Doce.

(ton/dia)	Período analisado				
	02/12/2011	16/12/2011	20/01/2012	10/02/2012	24/02/2012
Mínimo	24.935,60	5.920,72	12.119,78	3.476,09	2.226,28
Máximo	27.401,54	15.432,67	14.239,13	5.762,29	4.427,81
Média	25.357,59	10.166,55	13.563,09	4.581,02	3.071,42

Fonte: Elaborado pela autora.

Fagundes et al. (2017) encontrou valores entre 31 ton/dia a 7.800.000 ton/dia para cada trecho do rio Doce em cada minibacia utilizando o modelo MGB-SED. O software é utilizado para análise em planícies de inundação, onde permite troca de cargas em suspensão entre os rios e as planícies – que servem de deposição de sedimentos finos (BUARQUE, 2015).

Neste trabalho, para o presente trecho, os valores da descarga total de sedimentos variaram entre 3.071,42 ton/dia a 27.401,54 ton/dia na calha principal.

Segundo Christofolletti (1981), a carga em suspensão é bem maior que a carga

dissolvida em épocas chuvosas nos rios brasileiros. Os valores médios das cargas em suspensão nos rios brasileiros são pequenas, geralmente menores que 100 mg/L. O rio São Francisco apresenta 70 mg/L, e o conjunto da bacia Platina e o rio Doce apresentam valores mais elevados, próximos a 200 mg/L. Dessa forma, os resultados obtidos de concentração de sedimentos neste trabalho permaneceram dentro do esperado, chegando a máxima de 127,13 mg/L no período analisado (Tabela 17).

Tabela 22 – Valores mínimos, máximos e médios na seção de concentração de sedimentos (mg/L).

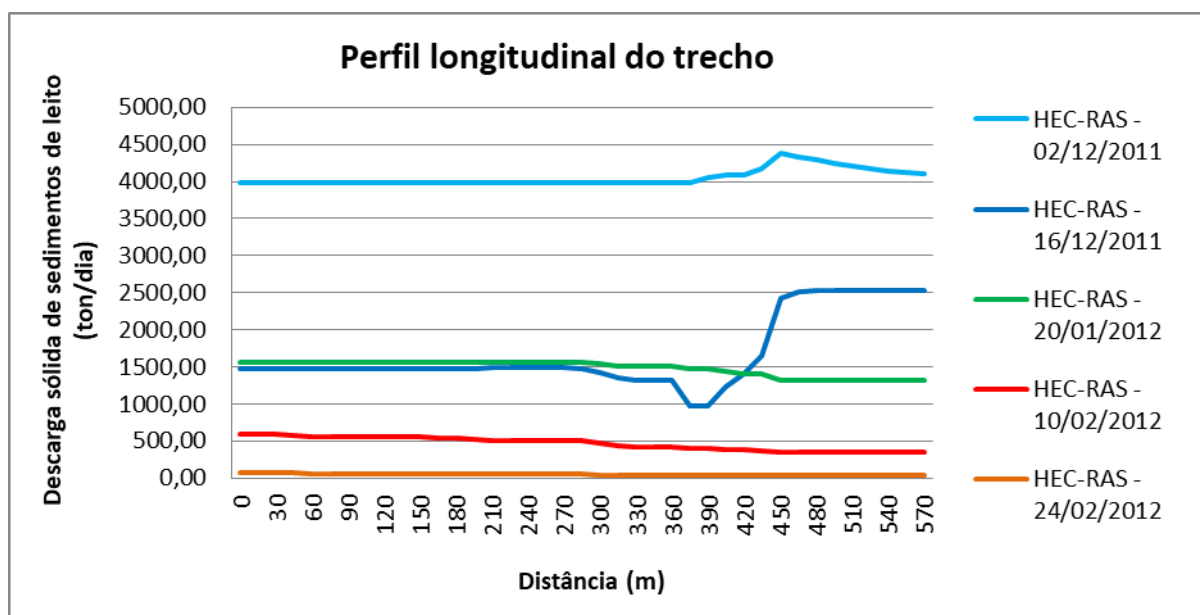
(mg/L)	Período analisado				
	02/12/2011	16/12/2011	20/01/2012	10/02/2012	24/02/2012
Mínimo	78,45	48,77	76,91	38,90	32,42
Máximo	86,21	127,13	90,36	64,49	64,49
Média	79,78	83,75	86,07	51,27	44,73

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos dados de vazão e concentração de sedimentos calculados em HEC-RAS, foi possível estimar a descarga sólida de sedimentos em suspensão em cada seção. Visto que o programa HEC-RAS fornece apenas a descarga sólida total, que é a soma da descarga sólida em suspensão e descarga sólida de material de leito, subtraiu-se uma da outra para tentar estimar a descarga sólida de material de leito em toneladas por dia, já que o programa não fornece esses dados separadamente (Figura 58).

O gráfico abaixo revela que, assim como o gráfico da descarga total de sedimentos, o início do período estudado (02/12/2011) apresentou um valor maior, alcançando a taxa de 4.377,93 toneladas/dia. Em 24/02/2012 temos as menores estimativas, chegando ao valor mínimo de 32,71 toneladas/dia.

Figura 58 – Estimativa da descarga sólida de material de leito do trecho do rio Doce (ton/dia).



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 23 – Estimativa da descarga de sedimentos de material de leito no trecho do rio Doce.

	Data	Valores mínimos (ton/dia)	Valores máximos (ton/dia)	Média na seção (ton/dia)
Presente estudo	02/12/2011	3.983,95	4.377,93	4.051,37
	16/12/2011	972,25	2.534,22	1.669,47
	20/01/2012	1.323,42	1.554,85	1.481,03
	10/02/2012	353,53	586,04	465,91
	24/02/2012	32,71	65,05	45,12

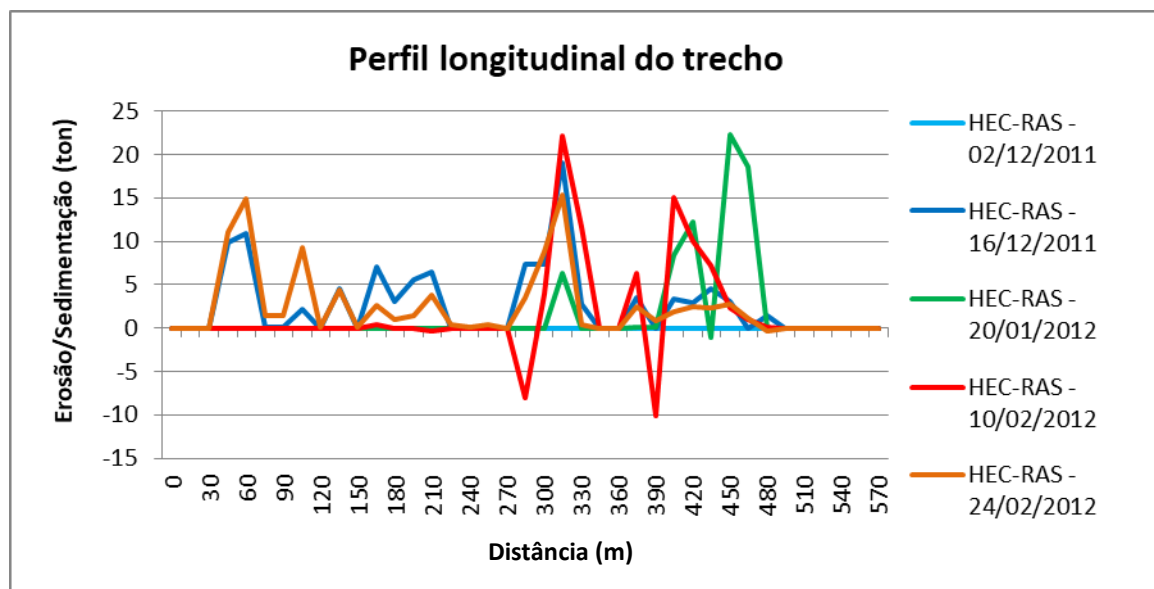
Fonte: Elaborado pela autora.

Para Mass Bed Change, que representa a alteração na elevação do leito, indicando condições de erosão/sedimentação em toneladas, o gráfico da figura 59 indica uma tendência maior à sedimentação em todos os períodos analisados.

Observa-se que, para a data 02/12/2011, o gráfico representou uma linha reta no ponto zero, ou seja, o modelo não considerou alterações no início da simulação. Para o dia 16/12/2011 já nota-se uma sedimentação máxima de 19 toneladas. Em janeiro, ocorre um aumento da vazão, e é possível notar que ocorre mais erosão no mês seguinte, em fevereiro (10/02/2012). Em fevereiro, a vazão começa a declinar, e em 24/02/2012 constata-se que a erosão diminui, e aumenta a sedimentação.

Observa-se que o leito do rio Doce é formado por dunas, e essa variação de deposição ao longo do trecho pode justificar essa formação.

Figura 59 – Balanço de erosão/sedimentação no trecho do rio Doce. Valores negativos indicam erosão, valores positivos indicam sedimentação.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 24 – Valores de erosão (negativos) e sedimentação (positivos) no trecho do rio Doce, em toneladas.

(ton)	Período analisado				
	02/12/2011	16/12/2011	20/01/2012	10/02/2012	24/02/2012
Erosão	0	0	-1,14	-10,07	-0,32
Sedimentação	0	19,00	22,24	22,15	15,29

Fonte: Elaborado pela autora.

Segundo Christofolletti (1981), com a redução do tamanho das partículas, ocorre uma diminuição da rugosidade e turbulência. Com isso, há um aumento dos processos de sedimentação, onde as partículas de menor granulometria se conservam em suspensão. Quando a turbulência atinge ao limite crítico, as partículas se depositam.

Em um leito aluvionar com alta deposição de sedimentos, como se caracteriza o rio

Doce descrito por Coutinho (2015), a topografia é alterada em resposta às mudanças do fluxo e fornecimento de sedimentos, ocasionando também variações na inclinação do leito do canal. Dessa forma, canais aluvionares são frequentemente indicados por padrões de erosão e deposição, com mudanças espaciais variáveis da morfologia (CURRAN; WATERS; CANNATELLI, 2015).

Os resultados nos trabalhos anteriores de Almeida (2012) e Brune (2014) alcançaram os seguintes valores de descarga de material de leito (Tabela 20):

Tabela 25 – Comparação entre métodos de estimativa de transporte.

	Data	Engelund & Hansen (1967) (ton/dia)	Yang (1973) (ton/dia)	Ackers & White (1973) (ton/dia)
Almeida (2012)	02/12/2011	778,13	32.803,57	20.782,34
	10/02/2012	471,53	13.005,52	8.288,00
Brune (2014)	02/12/2011	975,57	462,39	2.318,28
	10/02/2012	254,54	81,46	390,93

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 26 – Comparação de resultados entre trabalhos anteriores e o presente estudo.

Trabalhos	Datas	Equação de Engelund e Hansen (1967) - (ton/dia)
Almeida (2012)	02/12/2011	778,13
	10/02/2012	471,53
Brune (2014)	02/12/2011	975,57
	10/02/2012	254,54
Presente estudo	02/12/2011	3.983,95 a 4.377,93
	10/02/2012	353,53 a 586,04

Fonte: Adaptado de Almeida (2012) e Brune (2014).

Para Almeida (2012), a equação de Engelund e Hansen (1967) se adequou melhor à seção, comparado à Yang (1973), e Ackers e White (1973), que superestimaram os valores. Brune (2014) apresenta valores diferentes, com Yang (1973) resultando em estimativas menores. Em ambos os trabalhos foram utilizados valores diferentes de

coeficiente de Manning e declividade da linha d'água. Fagundes et al. (2017) também aplicou Yang ao rio Doce utilizando o modelo MGB-SED, que reproduziu bons resultados.

Neste estudo, a equação de Engelund e Hansen (1967) se adequou melhor, chegando a apresentar estimativas maiores em determinadas seções para descarga de sólidos de material de leito que os trabalhos de Almeida (2012) e Brune (2014) para o mesmo trecho estudado. Enquanto os métodos indiretos resultam em um único valor representativo da seção, o modelo apresenta valores distintos ao longo do trecho, com nível de detalhamento maior, sendo uma vantagem diante das alternativas existentes, principalmente quando se pensa na gestão de recursos hídricos e implantação de obras de engenharia.

De modo geral, o programa se mostrou eficaz para o ambiente escolhido e para o período analisado, sendo uma boa alternativa para estimar o transporte de sedimentos quando é necessário recorrer a um estudo detalhado das condições do leito ao longo do tempo diante das variações que ocorrem em função da vazão líquida, sólida e composição de grãos.

Entretanto, seriam necessários mais testes utilizando batimetrias atualizadas para realizar novas simulações e validação do modelo para avaliar possíveis alterações na geometria. Também é imprescindível que novos ensaios de granulometria sejam realizados no mesmo período, visto que o programa é bem sensível a esses parâmetros, o que afeta diretamente nos resultados de elevação.

Devido à importância da qualidade dos dados de entrada para modelagem de transporte de sedimentos, destaca-se também a necessidade de um monitoramento mais frequente desses sedimentos que chegam aos canais fluviais por parte das agências reguladoras.

Quanto às desvantagens do HEC-RAS, sabe-se que a modelagem não apresenta uma solução única, pois se trata de um modelo unidimensional, que é uma aproximação da realidade, e só pode ser aplicado em calhas com declividade menor que 10°. É preciso ter dados de entrada bem robustos referentes à vazão líquida, sólida, coeficiente de Manning e granulometria do leito, visto que o modelo é sensível a esses valores.

Outra questão a ser levantada são as opções de saída de resultados. O programa oferece uma série de opções, mas apenas apresenta os resultados de transporte total de sedimentos, não faz a separação entre transporte de material de leito e suspensão. Todavia, apresenta as alterações com relação à erosão e sedimentação no leito, em toneladas.

Com relação às equações disponíveis, o HEC-RAS oferece uma gama de possibilidades, junto com equações de velocidade de queda. A escolha do melhor método deve ser bem analisada para rios de grande porte, como o rio Doce, que apresenta profundidades maiores, já que somente a equação de Yang (1973) se adequa a esse requisito. Entretanto, ainda não apresentou um bom resultado para o local de estudo escolhido neste trabalho. São necessários testes a fim de encontrar o melhor ajuste de parâmetros, o que pode tornar a modelagem trabalhosa inicialmente.

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

A presente pesquisa teve como proposta simular o fluxo de sedimentos em um trecho de rio por meio de modelagem computacional, aplicando diferentes parâmetros, a fim de compreender os mecanismos de transporte e avaliar a funcionalidade do modelo. Foi escolhido um trecho do rio Doce, localizado em Colatina – ES, para ser empregada a metodologia devido à disponibilidade de dados.

Para isso, foi utilizado o software HEC-RAS, que atendeu ao objetivo proposto deste estudo, conseguindo reproduzir as alterações na calha próximo com os dados disponíveis e, assim, prever o transporte de sedimentos ao longo do tempo analisado.

Quanto aos parâmetros mais adequados para realizar a modelagem no trecho, foi encontrado o coeficiente de Manning para calha de 0,029, e margens de 0,055; equação de transporte de Engelund e Hansen; equação de velocidade de queda de Ruby e Método de Classificação de Exner 5. Pelas características da região, somente a equação de Yang seria a ideal, mas não gerou bons resultados, visto que o ajuste ocorreu pela função que melhor reproduziu as condições de elevação do leito na simulação, comparado ao observado em campo.

Com relação ao transporte de sedimentos em função da geometria, granulometria e vazões, os resultados revelaram um bom desempenho do modelo. A configuração escolhida permitiu reproduzir um perfil longitudinal do rio próximo ao observado, com alta correlação comparada à geometria observada. Com os dados disponíveis de granulometria e vazões líquidas e sólidas foi possível obter valores dentro do esperado para transporte de sedimentos.

Avaliando as tendências do leito ao longo do período analisado, observou-se uma prevalência da sedimentação em locais intercalados, o que poderia explicar a formação de bancos de areia na região.

Ao comparar os resultados do transporte de sedimentos de material de leito com trabalhos anteriores, o presente estudo corroborou mais com os resultados de Almeida (2012), que se adequou melhor com a equação de Engelund e Hansen.

Estudos anteriores obtiveram resultados dentro do intervalo de resultados atingidos nas seções do presente trabalho.

No entanto, são apresentadas algumas recomendações para futuras pesquisas:

- Quanto à modelagem no trecho do rio Doce, realizar novas batimetrias na região, a fim de avaliar a eficácia do modelo para trechos mais extensos;
- Complementando o primeiro item, o espaço de tempo entre as novas batimetrias deve ser maior, a fim de testar também a empregabilidade do modelo para períodos mais longos;
- Obter dados do rio Doce em outros meses para alcançar um levantamento completo do transporte de sedimentos em períodos secos e chuvosos;
- Coletar dados da granulometria do leito, descarga de sedimentos e também das propriedades físicas dos sedimentos – como fator forma e densidade, para conseguir um melhor ajuste na calibração do arquivo de sedimento;
- Por fim, testar o modelo em trechos de rios que sejam compatíveis com as características do rio Doce para averiguar se o modelo irá atender às expectativas, proporcionando bons resultados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERS, P.; WHITE, W.R. Sediment Transport: New Approach and Analysis. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 99, n.11, p. 2041-2060, 1973.

AGUIRRE, J. L. C. **Implementación del modelo matemático HEC-RAS para estudio de procesos de flujo en el proyecto hidroeléctrico Minas San Francisco**. 2013. 81f. Monografía (Graduação em Engenharia Civil) – Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Cuenca, Ecuador, 1995.

ALMEIDA, L. M. **Análise de metodologias para o cálculo da descarga de fundo, aplicada ao rio Doce, ES**. 2012. 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

ARAÚJO, J. C. Assoreamento em Reservatórios do Semi-árido: Modelagem e Validação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.8, n.2, p.39-56, 2003.

BILAL, A.; DAI, W.; LARSON, M.; BEEBO, Q.N.; XIE, Q. Qualitative simulation of bathymetric changes due to reservoir sedimentation: A Japanese case study. **PLoS ONE**, v. 12, n. 4, p. 1–18, 2017.

BORDAS, M. P.; SEMMELMAN, F. R. Elementos de engenharia de sedimentos. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia – Ciência e Aplicação**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 1993, p. 915-943.

BRANCO, N. **Avaliação da produção de sedimentos de eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica rural de encosta**. 1998, 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1998.

BRANDT, S.A., Classification of geomorphological effects downstream of dams. **Catena**, v. 40, n.4, p. 375–401, 2000.

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

2009.

BRUNE, R. A. **Métodos de estimativa de descarga sólida em rios – análise comparativa**. 2014. 147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2014.

BUARQUE, D. C. **Simulação da geração e do transporte de sedimentos em grandes bacias**: Estudo de caso do rio Madeira. 2015. 166f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

BULL, W. B. Threshold of critical power in streams. **Geological Society of American Bulletin**, v. 90, n. 5, p. 453-464, 1979.

CARVALHO, N. O. Erosão Crescente na Bacia do São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia**, Caderno de Recursos Hídricos, v. 13, n.2, p. 5-19, 1995.

_____. **Hidrossedimentologia Prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

CHACÓN, S. J. P.; PAZMIÑO, J. E. A. **Análisis de flujo gradualmente variado no permanente y transporte de sedimentos com el modelo HEC-RAS**. 2010. 272f. Monografia (Engenharia Civil) - Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Equador.

CHERO, W. L.; CASTELLET, E. B. Para Cálculos Bidimensionales Del Flujo De Agua En Ríos. Aplicación de la nueva herramienta HEC - RAS 5.0 para calculos bidimensionales del flujo de agua en ríos. In: Actas de las IV Jornadas de Ingeniería del Agua, 4, 2015, Córdoba. **Anais eletrônicos**...Disponível em: <<http://www.uco.es/jia2015/ponencias/a/a009.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2017.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Blucher, p. 313, 1981.

COELHO, A. L. N. **Alterações hidrogeomorfológicas no médio-baixo rio Doce/ES**. 2007. 227f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geografia da Universidade Federal Fluminense, Niterói.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. 2. ed. New York: Erlbaum, p. 567, 1988.

COIADO, E. M.; PAIVA, J.B.D. e SIMÕES, S.J. Monitoramento da Erosão e do Transporte de Sedimentos. In: PAIVA, J.B.D; PAIVA, E. M.C.D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001.

CONDE, R. A. N. G. **Análises de sensibilidade em modelação numérica de escoamentos em leito móvel com HEC-RAS. Aplicação ao rio Mondego**. 2007. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.

COPELAND, R. R; THOMAS, W. A. Corte Madera Creek Sedimentation Study: numerical Model Investigation. **US Army Engineer Waterways Experiment Station**, Vicksburg, MS. TR-HL-89-6, 1989.

COUTINHO, M.M. **Avaliação do desempenho da modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional na simulação de eventos de inundação em Colatina/ES**. 2015. 260 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CRISPIM, D. L; ISMAEL, L. L.; DE SOUZA, T. M. I.; GARRIDO, J. W. A.; DE QUEIROZ, M. M. F. Transporte e caracterização de sedimentos de fundo no rio Piranhas em uma seção de controle próximo à sede do município de Pompal – PB. **Revista Holos**. v.3, p.93-101, 2015.

CURRAN, J. C.; WATERS, K. A.; CANNATELLI, K. M. Real time measurements of sediment transport and bed morphology during channel altering flow and sediment transport events. **Geomorphology**, v. 244, p. 169–179, 2015.

DHI SOFTWARE. MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM: Sand Transport Module Short Description. Hørsholm/Denmark, 2007. Disponível em: <<http://www.mikebydhi.com/upload/dhisoftwarearchive/shortdescriptions/marine/SandTransportModuleST.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2016.

DOLVITSCH, J. N. **Simulação do transporte de sedimentos em rios e canais: estudo sobre softwares disponíveis**. 2013. 82f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

DUAN, J.G.; CHEN, L. Review of Sediment Transport Models. **Technical Report**, Desert Research Institute, Las Vegas, p. 71, 2003.

ELSAYED, S. M. **Comparative Study of diferente scenarios for morphological evolution in a river stream**. 2013. 309f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil para mitigação de riscos). Politecnico di Milano, Milão.

EMBRAPA – **Empresa brasileira de Pesquisa Agropecuária** – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: EMBRAPA, p. 412, 1999.

ENGELUND, F.; HANSEN, E. **A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams**. Teknisk Forlag, Technical Press: Copenhagen, Denmark, p. 1-64, 1967.

ESPINDOLA, H. S.; CAMPOS, R. B. F.; LAMOUNIER, K. C. C.; SILVA, R. S. Desastre da Samarco no Brasil: desafios para a conservação da biodiversidade. **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v.5, n.3, p. 72-100, jul.-dez, 2016.

FAGUNDES, H. O.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D. D.; BUARQUE, D. C. Simulação hidrossedimentológica preliminar na bacia do rio Doce com o modelo MGB-SED. In: II Congresso Internacional de Hidrossedimentologia, 2, 2017, Porto Alegre. **Anais eletrônicos**...Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/170619>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

FARIA, A. P. As conseqüências da erosão em microbacias sobre os canais efêmeros, intermitentes e perenes. **Cadernos de Geociências**, v.11, p. 67 – 83, 1994.

FARIA, A.P.; MARQUES, J.S. Evolução de canais de primeira ordem por diferentes processos erosivos. **Revista da Pós-Graduação em Geografia UFRJ**, v.2, p. 96-105, 1998.

GARCIA, D. R. G. **Análisis y evaluación del transporte de sedimentos em cuencas mediterrâneas**. Aplicación a la rambla del Albuñón, Cartagena. 2012. 210f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Unidad Departamental de Ingenieria Civil, Escuela de caminos, canales y puertos, Universidad Politécnica de Cartagena, Espanha.

GIBSON, S., SIMON, A., LANGENDOEN, E.J., BANKHEAD, N., SHELLEY, J. 2015.

A physically-based channel-modeling framework integrating HEC-RAS sediment transport capabilities and the USDA-ARS bank-stability and toe-erosion model (BSTEM). In: **Proc. 3rd Joint Federal Interagency Sedimentation and Hydrologic Modeling Conference**, April 19-23, 2015, Reno, NV. 12 pp.

HINKLE, D. E.; WIERSMA, W.; JURS, S. G. **Applied Statistics for the Behavioral Sciences**. 5. ed. Boston: Houghton Mifflin, p. 756, 2003.

LANE, E. W. The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. **American Society of Civil Engineers**, v. 81, n. 745, p. 21, 1955.

LAURSEN, E. M. Total Sediment Load of Streams. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 84, n. 1, p. 1-36, 1958.

LETTER, J. V.; TEETER, A. M.; DONNELL, B. P.; MCANALLY, W. H.; THOMAS, A. W.; ADAMAC, S. A. **User's Guide for SED2D Version 4.5**. New York/USA: US Army Engineer Research and Development Center, 2011. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.193.9491&rep=rep1&type=pdf>> . Acesso em: 23 maio 2016.

LEOPOLD, L.B., WOLMAN, M.G. & MILLER, J.P. **Fluvial processes in geomorphology**. Freedman: San Francisco, p. 544, 1995.

LANÇA, R.; MARTINS, M C.; MENDES, J. **Metodologia para o estudo hidráulico e sedimentológico em pontes**. Aplicação à Ribeira de Oeiras, entre as localidades de Corte de Pão e Água e de Morena, concelho de Mértola. Sapiencia, Repositório da Universidade do Algarve. Disponível em: <<http://sapiencia.ualg.pt/handle/10400.1/3427>>. Acesso em: 15 set. 2016.

LETTER, J. V.; TEETER, A. M.; DONNELL, B. P.; MCANALLY, W. H.; THOMAS, A. W.; ADAMAC, S.A. **User's Guide for SED2D Version 4.5**. New York/USA: US Army Engineer Research and Development Center, 2011. Disponível em: <<http://ddr.nal.usda.gov/bitstream/10113/43419/1/CAT86201017.pdf>>. Acesso em: 07 mar 2016.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. 152f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2002.

MARTINS, E. M. Coeficiente de correlação amostral. **Revista de Ciência Elementar**, v. 2, n. 202, p. 1–11, 2014.

MEYER-PETER, E.; MULLER, R. Formula for Bed-Load Transport. **International Association for Hydraulic Research**, Stockholm, 2nd Meeting, p. 39-65, 1948.

MIKE21-ST, release 2012: water modelling software. Hørsholm/Denmark: DHI Software, 2012. Programa computacional. Disponível em: <<http://www.dhisoftware.com/Download/MIKEByDHI2012.aspx>>. Acesso em: 22 maio 2016.

NISTORAN, D. G. et al. One Dimensional Sediment Transport Model to Assess Channel Changes along Oltenița-Călărași Reach of Danube River, Romania. **Energy Procedia**, v. 112, p. 67–74, 2017.

PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. In: PAIVA, J.B.D. **Métodos de cálculo do transporte de sedimento em rios**. Porto Alegre: ABRH, 2001, cap 12, p. 313-15.

PARANHOS FILHO, A.C.; FIORI, A.P.; DISPERATI, L.; LUCHESI, C.; CIALI, A.; LASTORIA, G. Avaliação multitemporal das perdas de solos na bacia do rio Taquarizinho-MS. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, n.52, p.49- 59, 2003.

PENDER, D.; PATIDAR, S.; HAYNES, H. Incorporating River Bed Level Changes Into Flood Risk Modelling. In: E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, 28 June – 3 July, 2015, The Hage, Netherlands. **Anais eletrônicos...**Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/280653325_INCORPORATING_RIVER_BED_LEVEL_CHANGES_INTO_FLOOD_RISK_MODELLING>. Acesso em: 20 fev. 2017.

PIRH. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio Doce**. CONSÓRCIO ECOPLAN - LUME. v. I, p. 472, 2010. Disponível em: <http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2014/10/PIRH_Doce_Volume_I.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2016.

RUBEY, W. W. Settling Velocities of Gravel, Sand, and Silt Particles. **American Journal of Science**, v. 25, n. 148, p. 325-338, 1933.

SANTOS, B. B.; ALVES SOBRINHO, T.; SOUZA, J. S.; CARVALHO, G. A.; POMPEU, R. M.; COUTO, C. B. Avaliação de métodos de estimativa de transporte de sedimentos em rios. In: **X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**, 2012, Foz do Iguaçu/PR.

SED2D WES, version 4.5: sediment transport software. [S.l.]: US Army Engineer Research and Development Center, 2009. Programa computacional. Disponível em: <<http://chl.erdc.usace.army.mil/sed2d>>. Acesso em: 22 mai. 2016.

SCAPIN, J.; PAIVA, J. B. D. **Caracterização do Transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano em Santa Maria – RS**. In: 7º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa – Silusba, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Évora, Portugal, 2005.

SCAPIN, J.; PAIVA, J. B. D.; BELING, F. A. Beling. Avaliação de Métodos de Cálculo do Transporte de Sedimentos em um Pequeno Rio Urbano. **RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.12, n.4, p.05-21, 2007.

SKIPWORTH, Julian. **An investigation and quantitative analysis of the impacts on stream flow and fluvial erosion associated with urbanisation of a small catchment**. 2010. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), University of Southern Queensland, Faculty of Engineering & Surveying, Australia.

SONG, S.; SCHMALZ, B.; FOHRER, N. Situation, quantification and comparison of in-channel and floodplain sediment processes in a lowland area – A case study of the Upper Stör catchment in northern Germany. **Ecological Indicators**, v.57, p.118-127, 2015.

SZUPIANY, R.; TRENTO, A.; ALVAREZ, A. M. Transporte de Sedimentos de Fondo en el Rio Salado (Santa Fe, Argentina). **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos** . v.10, n.1, p.79-88, 2005.

TIMBADIYA, P.V.; PATEL, P. L.; POREY, P. D. Calibration of HEC-RAS Model on Prediction of Flood for Lower Tapi River, India. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 3, p. 805-811, 2011.

TOFFALETI, F.B. (1968). Definitive Computations of Sand Discharge in Rivers. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 95, n.1, p. 225-248, 1969.

TUCCI, C.E.M. (org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**, 4 ed. Porto Alegre – RS: Editora da Universidade Federal Rio Grande do Sul, ABRH - v. 4, Porto Alegre – RS, 2007.

USACE – United States Army Corps of Engineers. **River Analysis System HEC-RAS: User's Manual**. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 2016a.

USACE – United States Army Corps of Engineers. **River Analysis System HEC-RAS: Hydraulic Reference Manual**. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 2016b.

WILCOCK, P. R.; CROWE, J. C. Surface-based Transport Model for Mixed-Size Sediment. **ASCE Journal of Hydraulic Engineering**, v.129, n. 2, p.120-128, 2003.

YANG, C.T. Incipient Motion and Sediment Transport. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 99, n. 10, p. 1679-1704, 1973.

_____. Unit Stream Power Equation for Gravel **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 110, n.12, p. 1783-1797,1984.