

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
MARCOS GUILHERME MOREIRA PINTO

**Aplicação de modelagem computacional unidimensional na
avaliação da evolução morfológica do Rio Paraíba do Sul**

São Paulo

2024

MARCOS GUILHERME MOREIRA PINTO

**Aplicação de modelagem computacional unidimensional na
avaliação da evolução morfológica do Rio Paraíba do Sul**

Versão Corrigida

(Versão original encontra-se no Serviço de Pós-Graduação da EPUSP)

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Ciências.

Área de Concentração: Engenharia
Hidráulica.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Melo
Bernardino

São Paulo

2024

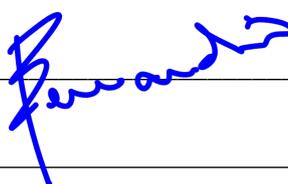
Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 18 de Março de 2024.

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Pinto', written over a horizontal line.

Catálogo-na-publicação

Pinto, Marcos Guilherme Moreira

Aplicação de modelagem computacional unidimensional na avaliação da evolução morfológica do Rio Paraíba do Sul / M. G. M. Pinto – versão corrigida -- São Paulo, 2024.

120 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental.

1.Hidráulica fluvial 2. Modelos computacionais 3.Transportes de sedimentos 4. Extração de areia em rios I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental II.t.

Nome: Marcos Guilherme Moreira Pinto

Título: Aplicação de modelagem computacional unidimensional na avaliação da evolução morfológica do Rio Paraíba do Sul.

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: 02/02/2024

Banca examinadora:

Prof. Dr.: José Carlos de Melo Bernardino

Instituição: USP (EP – PHA)

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.: Marcelo Giulian Marques

Instituição: UFRGS

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.: Jayme Pinto Ortiz

Instituição: USP (EP – PME)

Julgamento: Aprovado

AGRADECIMENTOS

À Escola Politécnica da USP que oferece estrutura de excelência, com docentes, funcionários e amigos marcantes na minha vida e no meu desenvolvimento acadêmico, profissional e pessoal.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Carlos de Melo Bernardino que sempre se mostrou uma referência na área, e me deu a oportunidade de realizar essa pesquisa, assim como de atuar na Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, onde tive uma valorosa experiência científica e profissional.

Aos professores doutores Rodolfo Martins, Luís César e Marcelo Marques, com quem tive contato na graduação, na FCTH e durante o mestrado, e que me incentivaram e ofereceram importantes contribuições para este trabalho.

Aos meus pais, namorada e irmão pelo apoio e cuidado durante essa jornada.

RESUMO

PINTO, M. G. M. **Aplicação de modelagem computacional unidimensional na avaliação da evolução morfológica do Rio Paraíba do Sul.** Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024

O Rio Paraíba do Sul é um curso d'água aluvial que, desde a década de 1950, vem sofrendo grande interferência antrópica devido ao seu potencial de exploração mineral e hídrica. O conhecimento da dinâmica de seu rio é de grande importância para o uso adequado de seus recursos com impactos de baixa magnitude para o meio ambiente e para as comunidades próximas. Alinhado a esse objetivo a modelagem computacional unidimensional com o programa HEC-RAS permite a reprodução satisfatória do transporte de sedimentos ao longo dos rios resolvendo as equações de conservação de energia e massa em um volume de controle desde que acompanhada de correta entrada de dados e calibração do modelo. Neste estudo de caso, o trecho paulista do Rio Paraíba do Sul foi submetido a uma simulação de 30 anos entre 1982 e 2012, levando em consideração a disponibilidade de dados fornecidos pelos órgãos estaduais e federais responsáveis. Numa extensão de mais de 200 km, quatro estações fluviométricas possuem informações fundamentais para o desenvolvimento e calibração do modelo, como séries diárias de vazão e nível de água, e dados anuais de concentração de sedimentos e batimetria de seções transversais. Com o modelo pronto para ser testado, elaboraram-se dois cenários de extração de areia em leito do rio, para avaliar os impactos desta atividade na manutenção da sua cota de fundo. Discutiram-se os resultados e foram feitas ponderações acerca das limitações inerentes à modelagem unidimensional, suas vantagens e as dificuldades envolvidas na aquisição dos dados da pesquisa.

Palavras-chave: Modelagem computacional; Calibração; Rio Paraíba do Sul, Extração de areia.

ABSTRACT

PINTO, M. G. M. Application of One-Dimensional Computational Modeling in the Assessment of the Morphological Evolution of the Paraíba do Sul River.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

The Paraíba do Sul River is an alluvial watercourse that, since the 1950s, has suffered great human interference due to its mineral and water exploration potential. The knowledge of its river dynamics is of great importance for the appropriate use of its resources with impacts of low magnitude for the environment and the nearby communities. In line with this objective, one-dimensional computational modeling with the HEC-RAS program allows satisfactory reproduction of sediment transport along rivers, by solving the energy and mass conservation equations in a control volume, as long as it is accompanied with correct data entry and model calibration. In this case study, the São Paulo reach of the Paraíba do Sul River was subject to a 30-year simulation between 1982 and 2012, taking into account the availability of data provided by the responsible state and federal agencies. Over a length of more than 200 km, four fluvimetric stations have fundamental information for the development and calibration of the model, such as daily series of flow and water level, and annual data of sediment concentration and cross sections bathymetry. With the model ready to be tested, two riverbed sand mining scenarios were developed in order to evaluate the impacts of this activity on maintaining its bed elevation. The results were discussed, and considerations were made regarding the limitations inherent to unidimensional modeling, its advantages and the difficulties involved in acquiring data for this research.

Keywords: Computational Modeling, Calibration, Paraíba do Sul River, Riverbed mining.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Balança de Lane representando o conceito de equilíbrio dinâmico. Fonte: adaptado de Chang (2008).....	25
Figura 2.2 - Elemento infinitesimal de fluido euleriano. Fonte: Martins (2017)	26
Figura 2.3 - Elementos do escoamento permanente.....	29
Figura 2.4 - Diagrama de forças em um volume de controle.....	31
Figura 2.5 - Diagrama de Shields. Fonte: Bernardino (2005).	37
Figura 2.6 - Esquema da variação do leito do rio em um volume de controle. Fonte: adaptado de Silva & Júnior (2005).....	38
Figura 2.7 - Perfil de Concentrações de Rouse. Fonte: adaptado de Brunner (2016).	44
Figura 2.8 - Método de cálculo da deposição em um volume de controle.	46
Figura 2.9 - Representação das camadas do leito no método de Thomas. Fonte: adaptado de Brunner (2016).....	47
Figura 2.10 - Tipos de formações de fundo.....	50
Figura 3.1 - Método de discretização do <i>Quasi-Unsteady</i> . Fonte: adaptado de Brunner (2016).	54
Figura 3.2 - Esquema do cálculo das variáveis do regime permanente gradualmente variado, no modelo HEC-RAS (<i>Step Method</i>).....	55
Figura 3.3 - Alteração no volume de controle após cálculo da erosão/deposição. Fonte: Brunner (2016).....	56
Figura 3.4 - Método do HEC-RAS para alteração da seção. Fonte: adaptado de Brunner (2016).	57
Figura 3.5 - Método alternativo para deposição na seção. Fonte: adaptado de Brunner (2016).	58
Figura 4.1 - Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte. Fonte: CEIVAP (2018).	59

Figura 4.2 – Seção esquemática das formações geológicas típicas do Rio Paraíba do Sul. Fonte: IPT (2015).....	61
Figura 4.3 – Trecho de estudo do Rio Paraíba do Sul e localização de pontos de medições. Fonte: adaptado de Google Earth (2020).....	63
Figura 4.4 – Intervalo de dados disponíveis de nível d'água e vazão líquida dos postos da região.	65
Figura 4.5 – Vazões específicas médias mensais dos postos.....	67
Figura 4.6 - Intervalo de dados disponíveis de concentração de sedimentos dos postos da região.	68
Figura 4.7 – Curva-Chave Sólida na região próxima à seção do posto de Cachoeira Paulista.	69
Figura 4.8 – Curva-Chave Sólida na região próxima à seção do posto de Guaratinguetá....	69
Figura 4.9 – Curva-Chave Sólida na região próxima à seção do posto de Pindamonhangaba.	70
Figura 4.10 – Curva-Chave Sólida na região próxima à seção do posto de Jacareí.	70
Figura 4.11 - Distribuição dos diâmetros característicos de sedimentos (d_{35} , d_{50} e d_{65}) ao longo do trecho (montante para jusante). Fonte: CTH (1981).....	71
Figura 4.12 - Curva granulométrica adotada para caracterização dos sedimentos do leito do rio.	72
Figura 4.13 - Intervalo de dados disponíveis de seções transversais dos postos da região.	72
Figura 4.14 - Exemplo de trecho de levantamento das seções transversais no Rio Paraíba do Sul entre as décadas de 1970 e 1980. Fonte: adaptado de IBGE (2019).....	73
Figura 4.15 - Exemplo de seção transversal levantada no Posto Guaratinguetá (S33) em 1982.	73
Figura 4.16 - Coeficientes de Manning das seções transversais. Fonte: CTH, 1983.....	74
Figura 5.1 - Trecho e seções transversais inseridos no editor de geometria do HEC-RAS. .	75
Figura 5.2 - Dados de entrada aplicados no trecho em estudo.	76

Figura 5.3 - Limites de erosão admitidos no trecho em estudo, com base em CTH (1981)..	77
Figura 5.4 - Comparação entre as séries de vazão líquida de Pindamonhangaba e gerada pelo modelo.....	81
Figura 5.5 - Comparação entre as séries de vazão líquida de Guaratinguetá e gerada pelo modelo.....	82
Figura 5.6 - Comparação entre as séries de vazão líquida de Cachoeira Paulista e gerada pelo modelo.....	82
Figura 5.7 - Nova entrada de dados de vazão sólida lateral que permite melhor resultado na calibração.	86
Figura 5.8 - Variação da cota do talvegue de 1982 a 2012.	86
Figura 5.9 - Variação observada das seções transversais do posto Cachoeira Paulista – S02.	87
Figura 5.10 – Variação calculada das seções transversais do posto Cachoeira Paulista – S02.	88
Figura 5.11 - Comparação entre as seções observadas e resultantes da simulação do HEC-RAS na fase de calibração (Posto de Cachoeira Paulista).....	89
Figura 5.12 - Convenção de sinais de variação de área de acordo com o fenômeno de transporte de sedimentos.	90
Figura 5.13 - Variação acumulada de área da S02 - Cachoeira Paulista.	90
Figura 5.14 - Localização dos postos objetos de comparação, Cachoeira Paulista (círculo preto) e Cruzeiro (círculo azul). Fonte: adaptado do hidroweb ANA.....	91
Figura 5.15 - Comparação de série de vazões líquidas entre o posto Cachoeira Paulista e posto vizinho.....	92
Figura 5.16 – Variação observada das seções transversais do posto Guaratinguetá – S33.	93
Figura 5.17 – Variação calculada das seções transversais do posto Guaratinguetá – S33. .	93
Figura 5.18 - Comparação entre as seções observadas e resultantes da simulação do HEC-RAS na fase de calibração (Posto de Guaratinguetá).	94

Figura 5.19 - Variação acumulada de área da S33 - Guaratinguetá.....	95
Figura 5.20 - Postos de Potim (círculo azul) e Guaratinguetá (círculo preto). Fonte: adaptado de hidroweb ANA.....	95
Figura 5.21 – Comparação de série de vazões líquidas entre o posto Guaratinguetá e posto vizinho.	96
Figura 5.22 - Variação observada das seções transversais do posto Pindamonhangaba – S73.	97
Figura 5.23 - Variação simulada das seções transversais do posto Pindamonhangaba – S73	97
Figura 5.24 - Comparação entre as seções observadas e resultantes da simulação do HEC-RAS na fase de calibração (Posto de Pindamonhangaba).....	98
Figura 5.25 - Variação acumulada de área da S73 - Pindamonhangaba.	99
Figura 6.1 - Exemplo de Trechos de influência de dragagem.	101
Figura 7.1 - Variação da cota de fundo das seções transversais (cenário referencial).	103
Figura 7.2 - Variação da cota de fundo do canal durante a simulação (cenário referencial).	104
Figura 7.3 - Variação da cota de fundo do canal durante a simulação (cenário referencial).	105
Figura 7.4 - Variação da cota de fundo das seções transversais (cenário modificado).	106
Figura 7.5 - Variação da cota de fundo do canal durante a simulação (cenário modificado).	107
Figura 7.6 - Variação da cota de fundo do canal no cenário modificado, detalhe para o trecho das três seções.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Especificação dos postos fluviométricos da RHN utilizados para o estudo.	63
Tabela 4.2 – Estatísticas de vazões líquidas e sólidas do posto de Jacareí.....	64
Tabela 4.3 - Estatísticas de vazões líquidas e sólidas do posto de Pindamonhangaba.	64
Tabela 4.4 - Estatísticas de vazões líquidas e sólidas do posto de Guaratinguetá.....	65
Tabela 4.5 - Estatísticas de vazões líquidas e sólidas do posto de Cachoeira Paulista.	65
Tabela 4.6 - Estatísticas das séries de vazões utilizadas no modelo.	66
Tabela 4.7 - Vazões específicas médias mensais dos postos.....	67
Tabela 5.1 - Estimativas de produção anual de areia de municípios do Vale do Paraíba (IPT, 2015).	78
Tabela 5.2 - Extrações anuais estimadas por cidade.....	79
Tabela 5.3 - Extrações de areia estimadas por ano, por seção.....	80
Tabela 5.4 - Valores de NRMSD para calibração do modelo.	83
Tabela 6.2 - Estimativa de extração de areia, por seção (cenário modificado).....	101
Tabela 7.1 - Variação da cota de fundo das seções transversais do rio (cenário referencial), durante o ano de 2014.....	103
Tabela 7.2 - Variação da cota de fundo das seções transversais (cenário modificado).....	106

LISTA DE SÍMBOLOS

g	Aceleração da gravidade
θ	Ângulo de inclinação de fundo
A	Área molhada da seção transversal
G_{SL}	Carga de lavagem
α	Coefficiente de Coriolis
C_d	Coefficiente de eficiência de deposição
C	Coefficiente de perda de energia por contração/expansão
W_x	Componente da força peso na direção do escoamento
C_L	Concentração de sedimentos na zona inferior
K	Condutividade hidráulica da seção
S_0	Declividade de fundo do canal
S_f	Declividade da linha de energia
d_i	Diâmetro da partícula
d_s	Diâmetro do sedimento
d_{16}	Diâmetro de sedimento tal que 16% do peso amostral possui diâmetro menor
d_{50}	Diâmetro de sedimento tal que 50% do peso amostral possui diâmetro menor
d_{84}	Diâmetro de sedimento tal que 84% do peso amostral possui diâmetro menor
d_m	Diâmetro médio do sedimento
L	Distância entre seções
\bar{y}	Distância vertical do centro de gravidade da seção transversal
z	Elevação do fundo do canal na seção
E	Energia específica
n_v	Expoente da temperatura do escoamento.
Z	Expoente que relaciona as características hidráulicas e do sedimento
F_f	Força de atrito atuante no fundo do canal
P	Força de pressão hidrostática
Δt	Intervalo de tempo
B	Largura do canal

ρ	Massa específica do fluido
ρ_s	Massa específica do sedimento
n	Número de Manning
M	Parâmetro de concentração de sedimentos
τ^*	Parâmetro de Shields
h_e	Perda de carga
\bar{P}	Perímetro médio das seções
γ	Peso específico da água
λ_b	Porosidade da camada ativa do leito
y	Profundidade na seção
y_e	Profundidade efetiva da partícula
R_h	Raio hidráulico
τ	Tensão de cisalhamento
G_{SBS}	Transporte em suspensão
G_{SBS}	Transporte em suspensão pela capa de fundo
G_{SBC}	Transporte pela capa de fundo
G_{ST}	Transporte sólido total
$Q_{mod,i}$	Valor calculado pelo modelo
$Q_{obs,i}$	Valor observado na realidade
\bar{Q}	Valor médio das observações
Δx	Varição da energia específica
Δx	Varição da posição na direção do escoamento
ΔV_x	Varição da velocidade média do escoamento
Q	Vazão líquida
q	Vazão líquida específica
Q_s	Vazão sólida
U	Velocidade média na seção
V	Velocidade média na seção
u^*	Velocidade de atrito do escoamento
ω	Velocidade de queda da partícula
ν	Viscosidade cinemática do fluido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Contextualização	17
1.2. Objetivos	19
1.3. Justificativa	19
1.4. Âmbito	21
1.5. Estrutura do texto	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1. Morfologia fluvial e transporte de sedimentos	23
2.2. Modelo hidrodinâmico unidimensional	25
2.3. Modelo de transporte de sedimentos	35
3. MÉTODO	51
3.1. Levantamento de dados	51
3.2. Programa HEC-RAS	52
3.3. Simulações e análises	58
4. ESTUDO DE CASO	59
4.1. Descrição do estudo de caso	59
4.2. Dados disponíveis	63
5. DESENVOLVIMENTO E CALIBRAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL DO RIO PARAÍBA DO SUL	75
5.1. Grade numérica e condições de contorno	75
5.2. Extrações de areia	77
5.3. Calibração do módulo hidrodinâmico	81
5.4. Calibração do módulo de transporte de sedimentos	83
6. SIMULAÇÃO DE EXTRAÇÃO DE AREIA	99

7.	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	102
7.1.	Cenário Referencial.....	102
7.2.	Cenário Modificado	105
8.	CONCLUSÕES	110
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Os cursos d'água considerados estáveis, que escoam sobre leitos aluvionares em bacias hidrográficas onde as ações antrópicas são pouco significativas, possuem um comportamento que pode ser classificado como condição de equilíbrio dinâmica, ou seja, ao longo dos períodos de cheia e estiagem podem passar por modificações na seção do escoamento e traçado, mas sem alterar de modo significativo suas características geométricas principais ao longo dos anos.

Este estado de equilíbrio dinâmico depende de uma série de características físicas da bacia hidrográfica, tais como: regime de chuvas, características geológicas, condições topográficas, cobertura vegetal, uso do solo, entre outras.

Além disso, pode-se afirmar que a condição de estabilidade de um curso d'água aluvionar é frágil, ou seja, pode ser facilmente rompida por uma série de fatores decorrentes de causas naturais excepcionais ou de ações antrópicas. Em geral, a presença do homem na bacia hidrográfica, e suas atividades diversas, provocam grandes alterações nas condições de equilíbrio natural dos cursos d'água. Por exemplo, a construção de barragens para captação de água ou geração de energia, modifica o regime de vazões líquidas e sólidas do rio, resultando em processos de assoreamento a montante do barramento e tendência de processos erosivos a jusante. Obras de fixação ou retificação do traçado do rio para proteção de ocupações ribeirinhas ou para fins de navegação, tendem a provocar modificações na energia do escoamento no trecho, podendo provocar erosões nos trechos onde as velocidades são acrescidas, com deposição de materiais mais a jusante, gerando zonas de assoreamento. Outro exemplo, é a extração de minerais do leito do rio, como areia, que além de provocar uma alteração na seção de escoamento no trecho, pode resultar numa redução do suprimento de material sólido a jusante e conseqüente tendência erosiva.

Os fenômenos de erosão e assoreamento dos rios, bem como a sua conseqüente alteração de traçado em planta, são comportamentos muitas vezes incompatíveis com algumas atividades humanas, especialmente nas regiões densamente ocupadas. Os

processos de erosão de margens, por exemplo, podem colocar em risco ocupações ribeirinhas ou obras de captação de água para abastecimento. Por outro lado, processos de assoreamento podem resultar em formação de bancos de areia que prejudiquem a navegação, ou ainda impossibilitar o funcionamento de tomadas d'água. Estes são apenas alguns exemplos dos problemas que a instabilidade dos cursos d'água pode trazer ao homem.

O estado de equilíbrio dos rios é extremamente complexo, pois envolve uma série de parâmetros físicos da bacia hidrográfica. As ações do homem provocam alterações no balanço destes parâmetros, resultando em processos de instabilidade que prejudicam a própria ocupação humana. Estes problemas, que são bastante comuns em todas as regiões densamente ocupadas, têm implicado novas ações de engenharia para tentar mitigá-los, o que leva a novas intervenções no rio e conseqüentemente no estabelecimento de novas condições de equilíbrio, muitas vezes não previstas. Em outras palavras, cria-se um ciclo vicioso de novas obras para corrigir os problemas de obras anteriores.

Portanto, fica claro que, é necessária a implementação de políticas de ocupação do solo e de utilização de recursos hídricos que, baseada em critérios técnicos, permitam a avaliação das condições de equilíbrio do curso d'água em seu estado natural, definam os usos prioritários da água na bacia hidrográfica e determinem critérios específicos para utilização destes recursos, de modo a mitigar os efeitos deletérios destas atividades sobre o meio ambiente e comunidades ribeirinhas.

O rio Paraíba do Sul é um curso d'água aluvionar que escoar sobre uma região densamente ocupada e que, desde a década de 50, vem sendo explorado e modificado de diversas formas, através de construção de reservatórios para geração de energia e regularização de vazões para captação de água, cortes de meandros para controle de inundações, atividades de extração mineral, lançamento de efluentes, entre outros.

Ao longo das décadas de 70 e 80 foram realizadas algumas campanhas batimétricas e hidrossedimentométricas no rio Paraíba do Sul, a fim de conhecer suas principais características e, desta forma, permitir a definição de ações mais adequadas para utilização do potencial hídrico e mineral da região. Entretanto, o crescimento urbano

descontrolado, associado a políticas públicas de uso dos recursos hídricos pouco embasadas em aspectos técnicos, não modificaram muito o quadro da região, que atualmente continua sofrendo com intensos processos erosivos ao longo da calha do rio (afetando estruturas como pontes) e causando prejuízos às comunidades ribeirinhas.

1.2. Objetivos

Como objetivo geral, a presente dissertação de mestrado busca apresentar um estudo sobre a caracterização da evolução morfológica de cursos d'água aluvionares, mostrando a importância da aplicação da modelagem computacional no desenvolvimento de ferramentas que permitam auxiliar a gestão do uso dos recursos hídricos.

Como objetivo específico deste trabalho destaca-se o desenvolvimento e calibração de um modelo computacional unidimensional do trecho Paulista do Rio Paraíba do Sul, de modo a permitir a análise das alterações morfológicas provocadas por intervenções antrópicas, como a extração de areia em seu leito.

1.3. Justificativa

O Rio Paraíba do Sul nasce na confluência dos rios Paraitinga e Paraibuna e em seu percurso passa por três estados do sudeste brasileiro: São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais.

O trecho paulista do Vale do Paraíba possui ocupação urbana bastante intensa, incluindo importantes municípios como São José dos Campos, Jacareí, Caçapava, Taubaté, Pindamonhangaba, entre outros.

De acordo com Barreti (2005), na década de 50, diversas alterações foram promovidas no rio Paraíba do Sul, com cortes de meandros e construção de diques que tinham a finalidade de aumentar a condutividade hidráulica e confinar o fluxo de cheias, respectivamente. Além disso, nas décadas de 50 e 70 foram planejadas e construídas barragens nos afluentes principais (Paraibuna e Paraitinga), bem como no próprio curso d'água (Santa Branca). Ainda na década de 60 foram intensificadas as atividades de extração de areia no próprio rio, uma vez que nesta época a

exploração deste minério era bem-vista pela administração pública, que a entendia como uma ação de combate aos problemas de assoreamento em alguns trechos do rio.

Com o desenvolvimento urbano da região e expansão das atividades industriais, o lançamento de efluentes e o aumento na produção de sólidos totais na bacia hidrográfica também passaram a se intensificar na região do Vale do Paraíba.

Todo este desenvolvimento e exploração dos recursos do rio Paraíba do Sul, levou a um quadro de alteração nas condições de equilíbrio morfológico do curso d'água, resultando em processos erosivos e de assoreamento em diversos trechos do rio. Sabe-se, por exemplo, que cortes de meandros aumentam a energia do escoamento, pois há um aumento da declividade do trecho, indicando uma tendência erosiva nos trechos a jusante destas intervenções.

Por outro lado, o aumento do aporte sólido proveniente da bacia hidrográfica em função da ocupação urbana tende a provocar assoreamentos em determinados trechos do rio.

Todos os fenômenos acima descritos, em maior ou menor intensidade foram percebidos no rio Paraíba do Sul, sendo identificados: erosões de margens, rebaixamento da calha com prejuízos a pontes rodoviárias, assoreamento de tomadas d'água, entre outros. Desta forma, entre as décadas de 70 e 80, o DAEE encomendou uma série de levantamentos de campo, incluindo seções batimétricas, medições de velocidade e transporte sólido, a fim de conhecer melhor as características deste curso d'água e, baseado nestes resultados, permitir a definição de critérios para mitigar os problemas e apontar soluções, inclusive com intervenções estruturais quando necessário.

Com os dados disponíveis dos levantamentos de campo, se espera agregar conhecimento sobre a dinâmica fluvial do Rio Paraíba do Sul e também tornar este material uma fonte de consulta relevante para futuras atividades que sejam praticadas no curso d'água e que sejam identificadas como impactantes em seu equilíbrio hidrodinâmico.

1.4. Âmbito

Este trabalho foi centrado na aplicação de um modelo hidrodinâmico unidimensional (HEC-RAS) em um estudo de caso do Rio Paraíba do Sul. Pode-se citar como aspectos que foram explorados mais intensamente no modelo: a variação do perfil longitudinal do curso d'água, o cômputo das massas de sedimentos transportados entre determinados pontos e a variação das seções transversais que compõem a grade numérica (ainda que avaliada somente na direção vertical devido à limitação modelo).

Essas informações foram as principais a serem consideradas na avaliação das alterações morfológicas do trecho em estudo, haja vista que os processos erosivos e depositantes provocados pelas intervenções humanas simuladas foram os maiores agentes dessas alterações. Isso permitiu inferir sobre os possíveis impactos que, por exemplo, uma atividade extrativista pode causar em um trecho navegável ou em um ponto de captação de água.

No entanto, a que se ressaltar o caráter preponderantemente qualitativo na análise da variação da morfologia do rio, pois os resultados forneceram apenas uma ordem de grandeza da variação de fundo, em decorrência das características do modelo, do grande número de variáveis envolvidas e da disponibilidade de dados.

Devido ao caráter unidimensional do modelo, a variação em planta do curso d'água não foi estudada, e as variáveis hidráulicas foram tratadas como valores médios nas seções transversais.

1.5. Estrutura do texto

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: esse capítulo reúne o conjunto de conhecimentos necessários ao embasamento teórico e compreensão da metodologia adotada nesse trabalho.

Capítulo 3 – Método: são apresentadas, neste capítulo, as principais etapas que foram desenvolvidas neste trabalho, o que inclui o levantamento de dados, a utilização das ferramentas do modelo computacional e as simulações realizadas.

Capítulo 4 – Estudo de caso: é apresentado neste capítulo a descrição do estudo de caso e os dados disponíveis para aplicação no modelo.

Capítulo 5 – Desenvolvimento e calibração do modelo computacional do Rio Paraíba do Sul: neste capítulo, descreve-se como foi realizada a estruturação do modelo e o desenvolvimento da sua calibração para o curso d'água estudado.

Capítulo 6 – Simulação de extração de areia: define-se nesse capítulo o cenário de extração de areia que foi simulado no modelo computacional.

Capítulo 7 – Análise de resultados: apresenta-se a análise dos resultados da simulação estabelecida no capítulo anterior.

Capítulo 8 – Conclusões: são feitas as conclusões do trabalho.

Capítulo 9 – Referências bibliográficas: reúne o conjunto de materiais consultados para elaboração do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Morfologia fluvial e transporte de sedimentos

O transporte de sedimentos, como areias e pedregulhos por meio do escoamento em canais naturais, tem sido objeto de estudo há décadas devido à sua importância na determinação da evolução morfológica de rios, bancos de areia, estuários, linhas costeiras. Conseqüentemente, o transporte de sedimentos exerce uma influência considerável na formação da topografia e estratificação da superfície terrestre e é de especial interesse para uma ampla gama de profissionais, incluindo geólogos, engenheiros hidráulicos, hidrólogos, geógrafos etc. (YANG, 2005).

A hidráulica fluvial é o ramo da hidráulica que estuda as relações entre as características que influem o comportamento dos cursos d'água naturais, tais como córregos, rios e estuários. Dentre essas características, se incluem: largura da seção transversal, profundidade do escoamento, perfil longitudinal, inclinação das margens, vazão líquida, vazão sólida, desenvolvimento planimétrico, entre outras.

Para o propósito de estudo da dinâmica fluvial, essas características podem ser divididas em dois grupos (CHANG, 1984): variáveis independentes (que são impostas ao rio devido às condições trazidas pela bacia) e variáveis dependentes (que são consequência do estado de equilíbrio alcançado). No primeiro, estão variáveis tais como precipitação e propriedades da bacia hidrográfica (capacidade de infiltração do solo, declividade e forma de ocupação). No segundo grupo, estão todas aquelas cuja manifestação é afetada pela ação conjunta das variáveis dependentes, como descarga líquida, descarga sólida, dimensões da seção transversal do rio, sua declividade e seu traçado em planta.

Esse conjunto de variáveis é responsável por influenciar a dinâmica fluvial, determinando a intensidade de processos que modificam a geometria e energia disponível do curso d'água, além de alterarem a sua própria capacidade de transformação. Por mudar a topografia do curso d'água, esses fenômenos são de extrema importância econômica, na medida em que seu estudo é importante para prever perigos potenciais ao projeto de engenharia, tais como o risco de escavação e

recalque da base de pilares de pontes, o tempo de assoreamento de um reservatório, mudanças no traçado de um canal de navegação etc. (YANG, 2005).

Nos cursos d'água com leito aluvionar (material solto que pode ser transportado pelo rio) esse comportamento é conhecido como equilíbrio dinâmico. De acordo com Bernardino (2005), é a condição das características geométricas do curso d'água em que as vazões sólida e líquida ocorrem com a mínima energia. Dessa forma, pode-se dizer que um trecho meandrado de um rio com pouca interferência antrópica e que está constantemente mudando sua disposição planimétrica já está em equilíbrio dinâmico, e não em busca de um equilíbrio.

Os processos que causam as referidas modificações fluviais envolvem o transporte de materiais sólidos (sedimentos) que se originam de diversos pontos da bacia ou que são movimentados de um ponto a outro do curso d'água. São conhecidos como:

- Assoreamento (ou deposição): acréscimo de sedimentos, o que resulta em leito com maior elevação;
- Erosão: retirada de sedimentos, o que resulta em leito com menor elevação.

A conexão entre as variáveis que provocam esses processos em direção a um estado de equilíbrio dinâmico é conhecida segundo a relação proposta por Lane (CHANG, 2008), e ilustrada na Figura 2.1.

$$Q_s d_m \propto QS \quad (2.1)$$

Onde:

- Q_s : descarga de material sólido;
- d_m : diâmetro médio do sedimento;
- Q : vazão líquida;
- S : declividade do canal.

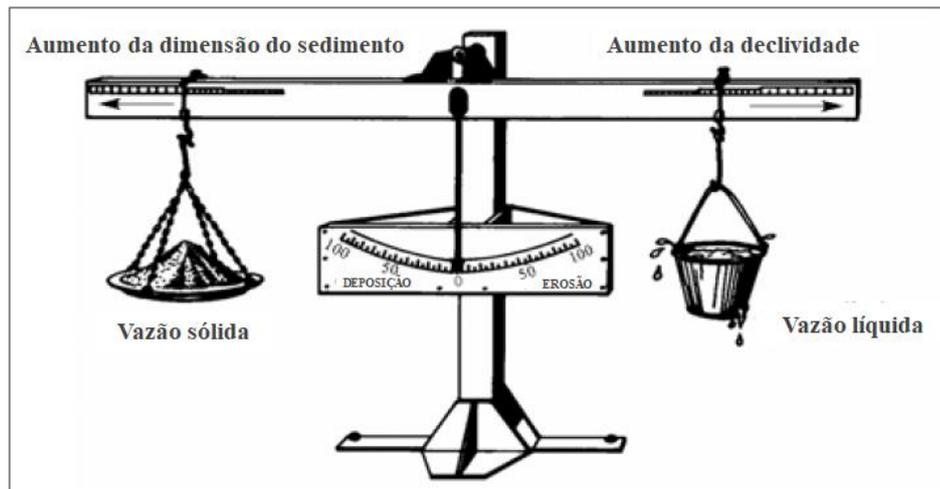


Figura 2.1 - Balança de Lane representando o conceito de equilíbrio dinâmico. Fonte: adaptado de Chang (2008).

Segundo Krishnappan (1985), as equações governantes do regime não-permanente em canais com fundo móveis envolvem, principalmente, a declividade da linha de energia e a capacidade de transporte de sedimentos do escoamento. Dessa forma, determinar essas grandezas através de relações com os parâmetros do escoamento e com as características dos sedimentos, respectivamente, é fundamental para que essas equações possam ser resolvidas. Diversos modelos, tais como as equações de Manning, Chezy e Engelund-Hansen para o cálculo do gradiente de energia, e as equações de Meyer-Peter & Muller, Einstein, Van Rijn e Toffalletti para estimativa do transporte de sedimentos, embora amplamente usadas, são restritas a algumas condições do escoamento, motivando que novos modelos sejam desenvolvidos para descrever a dinâmica de canais em fundo móvel.

2.2. Modelo hidrodinâmico unidimensional

2.2.1. Equações de Saint-Venant

De maneira geral, o movimento de fluidos ideais pode ser descrito pela segunda lei de Newton, que foi posteriormente reescrita por Euler (Figura 2.2), na forma de equação diferencial parcial e aplicando-se o teorema da divergência (BISTAFA, 2017):

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p \quad (2.2)$$

Onde:

\vec{u} : vetor velocidade

t : tempo

\vec{g} : vetor aceleração da gravidade

p : pressão

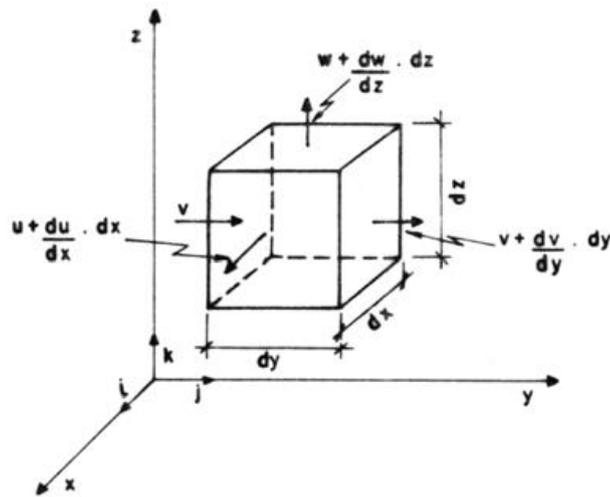


Figura 2.2 - Elemento infinitesimal de fluido euleriano. Fonte: Martins (2017)

Contudo, de acordo com Bistafa (2017), percebia-se à época a necessidade de considerar as forças de atrito entre as partículas dos fluidos reais, de modo que isso só foi possível com a equação de Navier-Stokes, que incluiu os efeitos viscosos na equação de Euler, obtendo-se:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u} \quad (2.3)$$

Onde ν é viscosidade cinemática do fluido, e:

$$\nabla F = \left(\frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial F}{\partial y}, \frac{\partial F}{\partial z} \right) \quad (2.4)$$

Considere-se ainda a hipótese de incompressibilidade do fluido, o que permite definir um caso particular da equação da continuidade:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2.5)$$

Posteriormente, as equações de Navier-Stokes foram reescritas considerando-se o movimento do fluido em uma direção preponderante, como é o caso, por exemplo, de inundações em áreas urbanas e rurais (HORVÁTH et al, 2014). Esse modelo matemático foi proposto por Saint-Venant e é frequentemente utilizado em estudos teóricos e práticos de escoamento em regime não permanente em canais, sendo condicionado às seguintes hipóteses (KRYLOVA et al, 2017):

- O fluido é unidimensional e incompressível;
- O comprimento do curso d'água é muito maior do que sua profundidade e largura;
- A curvatura do talvegue é pequena, de modo que forças centrífugas possam ser desprezadas;
- A declividade do canal é baixa o suficiente para que o seno seja aproximado pela tangente do ângulo de inclinação;
- A distribuição de pressões no canal é hidrostática, ou seja, não é considerada aceleração vertical do escoamento;
- As perdas de energia por atrito podem ser calculadas como aquelas em regime permanente uniforme;
- As fronteiras do canal são fixas, ou seja, não ocorrem processos erosivos ou de deposição de sedimentos.

De acordo com Saleh et al (2012), diversos trabalhos apresentam o completo desenvolvimento das equações de Saint Venant – “Chow, 1959; Cunge et al., 1980; Graff and Altinakar, 1996; Strelkoff, 1970. – sendo próprias para simular a ocorrência de efeitos de remanso a jusante ou propagação de ondas a montante, e mesmo quando da presença de um número significativo de rios tributários. As equações de Saint-Venant (ou de águas rasas), podem ser escritas da seguinte forma (PORTO, 2006):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2.6)$$

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.7)$$

Onde:

Q : vazão;

x : direção do escoamento;

y : profundidade do escoamento;

u : velocidade na direção do escoamento;

A : área molhada da seção transversal;

S_f : declividade da linha de energia;

S_0 : declividade do canal.

A primeira equação corresponde à equação da conservação de massa, enquanto a segunda, à conservação da quantidade de movimento.

2.2.2. Equação da conservação de energia no regime permanente

No regime permanente, a variável temporal é desconsiderada, já que as propriedades do fluido em um ponto qualquer se mantêm constantes, embora possam variar espacialmente. Dessa forma, anulando-se o último termo da Eq. (2.7), tem-se:

$$S_f - S_0 = -\frac{\partial y}{\partial x} - \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.8)$$

Esta equação governa o escoamento permanente e sua integração em x leva à equação de Bernoulli:

$$H = z + y + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (2.9)$$

Onde:

- H : Carga hidráulica, ou seja, a energia total do escoamento, que é geometricamente representada pela linha L.E., como indica a Figura 2.3.
- z : Elevação do fundo do canal;
- α : Coeficiente de Coriolis;
- V : Velocidade média.

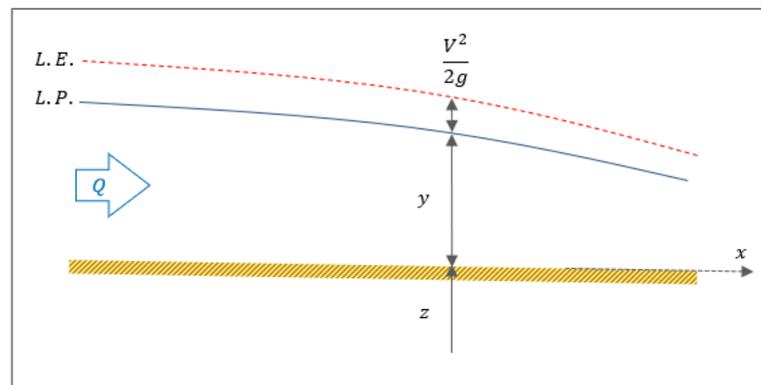


Figura 2.3 - Elementos do escoamento permanente.

Considerando a equação (2.9), a conservação de energia no regime permanente, entre duas seções, é escrita como:

$$H_1 = H_2 + \Delta H \quad (2.10)$$

Onde:

- Os índices 1 e 2 se referem a seções, respectivamente, de montante e jusante;
- ΔH : Perda de carga.

De maneira genérica, a perda de carga pode ser determinada conhecendo-se a declividade da linha de energia, uma vez que:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = S_f \quad (2.11)$$

Entretanto, recorre-se a equações de resistência ao escoamento (Darcy-Weisbach, Chèzy ou Manning) para a estimativa do gradiente de energia, que por sua vez determina a dissipação de energia por atrito no fluido.

2.2.3. Equação da conservação do momento linear no regime permanente

No caso de variações abruptas da linha d'água, decorrentes de quedas bruscas ou ocorrência de ressalto hidráulico (regime permanente rapidamente variado), por exemplo, a equação de conservação de energia não é mais válida para determinação do remanso do escoamento, devendo-se valer do princípio da conservação do momento linear para tanto.

A equação do momento linear deriva da segunda lei de Newton, observando-se o diagrama de forças presentes na direção do escoamento, no volume de controle da Figura 2.4:

$$P_1 + W_x - (P_2 + F_f) = Q\rho\Delta V_x \quad (2.12)$$

Onde:

P: força de pressão hidrostática

W_x : componente da força peso na direção do escoamento;

F_f : força de atrito atuante no fundo do canal;

ρ : massa específica do fluido;

ΔV_x : variação da velocidade média.

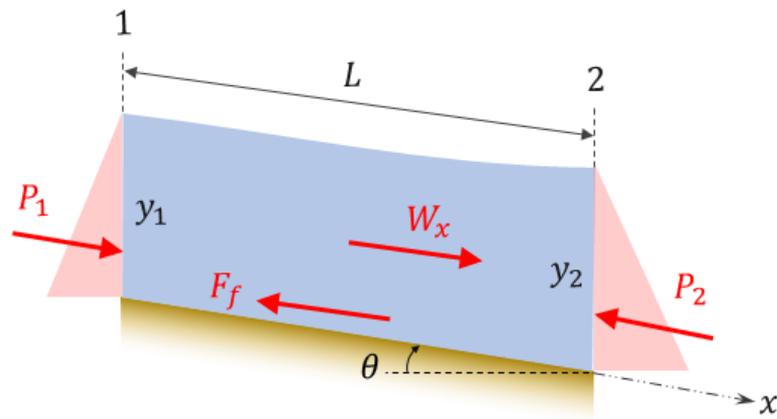


Figura 2.4 - Diagrama de forças em um volume de controle.

A força de pressão hidrostática é escrita como:

$$P = \gamma \bar{y} A \cos \theta \quad (2.13)$$

Onde:

γ : peso específico da água;

\bar{y} : centro de gravidade da seção;

A : área molhada da seção;

θ : inclinação de fundo.

A componente da força peso é calculada como:

$$W_x = \frac{(A_1 + A_2)}{2} \gamma L \sin \theta \quad (2.14)$$

Onde L é a distância entre as seções transversais.

A força de atrito é obtida por:

$$F_f = \tau \bar{P} L \quad (2.15)$$

Onde:

τ : tensão de cisalhamento;

\bar{P} : perímetro médio das seções.

Sendo τ calculado por:

$$\tau = \gamma \bar{R}_h \bar{S}_f \quad (2.16)$$

Onde: \bar{R}_h é o raio hidráulico médio entre as seções.

Por fim, o lado direito da equação (2.12) fica:

$$Q\rho\Delta V_x = \frac{Q\gamma}{g} (\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) \quad (2.17)$$

Onde: β é o coeficiente de correção do momento linear, que leva em consideração se o perfil de velocidades é diferente do uniforme.

Então, a equação do momento linear se torna:

$$\frac{Q_1^2 \beta_1}{g A_1} + A_1 \bar{y}_1 + \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) L (S_0 - \bar{S}_f) = \frac{Q_2^2 \beta_2}{g A_2} + A_2 \bar{y}_2 \quad (2.18)$$

Onde S_0 é a declividade de fundo do canal, adotada com a seguinte simplificação para canais de baixa declividade:

$$S_0 = \tan \theta \approx \text{sen } \theta \quad (2.19)$$

2.2.4. Modelo numérico

No regime permanente gradualmente variado, as variações das propriedades do fluido, de seção para seção, são lentas e graduais, devendo-se determinar a linha

d'água através da resolução conjunta das equações da conservação de energia e de perda de carga.

A equação de Bernoulli também pode ser escrita em termos da energia específica:

$$E = y + \frac{V^2}{2g} \quad (2.20)$$

$$H = z + E \quad (2.21)$$

Derivando-se a Eq. (2.21) na direção do escoamento (x), obtém-se:

$$\frac{dE}{dx} = S_0 - S_f \quad (2.22)$$

Esta é a equação diferencial do escoamento gradualmente variado, que não admite solução explícita, mas dispõe de solução numérica por meio de métodos iterativos em que se obtém resultados passo a passo, conhecidos como *Step Method*. Reescrevendo a Eq. (2.22) em termos discretos, tem-se:

$$\Delta x = \frac{\Delta E}{S_0 - S_f} \quad (2.23)$$

O *Direct Step Method* é possivelmente o método mais simples e adequado para uso em canais prismáticos (ZAGHLOUL, 1992), em que se parte de uma seção de controle (onde há uma lâmina d'água definida) e se arbitra a próxima profundidade para o cálculo da linha d'água. Assim, a diferença de energia específica entre duas seções é calculada segundo a Eq. (2.20) e o gradiente de energia pode ser estimado utilizando-se uma fórmula de resistência ao escoamento, como a fórmula de Manning, ainda que ela seja derivada do regime permanente uniforme.

Com isso, é possível estimar o deslocamento Δx e repetir o processo até a extensão de interesse do canal. Nota-se que o resultado de Δx será positivo ou negativo, dependendo da estimativa da lâmina d'água da seção seguinte. No regime subcrítico, a marcha de cálculo deve ser feita de jusante para montante, pois a seção de controle está a jusante, e assim $\Delta x < 0$. No regime supercrítico, a seção de controle está

definida a montante e, portanto, o procedimento de cálculo ocorre na direção de montante para jusante, com $\Delta x > 0$.

Ao se arbitrar o valor da profundidade, pode-se estabelecer um passo de cálculo Δy tão menor quanto for a precisão requerida para a melhor descrição da curva de remanso em questão.

O sucesso do *Step Method* depende da satisfação da equação da conservação de energia (2.10) e, por isso, resta a determinação da perda de carga entre duas seções que está interligada com as iterações feitas. Em canais naturais ou artificiais em regime gradualmente variado, a perda de carga pode ser descomposta em perdas por atrito e perdas por contração ou expansão do fluido, quando da alteração da seção transversal:

$$\Delta H = LS_f + C \frac{|\alpha_1 V_1^2 - \alpha_2 V_2^2|}{2g} \quad (2.24)$$

Onde:

L : distância entre as seções;

S_f : declividade da linha de energia;

C : coeficiente de perda de energia por contração/expansão.

A declividade da linha de energia (S_f) é obtida com o uso da equação de Manning, escrita em termos da condutividade hidráulica da seção (K):

$$S_f = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 \quad (2.25)$$

$$K = \frac{AR_h^{2/3}}{n} \quad (2.26)$$

Onde:

Q : Vazão;

K : Condutividade hidráulica;

A : Área molhada;

R_h : Raio hidráulico;

n : Número de Manning.

2.3. Modelo de transporte de sedimentos

2.3.1. Incipiência do transporte sólido

A determinação da possibilidade de início do movimento de partículas sólidas em leitos aluvionares é de extrema importância para definir a estabilidade do canal, ainda que ele tenha fronteira móvel. Essa abordagem considera que existe uma velocidade média do escoamento que gera um estágio crítico, acima do qual se inicia o movimento de fundo.

No entanto, essa noção de que existe um momento específico no qual os sedimentos começam a ser arrastados pela massa d'água é ponto de discussão entre pesquisadores, como explica Bernardino (2005): "Vale ressaltar que alguns autores, como H. A. Einstein, por exemplo, são da opinião de que não existe uma condição crítica para início de movimento. Em seus trabalhos, Einstein não utiliza este conceito para analisar o transporte sólido de fundo."

Além disso, o estudo da incipiência do movimento sólido está atrelado à necessidade de experimentação, através da observação visual em laboratório, e, portanto, sujeita à subjetividade do pesquisador em definir o momento exato em que ela ocorre e à disparidade de condições físicas entre o experimento controlado e a realidade de cada curso d'água na natureza.

Mesmo assim, os métodos de determinação da condição crítica de movimento de sedimentos têm aplicação prática até os dias atuais em projetos de canais e estabilidade de margens, tendo assim grande importância para a hidráulica fluvial.

O *Método de Shields* adota a tensão de arraste de fundo como o parâmetro de referência para o surgimento de um estágio crítico de movimento. A partir disso, o autor adota um adimensional de tensão para definir o critério de início de movimento:

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho)gd_s} \quad (2.27)$$

Onde:

- τ_0 : tensão de arrasto junto ao fundo;
- τ_* : parâmetro de Shields;
- ρ_s : massa específica do sedimento;
- d_s : diâmetro do grão.

O critério proposto consiste na comparação entre o valor de τ_* e um valor crítico, τ_{*c} , que depende do número de Reynolds do grão:

$$Re_* = \frac{u_* d_s}{\nu} \quad (2.28)$$

Onde:

- u_* : velocidade de atrito do escoamento;
- ν : viscosidade cinemática do fluido;

O diagrama da Figura 2.5 apresenta a relação entre τ_{*c} e Re_* , chamada de “Curva de Shields”, que representa uma situação em que o início de movimento é incerto. Se o valor calculado de τ_* estiver abaixo da curva, não há movimento de partículas sólidas de fundo, mas, no caso contrário, há o transporte de fundo.

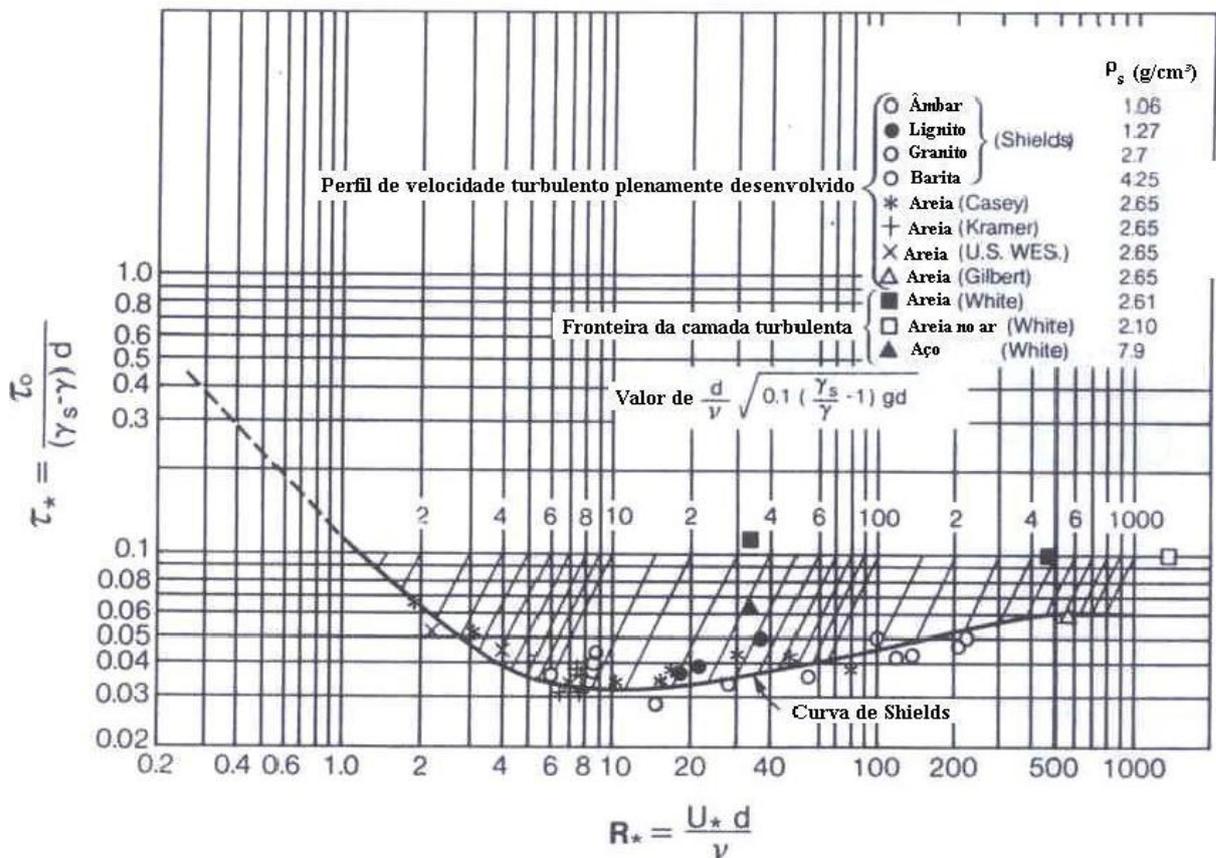


Figura 2.5 - Diagrama de Shields. Fonte: Bernardino (2005).

2.3.2. Equação da conservação de massa

A variação do leito do rio devido ao transporte de sedimentos pode ser concebida segundo um balanço de massa de um volume de controle, em que se tem como variáveis principais z (elevação do fundo do rio) e Q_s (vazão volumétrica de sedimentos transportados), como se pode observar na Figura 2.6.

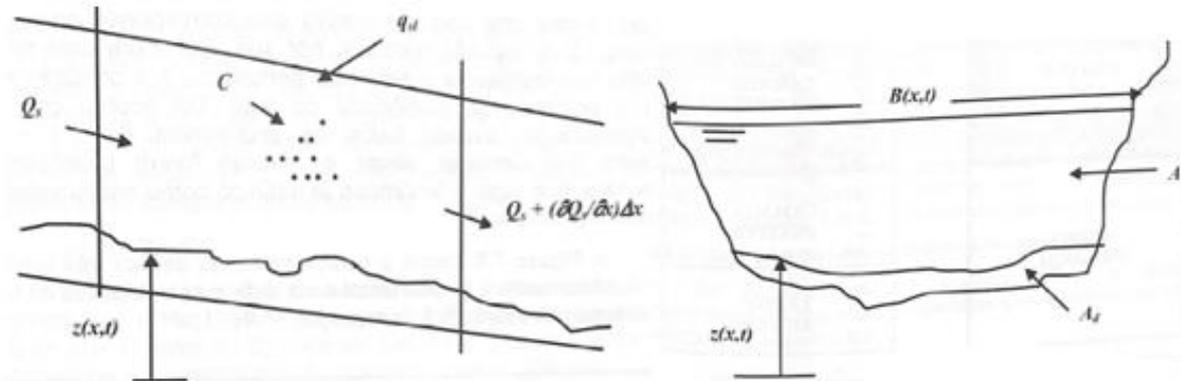


Figura 2.6 - Esquema da variação do leito do rio em um volume de controle. Fonte: adaptado de Silva & Júnior (2005).

De acordo com o esquema acima, pode-se depreender que a variação da quantidade de sedimentos transportada entre duas seções ocasiona a variação da elevação do fundo do canal, onde estão presentes os materiais que podem efetivamente ser carregados ou depositados pelo escoamento (camada ativa).

Dessa forma, utilizando a equação da conservação de massa, chega-se à seguinte equação:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + (1 - \lambda) \frac{\partial A_d}{\partial t} + \frac{\partial AC}{\partial t} - q_{sl} = 0 \quad (2.29)$$

Onde:

- Q_s : vazão sólida total
- λ : porosidade da camada ativa de sedimentos
- A_d : área da seção da camada ativa
- A : área da seção ocupada pela mistura de água e sedimentos
- C : concentração de sedimentos
- q_{sl} : vazão sólida lateral

Segundo Silva & Júnior (2005), “para concentrações muito elevadas e variação longitudinal acentuada das grandezas do escoamento, o processo de transporte de sedimentos é também afetado pela difusão de sedimentos e torna-se necessário utilizar uma equação de difusão-advecção ...”. De modo a se permitir o

estabelecimento de equações fundamentais para o leito móvel, se assumem as seguintes hipóteses para criação de um modelo simplificado (SILVA & JÚNIOR, 2005):

- Desconsidera-se a variação espacial da concentração de sedimentos;
- As trocas de sedimentos em suspensão e do fundo podem ser desprezadas;
- As variações temporais da concentração em suspensão são bem menores do que as variações do transporte no leito;
- A contribuição lateral de vazões sólidas pode ser desprezada.

Com isso, a Eq. (2.29) pode ser reescrita na forma da Equação de Exner:

$$(1 - \lambda)B \frac{\partial z}{\partial t} = - \frac{\partial q_s}{\partial x} \quad (2.30)$$

Onde q_s é a vazão volumétrica de sedimentos por unidade de largura.

2.3.3. Fórmulas do transporte sólido

Existem inúmeras fórmulas empíricas para o cálculo do transporte sólido potencial, para diferentes intervalos de aplicação e condições de escoamento. Segundo Abderrezzak & Paquier (2011), como cada equação foi desenvolvida para uma série de condições laboratoriais ou de campo, a variação de resultados entre elas chega a várias ordens de grandeza. Por exemplo, segundo Sediment... (1990), a fórmula de Ackers & White (1973) utiliza mais de duas mil observações de transporte de sedimentos para definir os parâmetros de ajuste (A , n , m , C) de suas equações, em função do diâmetro sedimentológico (D_{gr}), que define os limites entre sedimentos finos ($1 \leq D_{gr} \leq 60$) e grosseiros ($D_{gr} > 60$). Ainda segundo o autor, um limitador adicional compreende o fato de a calibração da maior parte dessas fórmulas ter se dado para baixos valores de transporte de sedimentos, ou seja, baixos valores de tensão de arraste. No entanto, devido à alta complexidade para a modelagem analítica do transporte de sedimentos, as fórmulas empíricas são a melhor opção disponível nos tempos atuais.

Antes da enunciação das fórmulas de transporte de sedimentos mais utilizadas em canais aluvionares, convém expor as formas com as quais esse fenômeno pode ocorrer, uma vez que cada equação é específica para um ou mais tipos de transporte.

Transporte pela capa de fundo (G_{SBC}): corresponde à movimentação de sedimentos junto ao fundo do canal por rolamento, deslizamento, saltitação ou suspensão. Geralmente consiste em materiais grosseiros como areia, pedriscos, cascalho, etc.

Transporte em suspensão pela capa de fundo (G_{SBS}): consiste na parcela da capa de fundo que se movimenta em suspensão, sendo sua característica essencial ter sido originado do fundo do canal.

Transporte em suspensão (G_{SBS}): ocorre quando as forças ascendentes causadas pela turbulência do escoamento superam o peso submerso das partículas (BERNARDINO, 2005), mantendo-as com velocidade próxima à do fluxo. Compreende partículas finas, tais como areia fina, silte e argila.

Carga de lavagem (G_{SL}): compreende a parcela do material em suspensão que tem origem na bacia hidrográfica, geralmente composta de materiais finos.

Transporte sólido total (G_{ST}): é a soma do transporte pela capa de fundo com o transporte em suspensão.

Segundo Yang (2005), até os dias de hoje, muitas equações sofisticadas foram propostas para estimar o transporte sólido total ou o transporte pela capa de fundo, podendo-se escrever que (CHIEN & WAN, 1998):

$$C_t = f(U, g, h, S_f, \rho, \rho_s, \nu, \omega, d_{50}, B, \sigma_g) \quad (2.31)$$

Sendo:

- C_t : concentração de sedimentos transportados total
- h : profundidade do escoamento
- S_f : declividade da linha de energia
- ρ : massa específica da água

- ρ_s : massa específica do sedimento
- ν : viscosidade cinemática da água
- ω : velocidade de queda da partícula
- d_{50} : diâmetro médio da partícula
- B : largura da superfície livre do escoamento
- σ_g : parâmetro de graduação dos diâmetros dos sedimentos

Ainda de acordo com Yang (2005), como o transporte de sedimentos é relacionado a tantas variáveis, como exibe a equação acima, e algumas delas são interrelacionadas e dependentes de outras, pesquisadores geralmente selecionam um grupo de variáveis principais para caracterizar um determinado processo de transporte de sedimentos, criando grupos de adimensionais que representam o fenômeno dominante, dentre os quais se destacam Φ e Ψ :

$$\Phi = \frac{g_t}{\gamma_s} \left(\frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{gd^3} \right)^{1/2} \quad (2.32)$$

$$\Psi = \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) \frac{d}{R'_h S_f} \quad (2.33)$$

Onde:

- g_t : transporte sólido total por unidade de largura;
- γ : peso específico da água;
- γ_s : peso específico do sedimento;
- d : diâmetro característico do sedimento;
- R'_h : raio hidráulico associado ao atrito dos grãos.

Outros pesquisadores acreditam que a concentração de sedimentos total é governada por um parâmetro adimensional que envolve apenas quatro variáveis e que foi desenvolvido por Zhang (1959):

$$C_t = k_1 \left(\frac{U^3}{gh\omega} \right)^m \quad (2.34)$$

Onde k_1 e m são coeficientes de ajuste empíricos.

Dou (1974) assume que a energia do escoamento é perdida para se superar a resistência de fundo, assim como para manter as partículas em suspensão e aquelas transportadas pelo fundo do canal, apresentando a seguinte formulação:

$$g_t = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \right) \rho u_*^2 \left(\frac{0,123U^2}{\omega} - \frac{0,1UU_c}{\omega} \right) \quad (2.35)$$

Segundo Scapin & Paiva (2004), Van Rijn (1984) assume que a declividade da linha de energia não possui influência sobre o transporte de sedimentos, podendo ser descrita de maneira precisa pelos parâmetros adimensionais introduzidos por Ackers & White (1973): o diâmetro adimensional da partícula (d_*) e um parâmetro de transporte (T) que expressa a mobilidade da partícula, definidos por Ackers & White (1973):

$$d_* = d_{50} \left(\frac{(s-1)g}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad (2.36)$$

$$T = \frac{u_*^2 - u_{*,cr}^2}{u_{*,cr}^2} \quad (2.37)$$

Onde:

- $s = (\gamma_s - \gamma)/\gamma$
- u_* : velocidade de atrito;
- $u_{*,cr}$: velocidade de atrito crítica.

Para descrever o transporte de sedimentos em suspensão, Van Rijn (1984) definiu mais um parâmetro para expressar a influência da turbulência do fluido (dirigida para cima e que mantém as partículas suspensas) e das forças gravitacionais (para baixo):

$$Z = \frac{\omega}{\beta \kappa u_*} \quad (2.38)$$

Onde:

- Z : número de Rouse
- β : coeficiente relacionado à difusão das partículas de sedimento;

- κ : constante de Von Karman.

Diferentemente dos outros autores, Yang (2005) é um dos primeiros pesquisadores a considerar a declividade da linha de energia, S_f , e a velocidade média do escoamento, U , em suas equações de transporte de sedimentos, definindo o termo de potência do escoamento unitária para o cálculo da concentração de sedimentos:

$$C_t = f \left(\frac{US_f}{\omega} \right) \quad (2.39)$$

De acordo com Yang (2005), recentes trabalhos experimentais descobriram uma boa relação linear entre a descarga de sedimentos g_t e o parâmetro T_T , reescritos como se segue:

$$T_T = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \right) \tau_0 \frac{u_*^2 - u_{*,cr}^2}{\omega} \quad (2.40)$$

$$g_t = kT_T \quad (2.41)$$

Onde:

- k : constante de ajuste experimental;
- τ_0 : tensão de arrasto.

2.3.3.1. Equação de Toffaleti

A equação de Toffaleti (1968) calcula tanto a carga de fundo quanto em suspensão, separando a última em quatro zonas verticais (superior, média, inferior e fundo) em uma tentativa de replicar um transporte em suspensão bidimensional. Em cada zona, é calculada uma taxa de transporte e em seguida, todas são somadas para o cálculo total. O autor desenvolveu equações para cada zona baseadas nos parâmetros hidráulicos que governam o movimento dos sedimentos e utilizando o perfil de concentração de sedimentos em suspensão de Rouse (Figura 2.7) ao longo da profundidade.

Segundo Haschenburger (2012), essa é uma abordagem fundamentalmente diferente de fórmulas de transporte de fundo que consideram a tensão de arraste atuante nos sedimentos. A equação é mais apropriada para canais com fundo arenoso e tem sido aplicada com sucesso em rios de elevada vazão.

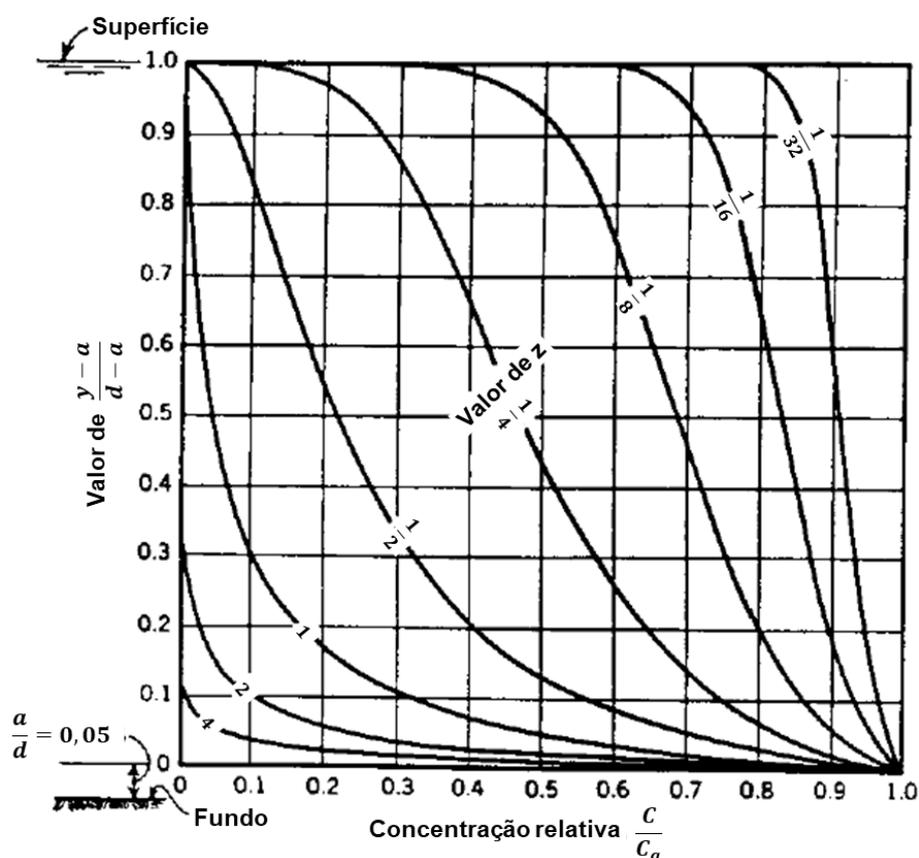


Figura 2.7 - Perfil de Concentrações de Rouse. Fonte: adaptado de Brunner (2016).

As fórmulas gerais para cálculo do transporte de sedimentos em cada uma das zonas (superior – U, média – M, inferior – L, fundo – B) são apresentadas respectivamente a seguir:

$$g_{ssU} = M \frac{\left(\frac{R_h}{11,24}\right)^{0,244Z} \left(\frac{R_h}{2,5}\right)^{0,5Z} (R_h^{1+n_v-1,5Z} - \left(\frac{R_h}{2,5}\right)^{1+n_v-1,5Z}}{1 + n_v - 1,5Z} \quad (2.42)$$

$$g_{ssM} = M \frac{\left(\frac{R_h}{11,24}\right)^{0,244Z} \left[\left(\frac{R_h}{2,5}\right)^{1+n_v-Z} - \left(\frac{R_h}{11,24}\right)^{1+n_v-Z} \right]}{1 + n_v - Z} \quad (2.43)$$

$$g_{ssL} = M \frac{\left(\frac{R_h}{11,24}\right)^{1+n_v-0,765Z} - (2d_m)^{1+n_v-0,765Z}}{1 + n_v - 0,756Z} \quad (2.44)$$

$$g_{sB} = M(2d_m)^{1+n_v-0,765Z} \quad (2.45)$$

$$M = 43,2C_L(1 + n_v)VR_h^{0,756Z-n_v} \quad (2.46)$$

Onde:

- M : parâmetro de concentração de sedimentos;
- C_L : concentração de sedimentos na zona inferior;
- R_h : raio hidráulico;
- d_m : diâmetro médio do sedimento;
- Z : expoente que relaciona as características hidráulicas e do sedimento;
- n_v : expoente da temperatura.

2.3.4. Limitantes de alteração do leito

A variação do leito do canal, ainda que obedeça à equação da continuidade, está limitada à capacidade das partículas de sedimento se depositarem no fundo bem como da disposição das camadas de sedimentos mais ou menos resistentes à ação do escoamento.

A limitação da deposição, em um volume de controle, pode ser calculada pela razão entre a distância vertical percorrida pela partícula, segundo sua velocidade de queda, e a profundidade efetiva em que ela é transportada no escoamento, conforme a equação:

$$C_d = \frac{\omega \Delta t}{y_e} \quad (2.47)$$

Onde:

C_d : coeficiente de eficiência de deposição;

ω : velocidade de queda da partícula;

Δt : intervalo de tempo;

y_e : profundidade efetiva da partícula.

Quando o denominador for maior que o numerador, a partícula não atinge o fundo a tempo e assim, não há deposição; no caso contrário, o coeficiente de eficiência é maior e ocorre deposição.

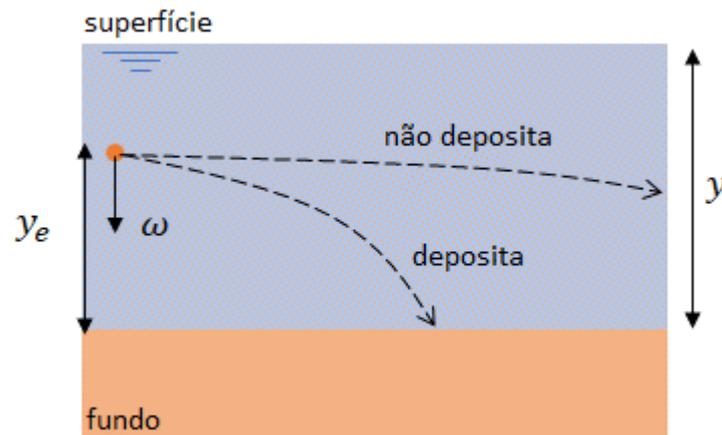


Figura 2.8 - Método de cálculo da deposição em um volume de controle.

Em relação à erosão, o efeito de encouraçamento do fundo é o principal fator limitante do fenômeno. Ainda que haja uma mistura de sedimentos bem graduada no fundo do canal, a tendência do escoamento em levar as partículas mais finas, pois possuem menos resistência à tensão de arraste, faz com que as partículas mais grossas se mantenham no leito, e formem uma carapaça que reduz o carregamento dos sedimentos mais finos que estiverem na camada inferior e, conseqüentemente, a erosão do leito.

De acordo com a premissa de Einstein (1950), a capacidade erosiva do leito corresponde à soma das capacidades de transporte de cada faixa de sedimentos, proporcionalmente à sua quantidade presente. Segundo o autor, em rios aluvionares, é razoável descrever a heterogeneidade das partículas através de seu tamanho, pois

seu formato tem pouca influência e seu peso específico está em um estreito intervalo de variação.

O método desenvolvido por Tony Thomas, em 1982, para determinar a capacidade de erosão do leito, subdivide este último em três regiões: uma camada de cobertura, uma camada subsuperficial e uma camada inativa, conforme ilustrado na Figura 2.9.

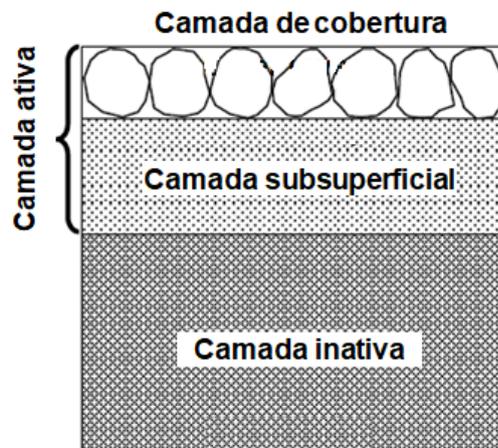


Figura 2.9 - Representação das camadas do leito no método de Thomas. Fonte: adaptado de Brunner (2016).

Neste método, a camada ativa é aquela que estará sujeita a alterações em espessura e composição granulométrica. Para determinar o início da erosão, Thomas estabelece uma profundidade de equilíbrio (y_{eq}) sobre a camada ativa acima da qual o fenômeno ocorre. Essa profundidade advém da combinação das equações de Manning-Stickler (Eq. (2.48) e (2.49)) para a rugosidade do sedimento e de intensidade de transporte de Einstein (Eq. (2.50))

$$V = \frac{R_h^{2/3} \sqrt{S_0}}{n} \quad (2.48)$$

$$n = \frac{d_s^{1/6}}{24} \quad (2.49)$$

$$\psi = \Delta \frac{d_s}{\gamma S_f} \quad (2.50)$$

Resultando na equação (2.51):

$$y_{eq} = \left(\frac{110q}{d_i^{1/3}} \right)^{1/6} \quad (2.51)$$

Onde:

q: vazão específica;

d_i : diâmetro da partícula.

Em relação à interação entre a camada de cobertura e a subsuperficial, o método de Thomas se vale de um coeficiente de encouraçamento, que depende do diâmetro equivalente dos sedimentos da camada superior e cujo valor varia de 0 a 1, para determinar o ritmo da erosão da camada subsuperficial.

2.3.5. Resistência e variação de fundo móvel

A física de fundo móvel de canais é altamente complexa, a fronteira móvel é sujeita à interação entre a energia do escoamento, a geometria do canal, as propriedades dos sedimentos, entre outros fatores. Durante eventos hidrológicos extremos, a resistência ao escoamento em rios aluvionares se altera drasticamente devido à reconfiguração do leito (CHANG, 1988), fazendo com que os sedimentos estejam mais ou menos suscetíveis às tensões cisalhantes do escoamento.

De acordo com Yang (2005), a prática dos últimos tempos é tratar a tensão de arraste de fundo como a soma de duas componentes: a tensão proveniente do grão e a proveniente da forma do fundo. A primeira é provocada pela fricção entre as partículas individuais de sedimento no leito do rio, enquanto a segunda é causada pelas variações na pressão hidráulica ao redor das partículas de sedimento devido à forma do leito do rio. Assume-se que essas duas componentes são independentes uma da outra, sendo tratadas de diferentes modos por pesquisadores ao longo do tempo (YEN, 2002).

A equação de *Limerinos* computa a parcela de resistência do sedimento representada pelo número de Manning. É uma equação simples que considera o raio hidráulico da

seção e o d_{84} dos sedimentos, sendo primariamente aplicada a canais sem formações de fundo que apresentem alguma variação no tempo:

$$n = \frac{0,0926R_h^{1/6}}{1,16 + 2 \log(R_h/d_{84})} \quad (2.52)$$

A equação de *Brownlie* (1983) computa a rugosidade de fundos onde a resistência da forma é muito mais relevante do que a do grão. É um método baseado nas características hidráulicas do canal (raio hidráulico e declividade de fundo) e dos sedimentos (d_{50} e desvio padrão geométrico da mistura), além do tipo de formação, se de regimes inferiores (rugos e dunas) ou superiores (leito plano e antidunas).

Regime superior:

$$n = \left[1,6940 \left(\frac{R_h}{d_{50}} \right)^{0,1374} S_f^{0,1112} \sigma^{0,1605} \right] 0,034 d_{50}^{0,167} \quad (2.53)$$

Regime inferior:

$$n = \left[1,0213 \left(\frac{R_h}{d_{50}} \right)^{0,0662} S_f^{0,0395} \sigma^{0,1282} \right] 0,034 d_{50}^{0,167} \quad (2.54)$$

Onde σ é o desvio padrão geométrico da mistura dado por:

$$\sigma = \frac{1}{2} \left(\frac{d_{84}}{d_{50}} + \frac{d_{50}}{d_{16}} \right) \quad (2.55)$$

As dunas ($F_R < 1$) são formas de relevo sedimentares que se assemelham às dunas do deserto e são geralmente encontradas em leitos de rios com leves declives e fluxos de água relativamente estáveis. A água que flui ao longo do fundo do rio, quando encontra um obstáculo, como uma rocha ou uma mudança na forma do leito, cria uma zona de turbulência onde os sedimentos se depositam, formando uma duna. Com o tempo, essas dunas podem crescer e se mover, moldadas pelo fluxo de água.

Já as rugas ($F_R < 1$) são formadas em leitos de rios com fluxos turbulentos e são geralmente causadas por variações na velocidade do fluxo de água e na profundidade

do leito do rio. Quando o fluxo de água encontra uma mudança na inclinação do leito do rio ou uma obstrução, ele pode criar zonas de turbulência e oscilações na superfície da água, levando à formação de rugas no leito do rio.

Por fim, as antidunas ($F_R > 1$) tem geometria oposta às dunas, sendo criadas em leitos de rios com fluxos muito rápidos e estão associadas a fluxos de água turbulentos e oscilantes. À medida que a água flui rapidamente sobre o leito do rio, ela pode transportar grandes quantidades de sedimentos. Quando o fluxo de água diminui repentinamente, devido a uma mudança na inclinação do leito do rio ou uma obstrução, os sedimentos começam a se depositar no fundo do rio, formando uma coluna ou crista. Com o tempo, essa crista pode crescer e se mover rio abaixo à medida que a água continua a transportar mais sedimentos.

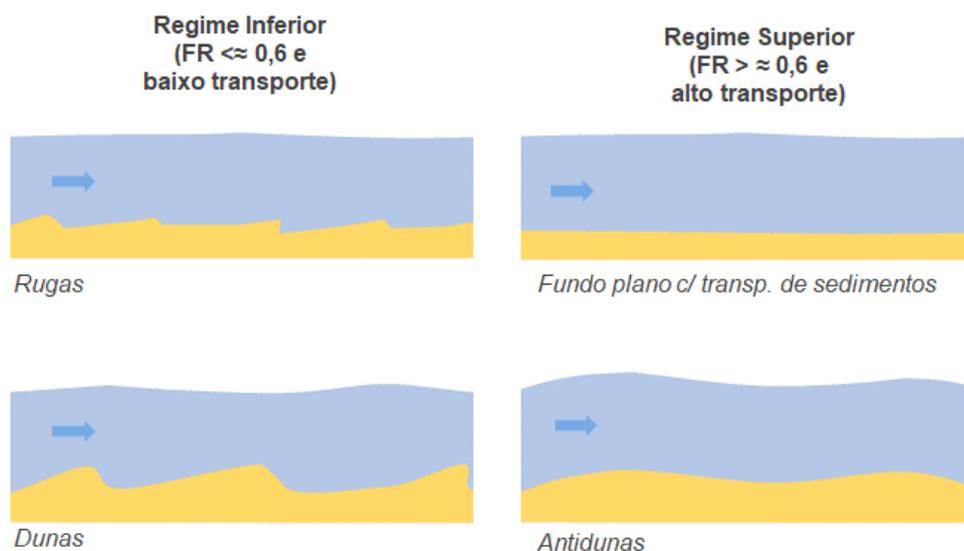


Figura 2.10 - Tipos de formações de fundo.

A equação de Van Rijn (1984) é mais recente e se baseia em resultados obtidos em campo e em condutos de laboratório, tendo boas previsões para formações do tipo dunas e fundo plano. Esse método calcula as dimensões das formas de fundo e a rugosidade associada através de parâmetros adimensionais, tais como o diâmetro sedimentológico e o parâmetro de Shields.

3. MÉTODO

Neste trabalho, foi realizado um procedimento usual de aplicação de uma ferramenta computacional para modelagem de um trecho do Rio Paraíba do Sul, com o objetivo de estudar a sua evolução morfológica em um cenário definido de simulação. Nesse sentido, os itens seguintes introduzem: o processo de obtenção de dados de campo; o modelo computacional e suas técnicas de resolução das equações abordadas na revisão bibliográfica; e as simulações realizadas, bem como a forma de análise dos resultados.

3.1. Levantamento de dados

A aquisição de dados para a modelagem computacional do Rio Paraíba do Sul foi feita consultando-se, principalmente, estudos técnicos já realizados no local e a base de dados disponibilizadas virtualmente pelos órgãos de gestão responsáveis.

No tocante aos estudos técnicos, foram consultados os relatórios do convênio DAEE/EPUSP, relativos às campanhas batimétricas e hidrossedimentométricas realizadas entre as décadas de 70 e 80. Nesses estudos, pôde-se contar com informações acerca da configuração inicial do trecho paulista do rio para fins da simulação, o que inclui informações de descarga líquida, amostragem de carga de sedimentos em suspensão, distribuição granulométrica ao longo do rio e batimetria das seções que estruturam a grade numérica do modelo proposto neste trabalho. Além disso, também estiveram disponíveis informações sobre a resistência ao escoamento no canal natural, gerados a partir da calibração em modelo computacional desenvolvido à época, com os próprios dados de descarga e linha d'água coletados (assunto tratado no item 4.2.4) .

No Portal *hidroweb* da ANA (www.snirh.gov.br/hidroweb), são fornecidos os dados de batimetria em séries de dados anuais para alguns postos do trecho em estudo, entre 1982 até 2012, o que permitiu a comparação com os resultados do modelo. Também se dispôs de dados parciais de descarga líquida, nível d'água e concentração de sedimentos no período em questão.

No capítulo 4, é descrito o estudo de caso e são apresentadas em maiores detalhes as características dos dados disponíveis para utilização no modelo computacional.

3.2. Programa HEC-RAS

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizada a ferramenta computacional HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*), versão 5.0, desenvolvido em 1995 pelo *US Army Corps of Engineers*. Brunner (2016) disponibiliza o material base para o entendimento do software. O modelo HEC-RAS é um software amplamente utilizado para modelagem hidráulica unidimensional de fluxo em rios e canais.

Com esta ferramenta é possível fazer simulações uni e bidimensionais de redes de canais naturais ou artificiais em regime permanente ou não permanente, cálculos de lâmina d'água em regime permanente ou não permanente, cálculos de transporte de sedimentos em sistema de fronteiras móveis, entre outras capacidades. Algumas das principais funcionalidades do HEC-RAS incluem:

Modelagem hidráulica unidimensional: utiliza uma abordagem unidimensional para simular o fluxo em rios e canais, o que o torna adequado para uma ampla gama de aplicações, desde pequenos cursos d'água até grandes rios.

Capacidade de modelar geometrias complexas: O software permite a entrada de dados topo batimétricos para representar com precisão a geometria do canal, incluindo curvas, ilhas, pontes e estruturas de controle de água.

Análise de inundação: O HEC-RAS é frequentemente usado para avaliar a inundação em áreas adjacentes a rios e canais, podendo prever a extensão e a profundidade das inundações sob diferentes condições hidrológicas e topográficas.

Avaliação de pontes e estruturas: O software pode ser usado para analisar o impacto de pontes e outras estruturas no fluxo do rio, incluindo a determinação de níveis d'água máximos e a identificação de potenciais problemas hidráulicos.

Simulação de sedimentação e erosão: O HEC-RAS também inclui recursos para modelar o transporte de sedimentos, erosão e deposição em rios e canais, permitindo a análise de mudanças na morfologia do leito do rio ao longo do tempo.

Em resumo, o HEC-RAS é uma ferramenta essencial para engenheiros e pesquisadores que trabalham com projetos relacionados a hidráulica fluvial, gestão de recursos hídricos, controle de inundação, infraestrutura de transporte aquaviário e preservação ambiental.

Sendo assim, entende-se que o modelo é capaz de oferecer informações acerca, por exemplo, da formação da linha d'água, das alterações topo batimétricas das seções transversais e da magnitude do transporte de sedimentos em trechos de interesse do curso d'água, considerando o apropriado fornecimento das séries de dados hidrológicos e sedimentométricos.

No presente estudo de caso, a modelagem unidimensional do HEC-RAS foi adotada considerando as seguintes vantagens:

Maior acessibilidade e menor custo computacional em comparação com modelos bidimensionais ou tridimensionais;

Maior simplicidade, facilitando a interpretação dos resultados e a calibração dos módulos hidrodinâmico e de transporte de sedimentos;

Menor exigência de dados em comparação com os modelos 2D e 3D, uma vez que este estudo dispõe de poucas informações, conforme detalha o item 4.2);

Grande extensão de corpo hídrico (cerca de 200 km do trecho em estudo), em comparação com as outras dimensões.

3.2.1. Módulo hidrodinâmico

O modelo hidrodinâmico do HEC-RAS, em seu módulo de transporte de sedimentos, aplica um método de discretização do regime não permanente chamado *Quasi-*

Unsteady. Esse procedimento toma um hidrograma e transforma suas ordenadas contínuas em patamares de largura definida, como ilustrado na Figura 3.1.

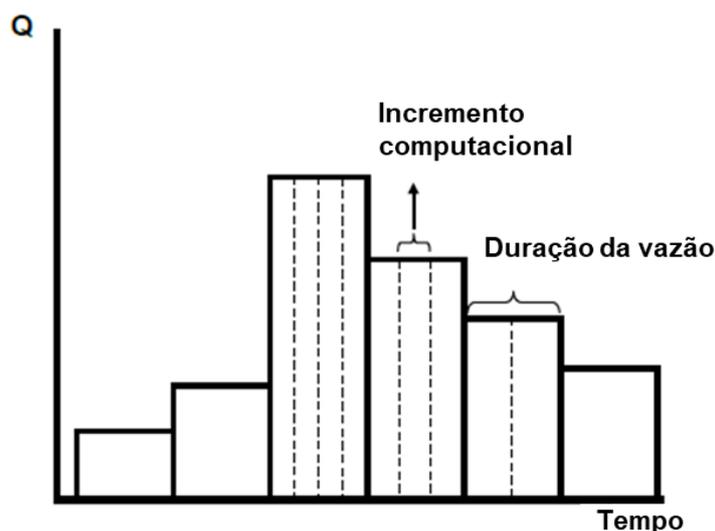


Figura 3.1 - Método de discretização do *Quasi-Unsteady*. Fonte: adaptado de Brunner (2016).

Essencialmente, o *Quasi-unsteady* nada mais é do que uma série de simulações de escoamento permanente gradualmente variado em intervalos fixos. Dessa forma, a incógnita a ser descoberta corresponde ao nível d'água ao longo do canal, também entendido como remanso.

A determinação do nível d'água é feita por meio da resolução iterativa (*Step Method*) da equação de conservação de energia no regime permanente, Eq. (2.10). Para o cálculo da perda de carga, a condutividade hidráulica da seção transversal (Eq. (2.26)) é composta pela soma das condutividades em cada fração da seção em que a distribuição de velocidades é praticamente uniforme.

Em seguida, a declividade da linha de energia é obtida por meio da equação de Manning, e assim é possível calcular a parcela de dissipação de energia devido ao atrito, entre duas seções. O método padrão do HEC-RAS adota um valor médio de S_f entre a seção de cálculo e a anterior.

Em relação à perda de energia por contração/expansão do fluido, sua ocorrência se deve a casos de variação da seção transversal. Os valores dos coeficientes (C) da equação da perda de carga variam de 0 (sem transição entre seções) a 1, sendo

computados de acordo com o tipo de transição e regime de escoamento. O programa assume que quando o termo cinético aumenta da seção de montante para jusante, o fluido se contrai, e se expande na situação inversa.

Por fim, o coeficiente de Coriolis é calculado através da média ponderada dos termos cinéticos de cada porção da seção transversal pela vazão:

$$\alpha \left(\frac{V^2}{2g} \right) = \frac{\frac{Q_1 V_1^2}{2g} + \frac{Q_2 V_2^2}{2g} + \dots + \frac{Q_n V_n^2}{2g}}{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n} \quad (3.1)$$

Para facilitar o entendimento da sequência de cálculos do *Step Method* utilizado no programa HEC-RAS, ilustra-se na Figura 3.2 esse processo.

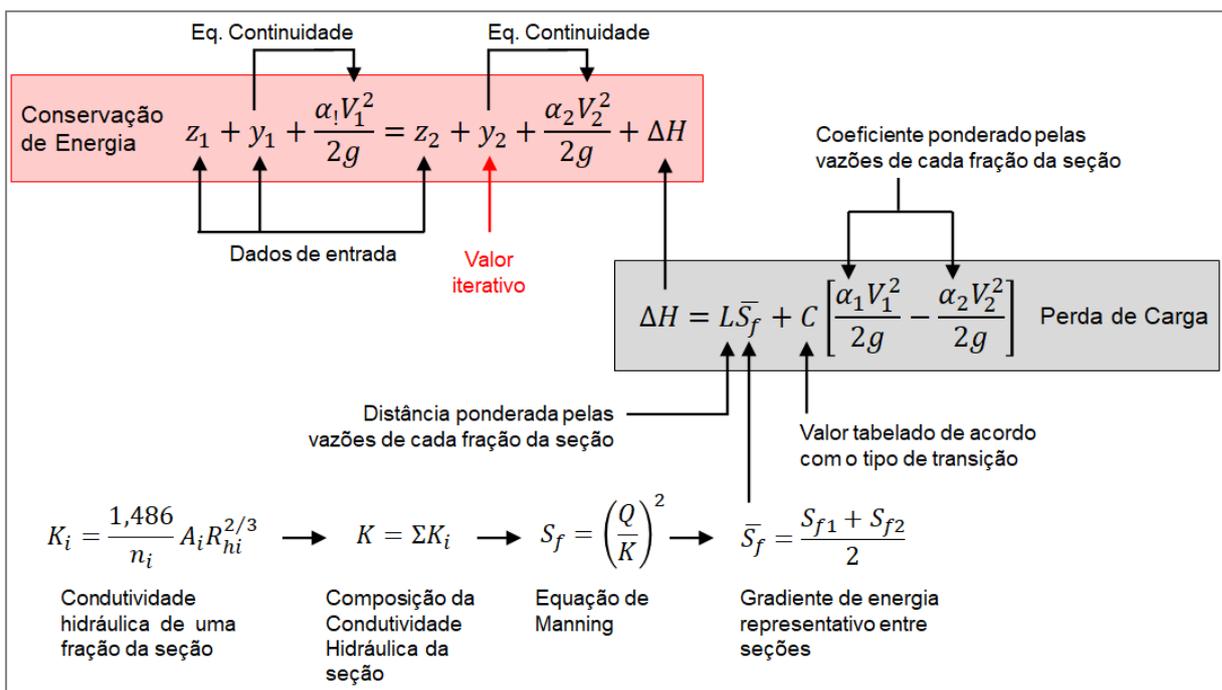


Figura 3.2 - Esquema do cálculo das variáveis do regime permanente gradualmente variado, no modelo HEC-RAS (*Step Method*).

Com todos os parâmetros calculados, o erro em relação à estimativa inicial da linha d'água é avaliado. De acordo com Brunner (2016), caso o erro esteja abaixo de 0,003 m ou da tolerância definida pelo usuário, o valor calculado para a seção é aceito e denominado linha d'água de erro mínimo.

Ainda assim, é possível ocorrer uma má representação das seções ou de seu espaçamento, ou então uma mudança de regime (subcrítico ou supercrítico) não identificada, levando à não convergência do método. Então, verifica-se o escoamento rapidamente variado, que deve ser resolvido pela equação da conservação de quantidade de movimento, descrita no item 2.2.3.

3.2.2. Módulo de transporte de sedimentos

Já para o modelo de fundo móvel, o programa HEC-RAS utiliza um balanço de massa em um volume de controle para calcular o saldo de sedimentos. Caso a massa sólida entrando na seção seja maior do que a de saída, ocorre elevação do fundo do canal (assoreamento); e no caso inverso, diminuição (erosão).

A equação de Exner (Eq. (2.30)) representa esse modelo e considera que os sedimentos acumulados no fundo se disponham em diferentes camadas cuja porosidade é o parâmetro que determina a variação de volume em função da variação de massa.

Após resolver o balanço de massa na seção obedecendo aos limitantes de erosão e deposição, o programa HEC-RAS distribui o superávit ou déficit de massa na forma de uma cunha no volume de controle, como ilustra a Figura 3.3:

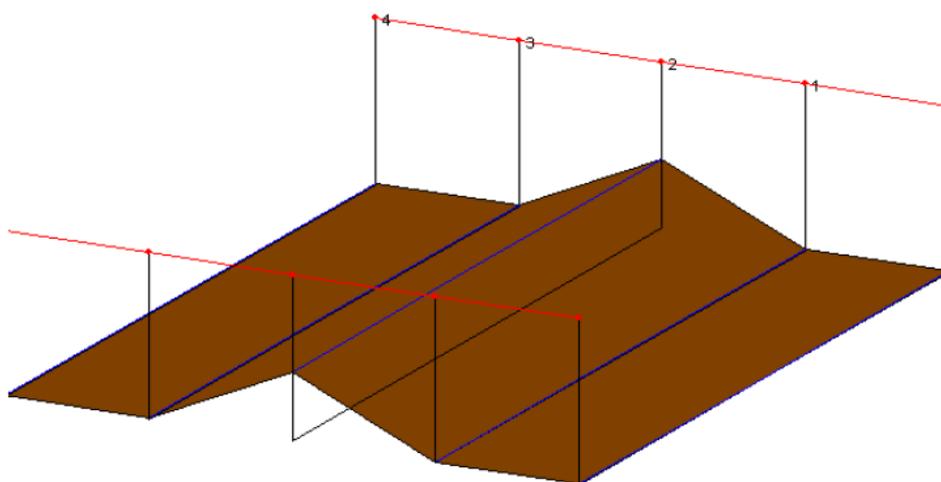


Figura 3.3 - Alteração no volume de controle após cálculo da erosão/deposição. Fonte: Brunner (2016).

Na seção transversal, o software utiliza um método de translação vertical dos pontos sujeitos a erosão ou deposição dentro do que é definido previamente como limite de mobilidade dos pontos da seção (Figura 3.4). Nele, os pontos dentro do limite e pertencentes ao perímetro molhado são deslocados verticalmente, permanecendo sempre abaixo da superfície líquida.

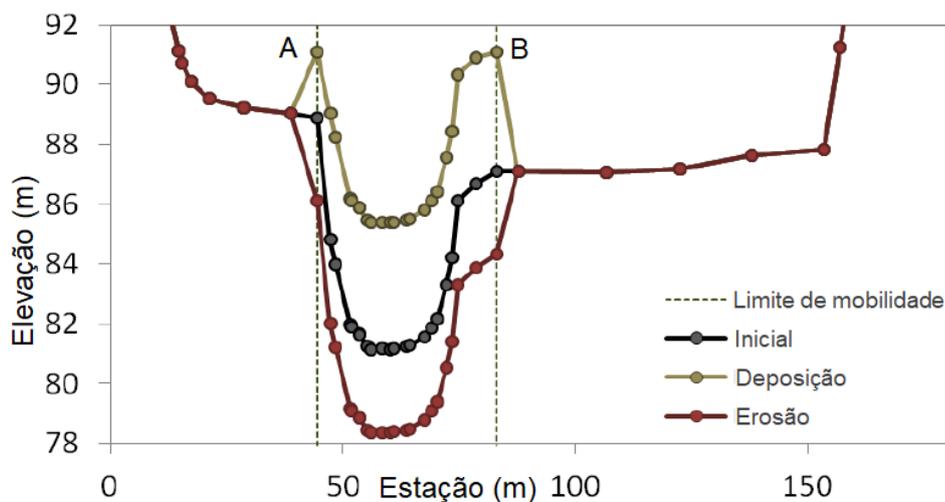


Figura 3.4 - Método do HEC-RAS para alteração da seção. Fonte: adaptado de Brunner (2016).

Para o cenário de erosão, a transformação aplicada é razoável, no entanto, para o cenário de deposição ilustrado, as posições dos pontos A e B não parecem representar adequadamente a realidade. Por esse motivo, é disponibilizado um método alternativo que permite a ocorrência de deposição fora dos limites móveis da seção, nas margens do canal, com a contrapartida de redução de alturas de deposição na calha principal, como ilustrado na Figura 3.5:

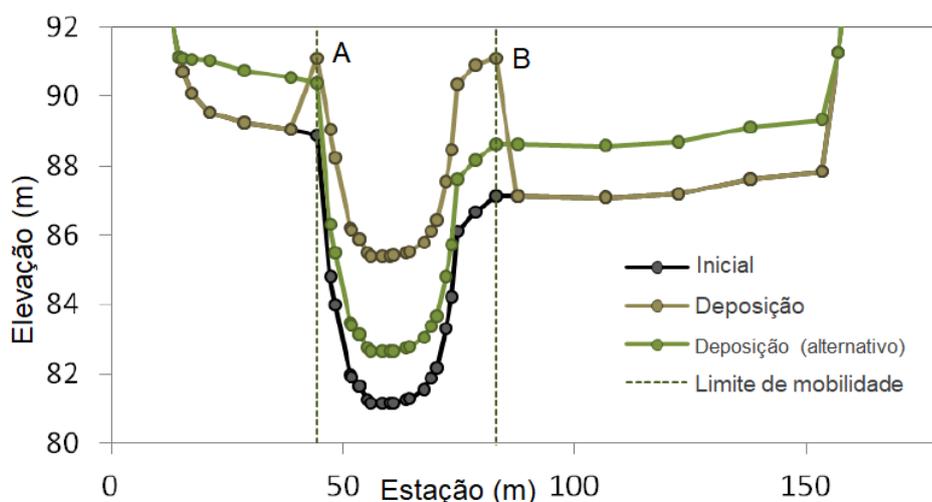


Figura 3.5 - Método alternativo para deposição na seção. Fonte: adaptado de Brunner (2016).

3.3. Simulações e análises

As simulações do programa HEC-RAS podem ser divididas em duas etapas: a calibração do modelo; e o estudo de um cenário de intervenção antrópica em pontos do trecho em estudo.

A primeira etapa foi discutida no capítulo 5, onde foi abordada a preparação do modelo e foi feita uma comparação entre os resultados da simulação e os dados observados em campo, no período de 1982 a 2012. Esta comparação buscou verificar a proximidade entre a simulação e a realidade, sobretudo, no que diz respeito às vazões líquidas no trecho e às alterações de leito e das seções transversais. Isso formou um embasamento para a validação dos resultados trazidos pelo modelo nas etapas seguintes.

No cenário hipotético de intervenção humana no Rio Paraíba do Sul, foi analisada a alteração morfológica causada por uma extração de areia intensa em pontos do canal natural.

4. ESTUDO DE CASO

4.1. Descrição do estudo de caso

A Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte abrange o trecho paulista do Rio Paraíba do Sul, estando localizada no extremo leste do Estado de São Paulo, fazendo divisa com os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro. Segundo a EMPLASA (2020), essa região foi criada em 2012 e possui uma área de 16.192 km², com uma população de mais de 2,5 milhões de habitantes (2018), distribuídos em 39 municípios.

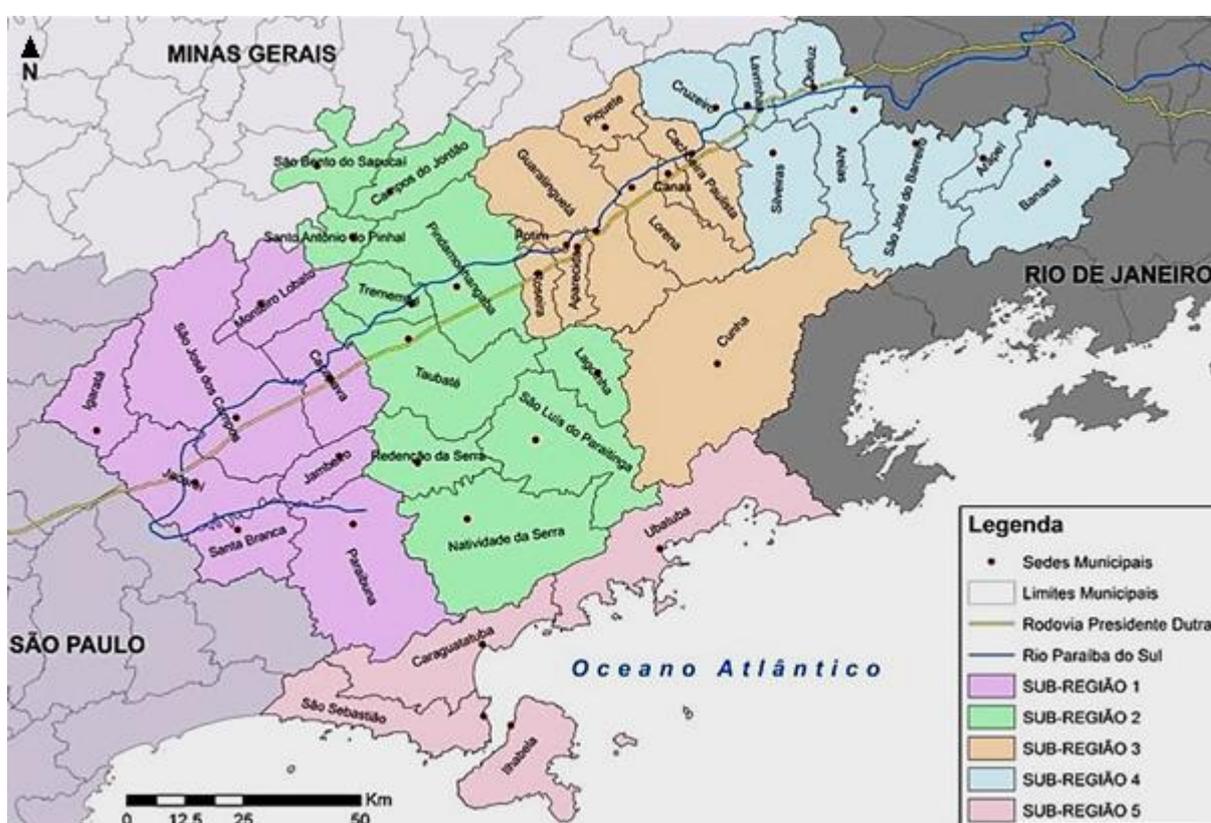


Figura 4.1 - Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte. Fonte: CEIVAP (2018).

O Rio Paraíba do Sul possui uma extensão de pouco mais de 300 km no trecho paulista, desde a nascente, na confluência dos rios Paraitinga e Paraibuna, a 1800 metros de altitude, até o município de Areias, na divisa com o estado do Rio de Janeiro. Dentro desses limites, pode ser dividido em dois trechos: o curso superior que vai da nascente até Guararema, com declividade média de 4,9 m/km, sendo a

parte mais torrencial do rio; e o curso médio superior, que vai até Cachoeira Paulista, com 0,19 m/km de declividade média e apresentando alta sinuosidade.

De acordo com IPT (2015), nas últimas décadas, a economia paulista sofreu um importante processo de interiorização, que resultou no surgimento de novos polos de desenvolvimento regional. Em virtude da evolução econômica desses centros urbanos e industriais emergentes, a demanda por insumos minerais para uso na construção civil cresce de maneira expressiva.

Com o crescimento urbano e industrial, combinado ao fato de existirem condições geológicas favoráveis para a ocorrência de jazidas de minerais, propiciou-se a formação de núcleos de mineração em zonas específicas no estado de São Paulo (REIS et. al., 2006). A área sedimentar do Vale do Rio Paraíba do Sul constitui um desses casos de grande concentração da atividade de mineração em razão da destacada presença de bens minerais, em particular, das expressivas reservas de areia utilizadas como agregado miúdo na construção civil.

Como é de se esperar em qualquer curso d'água, a sua planimetria e perfil longitudinal são influenciados pelas formações geológicas que o comporta (RIBEIRO, 2010). Nesse sentido, como se observa na Figura 4.2, o Rio Paraíba do Sul se encontra sobre depósitos aluvionares recentes, configurando jazidas de areia a serem exploradas tanto no leito do rio quanto nas planícies fluviais.

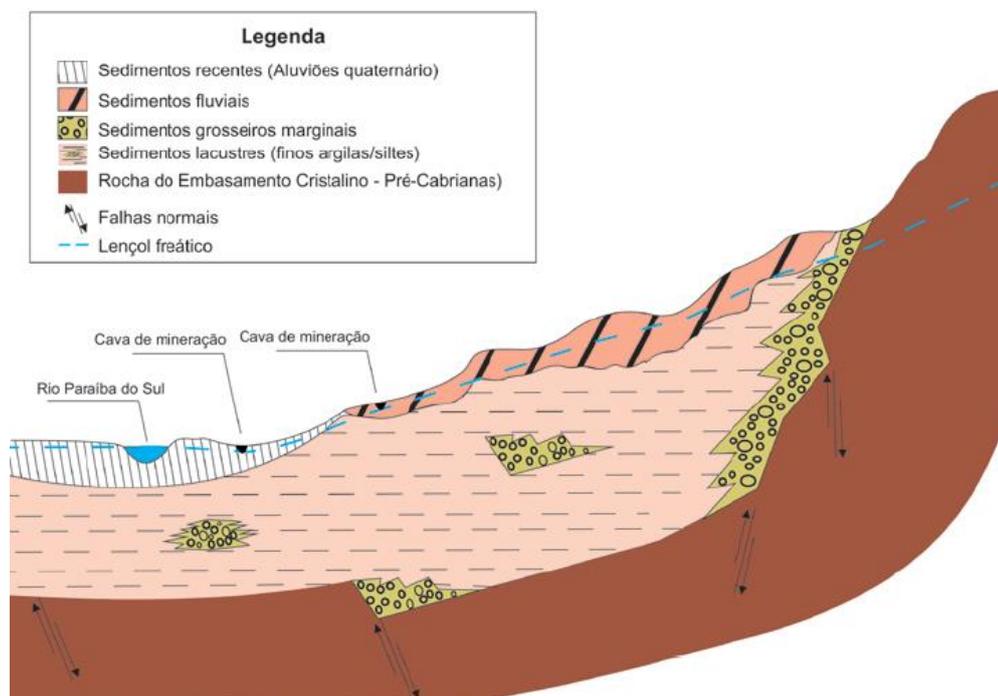


Figura 4.2 – Seção esquemática das formações geológicas típicas do Rio Paraíba do Sul.
Fonte: IPT (2015).

Ainda segundo IPT (2015, p.60)

“A extração de areia de forma mais sistemática teve seu início nos anos de 1940. (...) O Vale do Paraíba por sua dotação mineral, bem como pelo fator logístico estratégico, a entrada em operação da rodovia Presidente Dutra, assumiu rapidamente a vanguarda da produção de areia no Estado, com os primeiros portos instalando-se, pela proximidade da capital, no município de Jacareí. Nessa fase pioneira da mineração na região, a extração era efetuada de forma manual nas barras arenosas do leito ativo do rio Paraíba do Sul. A partir dos anos de 1960, as operações de lavra tornaram-se mais mecanizadas, com a expansão da mineração para os municípios de São José dos Campos e Caçapava.

A construção de reservatórios a montante das áreas de mineração nos anos de 1970 alterou a dinâmica do rio Paraíba do Sul, diminuindo o aporte de sedimentos arenosos no canal fluvial. Isto induziu paulatinamente a transferência da extração de areia do leito ativo para as faixas marginais da planície de inundação, com a areia passando a

ser lavrada em cavas submersas, sendo este o sistema operacional dominante pelo menos nos últimos 30 anos.”

Segundo estudos hidráulicos da década de 70, DAEE (1973), a alteração do equilíbrio físico e ecológico da bacia provém da intervenção humana, através de um aproveitamento não harmonioso dos recursos da água e do solo. Tratando-se de um rio importante, localizado entre as duas maiores cidades do Brasil, a influência humana é altamente sensível, visando o aproveitamento máximo dos recursos, o que não significa o aproveitamento ótimo.

Considerando o cenário apresentado, em que o Rio Paraíba do Sul tem sofrido diversas intervenções pautadas na exploração de seus recursos, culminando com alterações em sua morfologia, regime hídrico e capacidade de transporte sólido, o presente trabalho se desenvolveu no sentido de modelar o comportamento do trecho paulista do Rio Paraíba do Sul a partir de meados dos anos 70, em se possui informações batimétricas e hidrossedimentométricas do curso d'água, até anos mais recentes a fim de se verificar a qualidade dos resultados obtidos.

As etapas seguidas para o desenvolvimento desse estudo compreenderam:

- Levantamento de dados: abrangeu aqueles coletados pelo CTH entre 1979 e 1982, além da consulta à base de postos fluviométricos da ANA, entre outras fontes de informações acerca das condições físicas do curso d'água entre as cidades de Jacareí e Cachoeira Paulista;
- Aplicação de modelagem computacional: foi usado o software do *US Army Corps of Engineers (USACE)*, cuja utilização compreendeu basicamente duas etapas: calibração dos modelos hidrodinâmico e de transporte de sedimentos; e simulação de eventos de intervenção no Rio Paraíba do Sul.
- Análise de resultados: se trata da etapa em que foi feita a análise dos resultados obtidos com o modelo computacional, objetivando traçar conclusões sobre o impacto das atividades humanas na morfologia do rio, ainda que o próprio modelo possua as suas limitações.

4.2. Dados disponíveis

A disponibilidade de dados para uso na modelagem computacional faz referência aos postos fluviométricos localizados nos municípios indicados na Figura 4.3, e ao intervalo de 1979 a 2012.

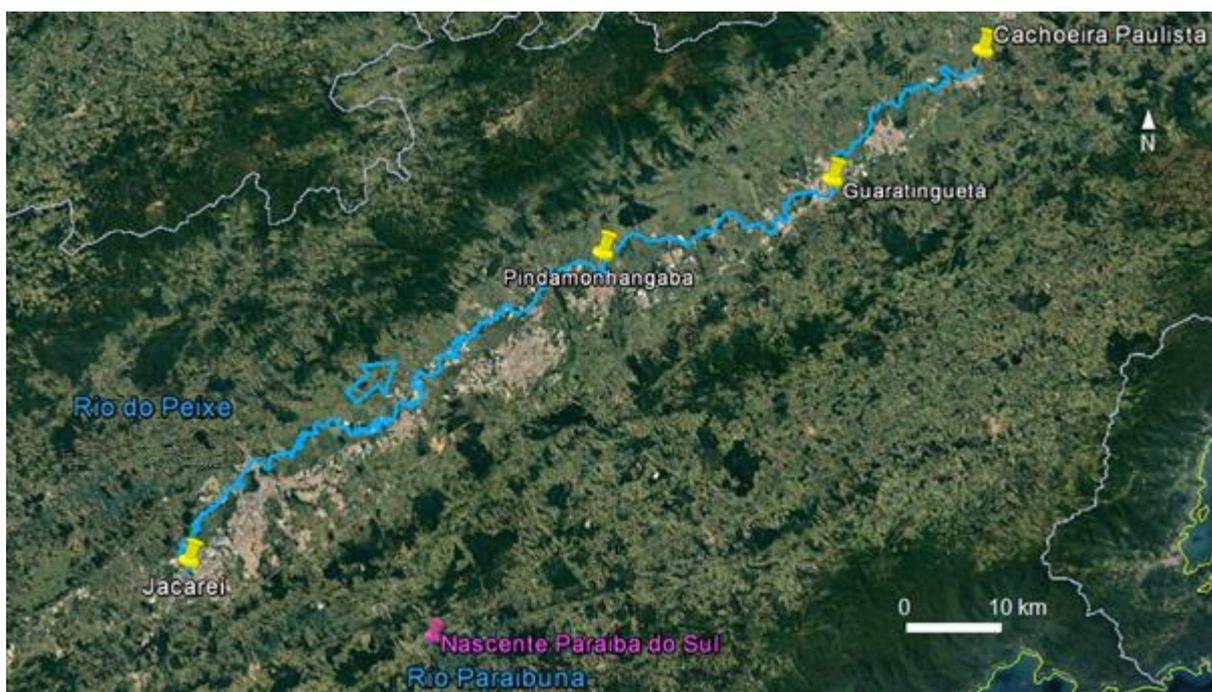


Figura 4.3 – Trecho de estudo do Rio Paraíba do Sul e localização de pontos de medições.
Fonte: adaptado de Google Earth (2020).

Esses postos pertencem à Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), sob coordenação da ANA, Agência Nacional de Águas, e possuem as seguintes características expressa na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Especificação dos postos fluviométricos da RHN utilizados para o estudo.

Posto fluviométrico	Código	Município	Operador	Respons.	Latitude	Longitude
Jacareí	58110002	Jacareí	CPRM	ANA	-23,3078	-45,9750
Pindamonhangaba	58183000	Pindamonhangaba	CPRM	ANA	-22,9117	-45,4700
Guaratinguetá	58204000	Guaratinguetá	CPRM	ANA	-22,8119	-45,1825

Posto fluviométrico	Código	Município	Operador	Respons.	Latitude	Longitude
UHE Funil Montante 2	58218000	Cachoeira Paulista	FURNAS	FURNAS	-22,6617	-45,0125

As estações monitoram parâmetros do escoamento dos rios tais como níveis d'água, qualidade da água, concentração de sedimentos, perfil transversal, entre outros, registrados em uma base de dados disponível para acesso público na plataforma *hidroweb* (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>).

Da Tabela 4.2 à Tabela 4.5, são exibidas algumas estatísticas de vazões líquidas e sólidas dos postos, derivadas dos dados monitorados periodicamente.

Tabela 4.2 – Estatísticas de vazões líquidas e sólidas do posto de Jacareí.

Posto de Jacareí	Vazão líquida (m ³ /s)	Vazão específica (L/s/km ²)	Concent. em suspensão (ppm)	Vazão Sólida (t/dia)
Média anual	76,0	13,6	15,7	212,8
TR 2 anos	66,1	11,9	14,2	141,2
TR 10 anos	131,5	23,6	28,1	468,2

Tabela 4.3 - Estatísticas de vazões líquidas e sólidas do posto de Pindamonhangaba.

Posto de Pindamonhangaba	Vazão líquida (m ³ /s)	Vazão específica (L/s/km ²)	Concent. em suspensão (ppm)	Vazão Sólida (t/dia)
Média anual	147,7	15,6	27,3	1174,0
TR 2 anos	132,5	14,0	19,2	863,5
TR 10 anos	234,0	24,7	57,4	1940,0

O conjunto de medições de nível d'água foi realizado por meio de régua linimétrica e/ou estação automática. Já as vazões líquidas foram obtidas através de medições de velocidade com molinete em verticais de profundidade e através de curvas chaves em alguns postos, conforme a equação:

$$Q = a(H + H_0)^b \quad (4.1)$$

Onde:

Q: vazão líquida

H: leitura de nível d'água;

a, b e H_0 : coeficientes de ajuste da equação.

A Tabela 4.6 apresenta as estatísticas das séries de vazões dos postos utilizados considerados no modelo.

Tabela 4.6 - Estatísticas das séries de vazões utilizadas no modelo.

Posto	Q _{mín} (m ³ /s)	Q _{méd} (m ³ /s)	Q _{máx} (m ³ /s)	Área de drenagem (km ²)
Jacareí	0,9	76,0	363,9	5.575
Pindamonhangaba	47,1	147,7	702,5	9.479
Guaratinguetá	43,8	168,7	751,5	10.800
Cachoeira Paulista	43,7	188,2	765,4	11.687

O uso das informações de nível d'água e vazão tem fundamental importância para a calibração do módulo hidrodinâmico do modelo HEC-RAS, como discutido no item 4.2.4. No entanto, como a série de Jacareí não se encontra completamente preenchida, faz-se necessário o seu preenchimento através da regionalização de vazões dos outros postos.

Utilizou-se como um parâmetro de comparação a vazão específica do posto, que corresponde à razão entre a vazão líquida e a sua área de drenagem, como indicado na Eq. (4.2):

$$q = \frac{Q_L}{A_D} \quad (4.2)$$

Primeiramente, os valores q de todos os postos, foram calculados segundo valores de vazão média, como expresso na Tabela 4.7, para verificar a consistência entre eles, como se pode observar no gráfico da Figura 4.5.

Tabela 4.7 - Vazões específicas médias mensais dos postos.

q (L/s/km ²)	Jacareí	Pindamonhangaba	Guaratininguetá	Lorena	Cachoeira Paulista
Valor médio	13,6	15,6	15,6	17,7	16,1
Desvio Padrão	4,7	5,6	5,5	6,1	5,9

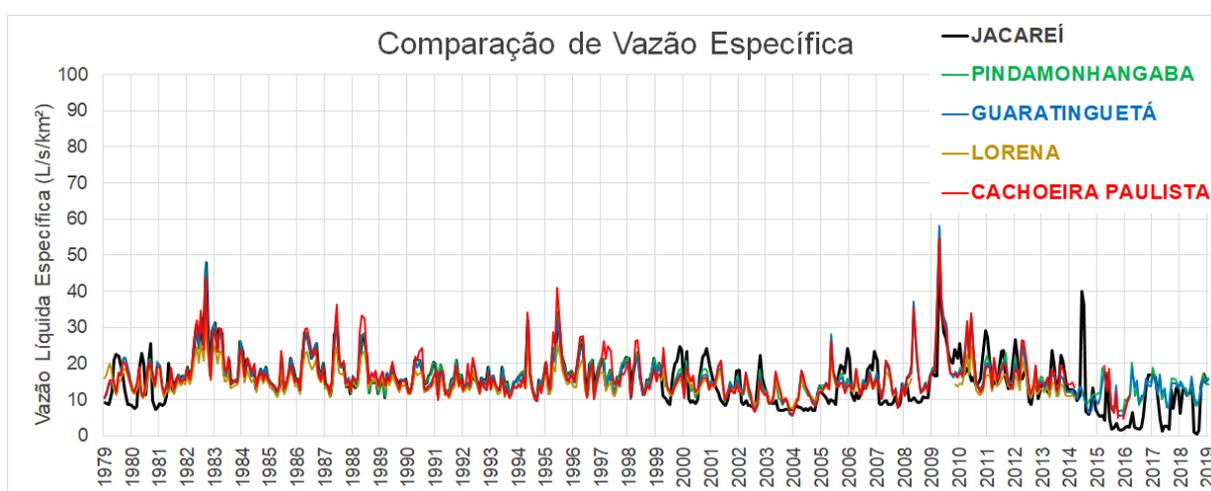


Figura 4.5 – Vazões específicas médias mensais dos postos.

Essa distribuição de resultados favorece a série de Jacareí ser preenchida utilizando-se as vazões específicas dos demais postos, próximas a 16 L/s/km², e multiplicando-se posteriormente pela área de drenagem do posto de Jacareí.

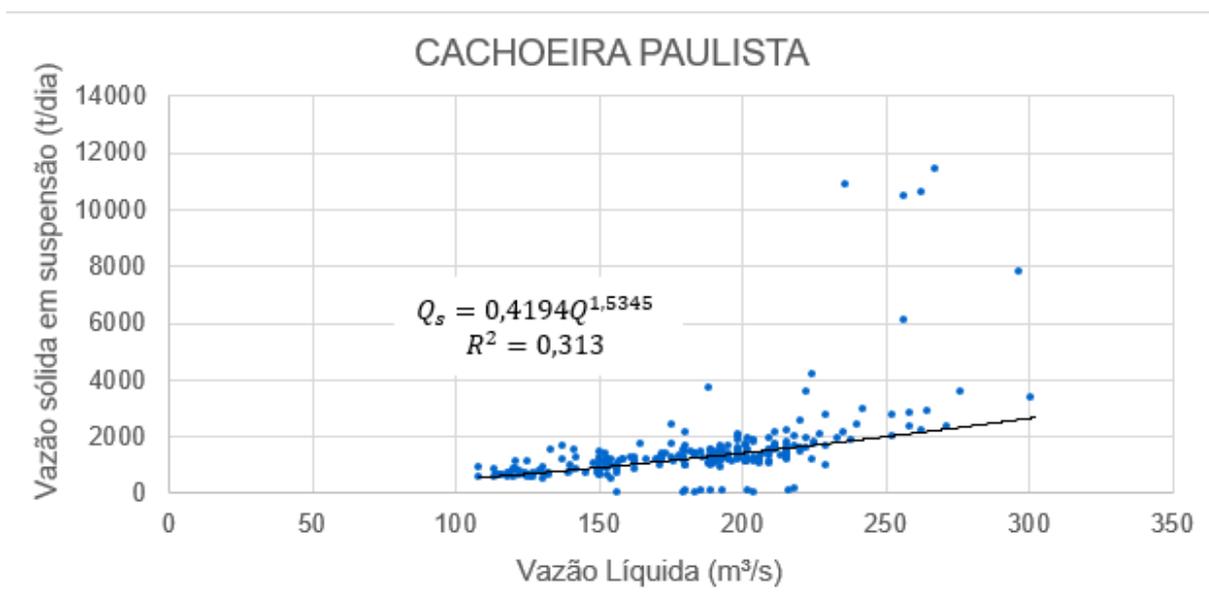


Figura 4.7 – Curva-Chave Sólida na região próxima à seção do posto de Cachoeira Paulista.

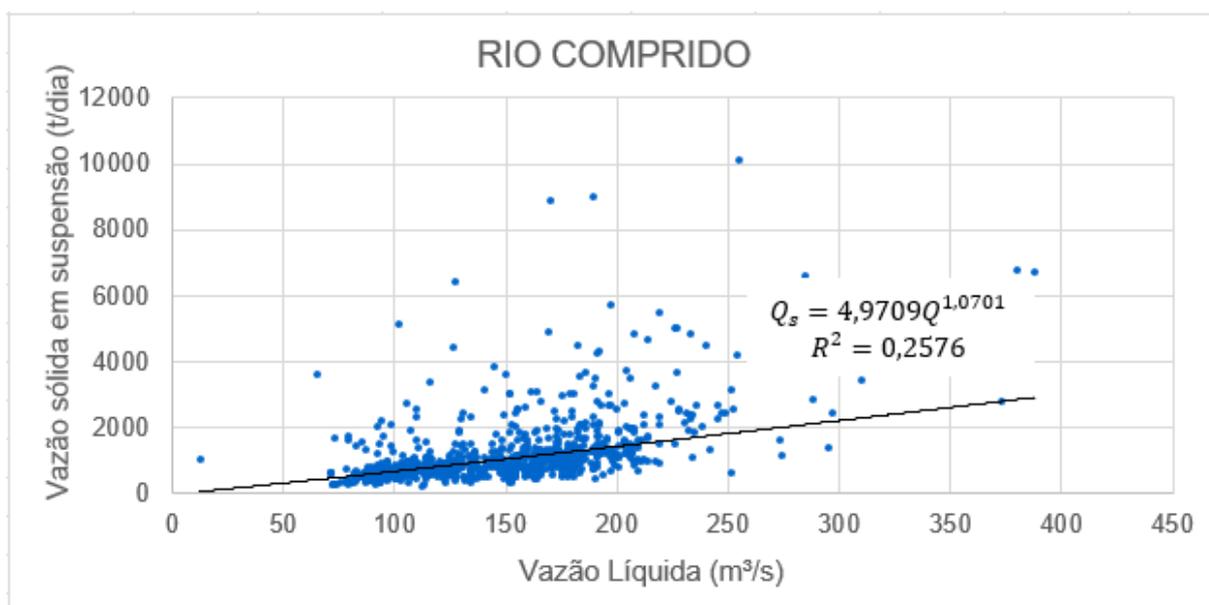


Figura 4.8 – Curva-Chave Sólida na região próxima à seção do posto de Guaratinguetá.

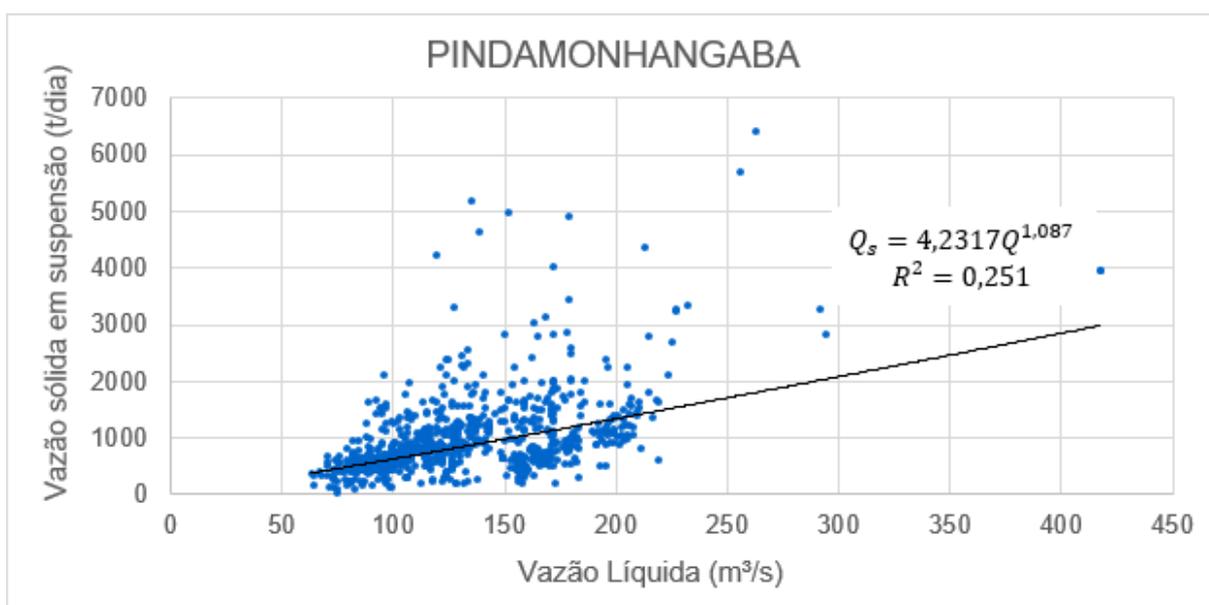


Figura 4.9 – Curva-Chave Sólida na região próxima à seção do posto de Pindamonhangaba.

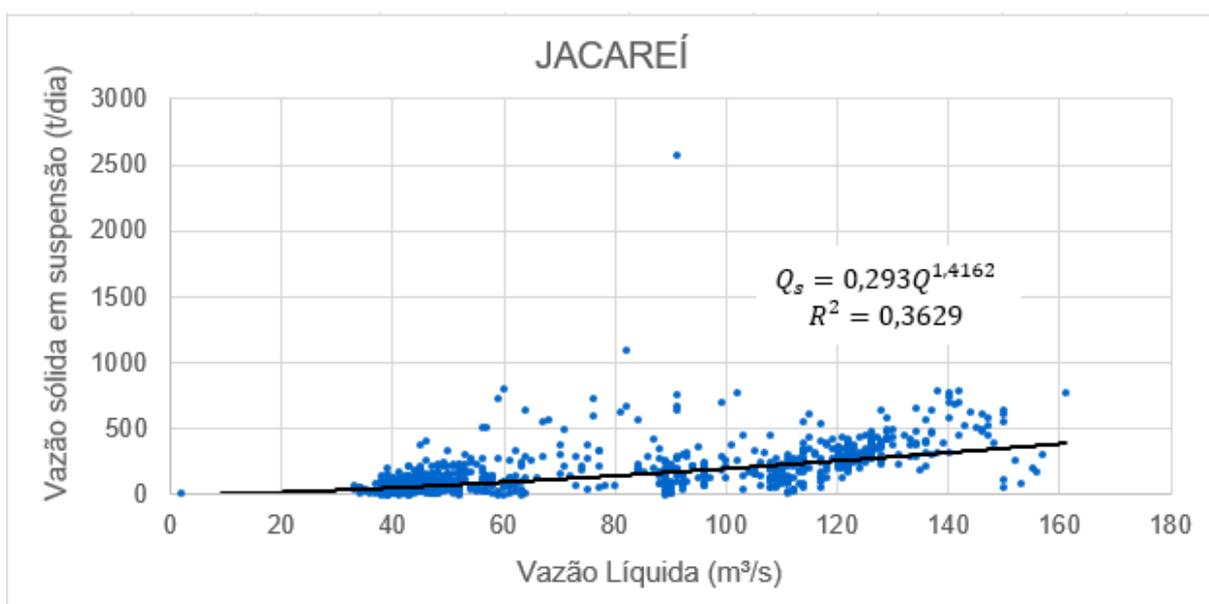


Figura 4.10 – Curva-Chave Sólida na região próxima à seção do posto de Jacareí.

Deve-se observar que a utilização de uma equação de regressão para a estimativa de vazões sólidas, embora seja a alternativa disponível para tanto, possui a desvantagem de não representar adequadamente as vazões sólidas para uma determinada faixa de vazões líquidas. Considerando a dispersão dos dados encontrados em relação ao eixo vertical, principalmente da Figura 4.7 à Figura 4.9, pode-se notar que: os picos de vazão sólida não são reproduzidos devido ao abatimento da curva exponencial em

torno da média; e existe uma menor concentração de pontos para os valores maiores de vazão líquida, o que faz com que as projeções de descarga sólida mais significativas também possam menor peso na equação de regressão.

Em relação aos dados granulométricos dos sedimentos da bacia, foram feitas diversas amostragens ao longo do Rio Paraíba do Sul, com as quais se elaboraram curvas de distribuição de diâmetros característicos (d_{35} , d_{50} e d_{65}) entre a Barragem de Santa Branca e Cachoeira Paulista, como ilustrado na Figura 4.11:

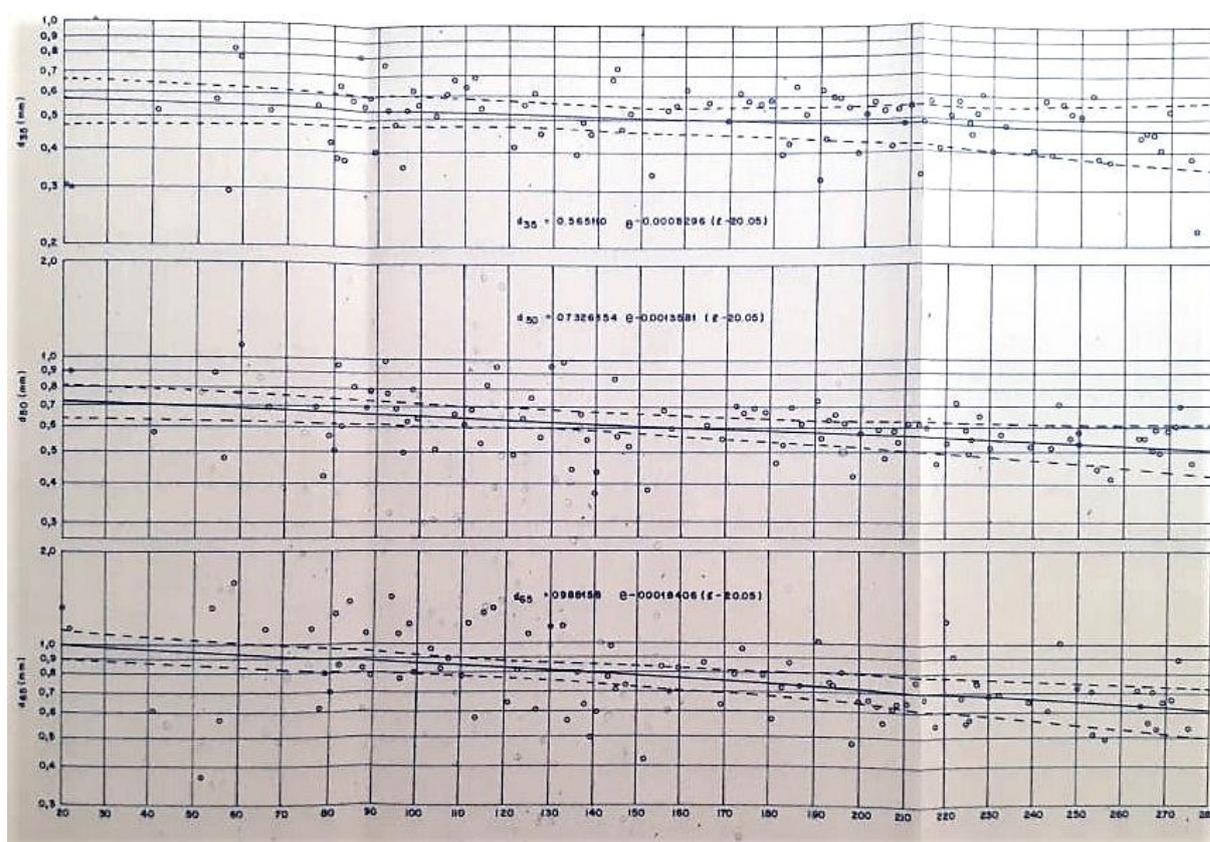


Figura 4.11 - Distribuição dos diâmetros característicos de sedimentos (d_{35} , d_{50} e d_{65}) ao longo do trecho (eixo horizontal: distância longitudinal, de montante para jusante). Fonte: CTH (1981)

Ou seja, de uma forma geral, os sedimentos amostrados no trecho constituem areias médias e grossas, com diâmetros variando entre 0,5 mm e 1,5 mm, aproximadamente. Por isso, adotou-se uma distribuição granulométrica (exibida na Figura 4.12) que buscasse representar essa faixa de variação e os diâmetros característicos, tais quais $d_{35} = 0,5 \text{ mm}$, $d_{50} = 0,6 \text{ mm}$ e $d_{65} = 1,0 \text{ mm}$.

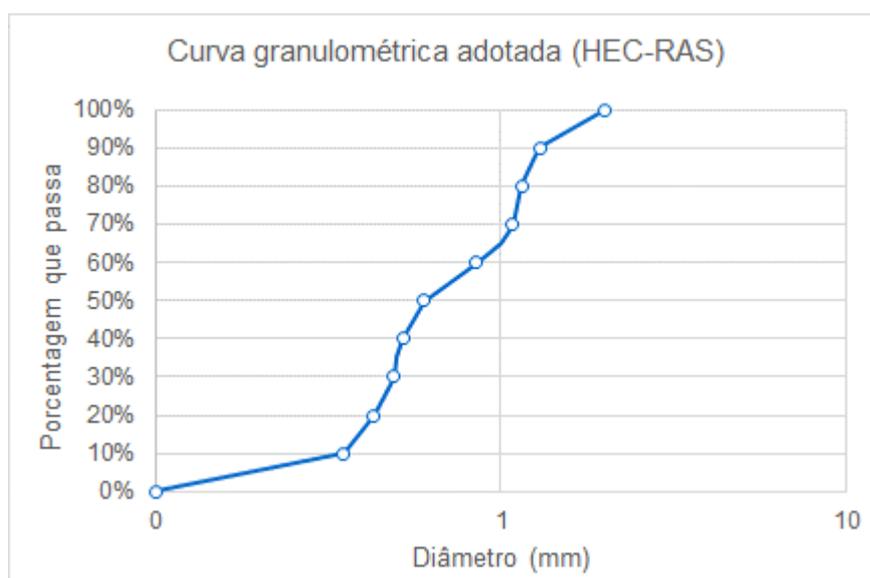


Figura 4.12 - Curva granulométrica adotada para caracterização dos sedimentos do leito do rio.

4.2.3. Curvas batimétricas

Existem representações das seções transversais, feitas uma vez por ano, dos postos da região para os intervalos indicados na Figura 4.13:

ESTAÇÃO / ANOS	1979	1981 - 1990										1991 - 2000										2001 - 2010										2011	2012
	1980																																
JACAREÍ	█																																
PINDAMONHANG.																																	
GUARATINGUETÁ																																	
CACHOEIRA PAUL.																																	

Figura 4.13 - Intervalo de dados disponíveis de seções transversais dos postos da região.

Os relatórios técnicos do convênio DAEE/EPUSP forneceram dados de batimetria de 192 seções transversais dos mais de 200 km do trecho em estudo para os períodos de 1974, 1979 e 1982. Como os dados do último ano se mostraram os mais preenchidos, decidiu-se partir deles para a aplicação do modelo. A folha topográfica da Figura 4.14 exemplifica um trecho de levantamento das seções no trecho paulista do Rio Paraíba do Sul, entre os municípios de Aparecida e Guaratinguetá.

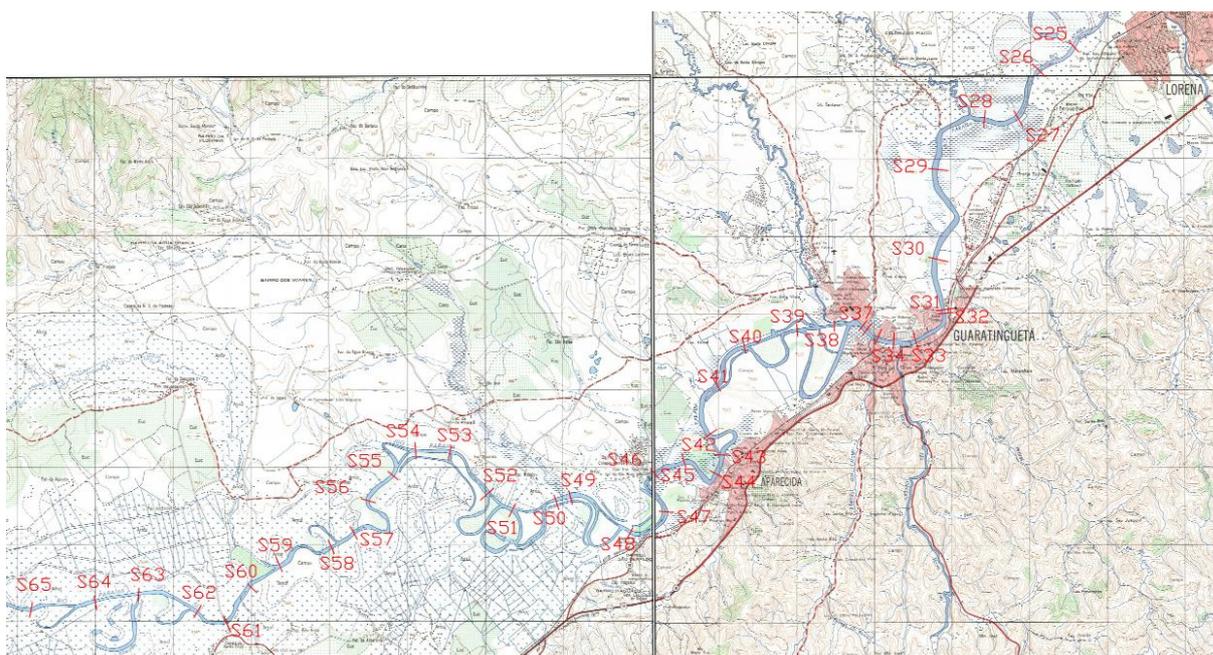


Figura 4.14 - Exemplo de trecho de levantamento das seções transversais no Rio Paraíba do Sul entre as décadas de 1970 e 1980. Fonte: adaptado de IBGE (2019).

A Figura 4.15 exibe um exemplo do traçado de uma seção transversal do levantamento feito em 1981 no município de Guaratinguetá (Seção 33).

Distância acumulada (m)	Altitude (m)	Distância acumulada (m)	Altitude (m)
50	521,15	100	516,11
58	517,77	105	516,16
60	516,27	110	515,88
65	516,08	115	515,97
70	516,77	120	515,90
75	515,92	123	516,60
80	516,00	126	517,04
85	516,12	129	517,77
90	516,29	138	521,43
95	516,13		

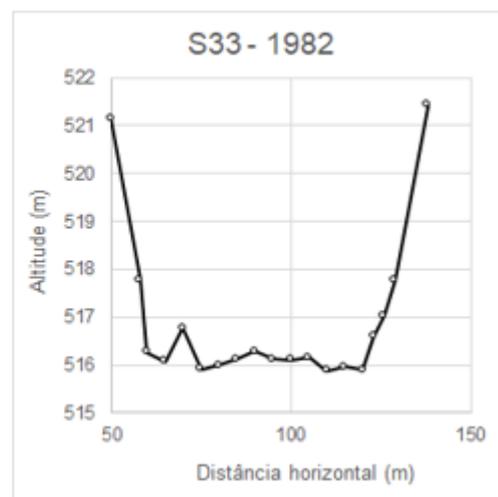


Figura 4.15 - Exemplo de seção transversal levantada no Posto Guaratinguetá (S33) em 1982.

Para os anos seguintes, o portal *hidroweb* da Agência Nacional de Águas disponibiliza uma série anual de dados de batimetria em quatro postos do trecho em estudo: Jacareí, Pindamonhangaba, Guaratinguetá e Cachoeira Paulista.

4.2.4. Resistência ao escoamento

O efeito composto da perda de carga nas seções ao longo do Rio Paraíba do Sul pode ser expresso pelo número de Manning (n). De acordo com (CTH, 1983), sua estimativa foi realizada com o uso do programa Reman, “uma adaptação do software HEC que calcula o remanso para escoamentos gradualmente variados, unidimensionais, em regime torrencial ou fluvial, através do ‘*Standard Step Method*’”. Por iterações, o valor de n foi estimado de modo que a linha d’água calculada coincidissem com a observação de campo para uma dada vazão, usando-se os dados de 1979 a 1982, chegando-se aos resultados do gráfico abaixo.

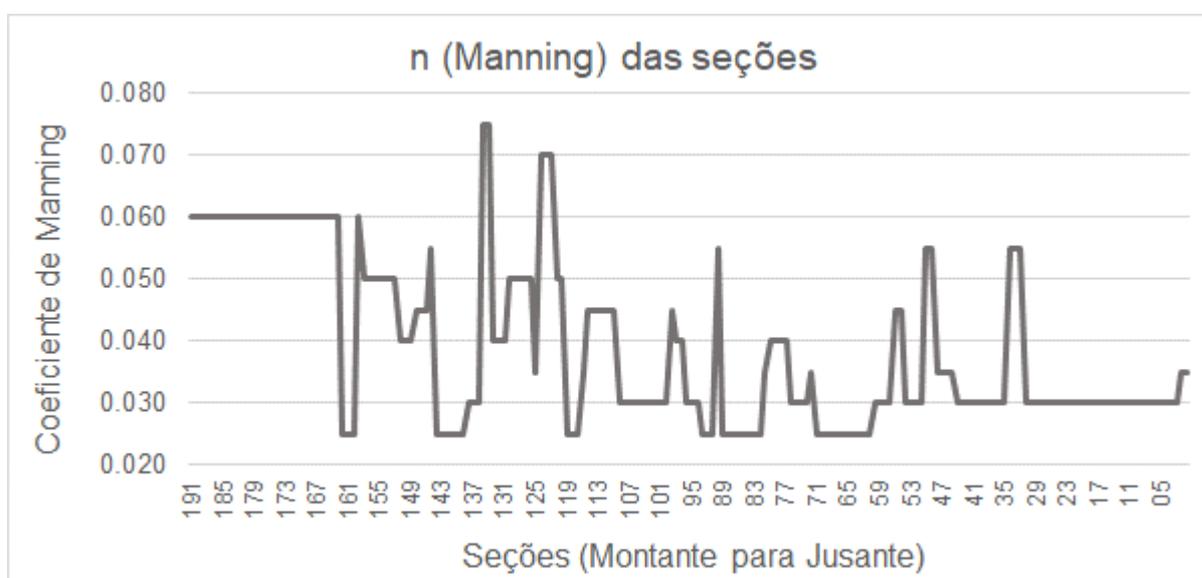


Figura 4.16 - Coeficientes de Manning das seções transversais. Fonte: CTH, 1983.

5. DESENVOLVIMENTO E CALIBRAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL DO RIO PARAÍBA DO SUL

Esta seção inclui os ajustes preliminares e a calibração realizados no programa HEC-RAS, que permitiram dar sequência à fase de simulação de eventos de intervenção antrópica no curso d'água.

5.1. Grade numérica e condições de contorno

O trecho paulista do Rio Paraíba do Sul foi concebido no modelo HEC-RAS como um segmento único de 197.585 m, com 192 seções transversais referentes ao levantamento de campo de 1980 do DAEE (Seção 191 de montante até a Seção 0 de jusante), traduzindo um distanciamento médio de 1.034 m.

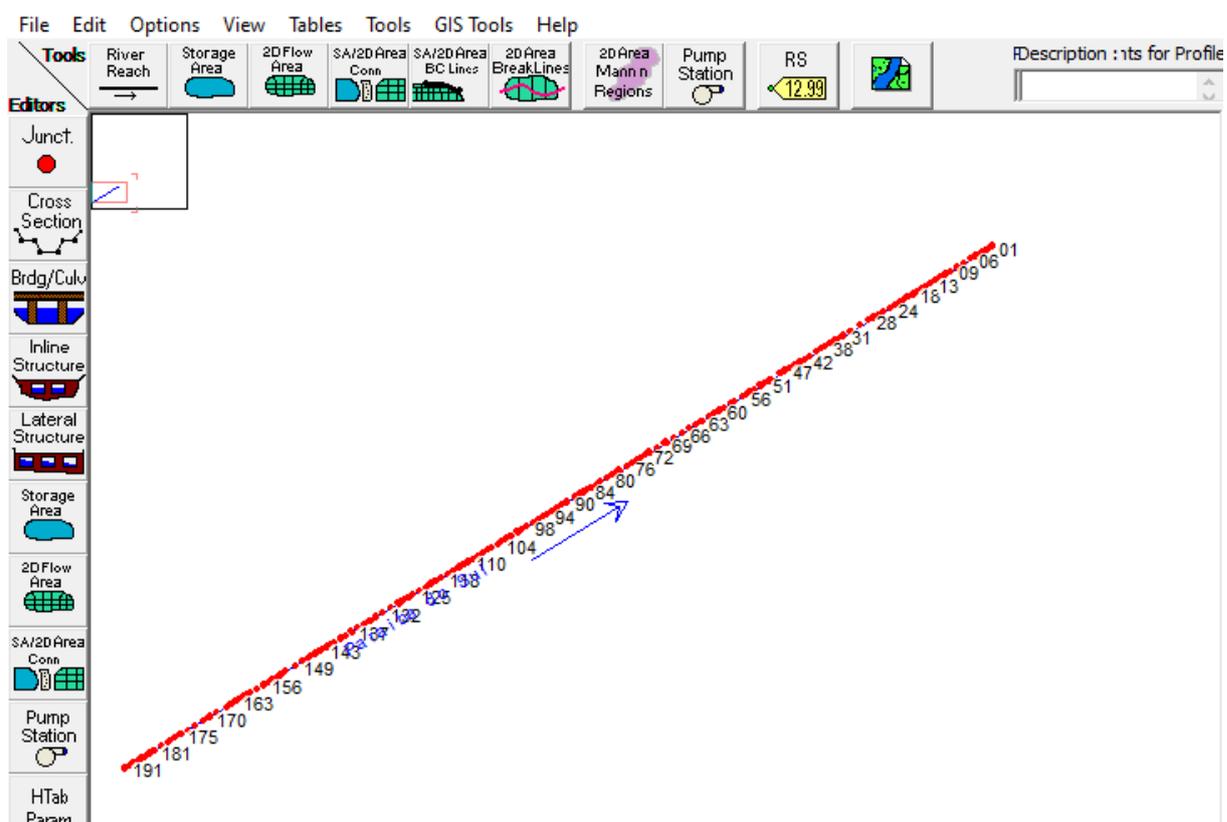


Figura 5.1 - Trecho e seções transversais inseridos no editor de geometria do HEC-RAS.

As condições de contorno do modelo incluem:

- Série de descargas líquidas médias mensais na seção de entrada (S191 - Posto de Jacareí);
- Curva-chave na seção de jusante (S0 – Posto de Cachoeira Paulista), cadastrada por CTH (1983);
- Séries de descargas líquidas laterais uniformemente distribuídas entre as seções 191, 159 (São José dos Campos), 73 (Pindamonhangaba), 33 (Guaratinguetá), 18 (Lorena) e 0, correspondentes às vazões dos afluentes e outras interferências no trecho (Figura 5.2);
- Série de descargas sólidas médias mensais na seção 191;
- Séries de descargas sólidas uniformemente distribuídas entre as seções 191, 159, 73, 33, 18 e 0, de acordo com curvas-chaves sólidas (Figura 5.2).

A Figura 5.2 ilustra a aplicação dos dados de vazão líquida e sólida laterais uniformes aplicadas na grade numérica representando o trecho do Rio Paraíba do Sul.

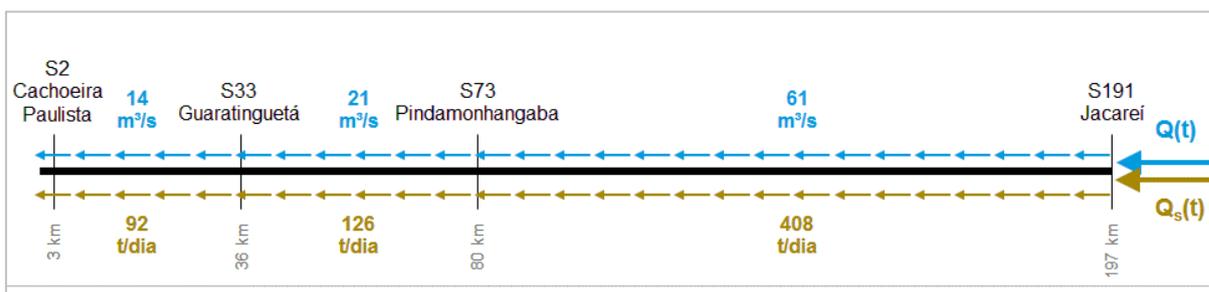


Figura 5.2 - Dados de entrada aplicados no trecho em estudo.

Segundo as características granulométricas e hidráulicas do trecho do Rio Paraíba do Sul, considerou-se que a equação de Toffaleti, apresentada no item 2.3.3.1, seria, a princípio, a mais apropriada para as simulações previstas. Além disso, os seguintes parâmetros do programa foram estabelecidos:

- Período de simulação: 1982 a 2012 (30 anos)
- Temperatura média da água: 20 °C;
- Método de encouraçamento de fundo: Thomas (Exner 5);
- Equação da velocidade de queda da partícula: Método de Ruby (Padrão);
- Profundidade máxima de erosão: variável (até 6 m), segundo investigação geomorfológica disponível em CTH (1981), em que o fundo fixo é admitido

quando da presença da formação geológica escudo cristalino, como ilustrado na Figura 4.2, e esquematizado na Figura 5.3, tomando-se a profundidade zero como o talvegue do curso d'água.

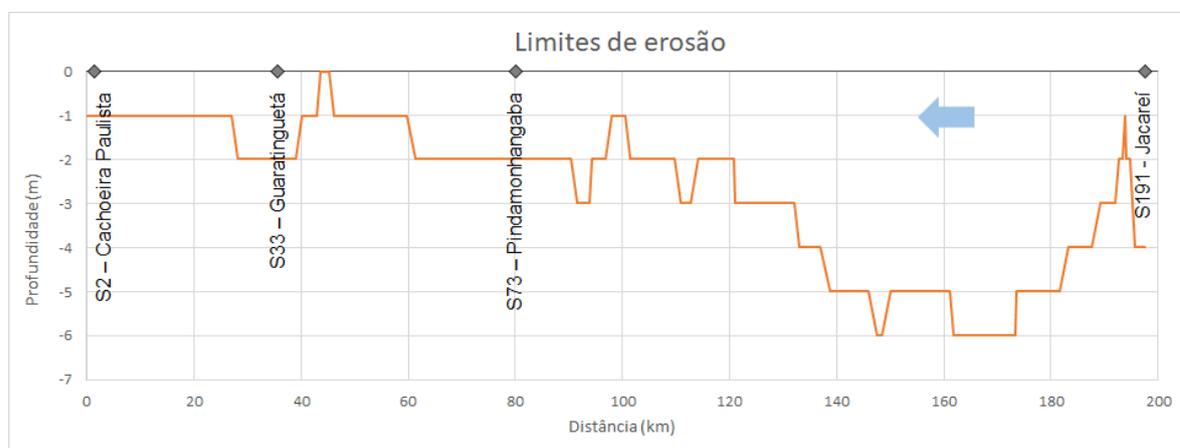


Figura 5.3 - Limites de erosão admitidos no trecho em estudo, com base em CTH (1981).

5.2. Extrações de areia

Além dos dados utilizados como condição de contorno na construção do modelo, referidos anteriormente, deve-se considerar ainda as extrações antrópicas de areia que ocorrem em todo o trecho em estudo, incluídas no esquema da Figura 5.2.

Estimar a magnitude e distribuição dessas extrações, no entanto, depende de se encontrar registros das atividades de entidades mineradoras ao longo dos últimos anos, desconsiderando, a princípio, as atuações não regularizadas por órgãos de controle no corpo hídrico. Contatando-se os órgãos públicos gestores, não foi possível lograr êxito em encontrar quaisquer dados de extração de areia, sendo possível somente atestar a existência de cavas submersas através de imagens de satélite, prática esta disseminada ao longo do rio.

Como alternativa à carência de dados, recorreu-se a fontes que estimam o consumo anual de areia em alguns municípios paulistas localizados próximos ao Rio Paraíba do Sul. IPT (2013) apresenta essa estimativa para 15 municípios no Ordenamento Territorial Geomineiro do Vale do Paraíba, com dados de produção, consumo, exportação e importação anuais de areia, como exibido na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Estimativas de produção anual de areia de municípios do Vale do Paraíba (IPT, 2015).

Municípios do OTGM Vale do Paraíba	Produção Estimada Anual (t)	População (IBGE/2014)	Consumo Estimado Anual (t)	Município Exportador de Areia	Município Importador de Areia
Aparecida	720.000	36.184	79.605	640.395	
Caçapava	2.430.000	90.426	198.937	2.231.063	
Cachoeira Paulista	540.000	32.046	70.501	469.499	
Canas	360.000	4.788	10.534	349.466	
Cruzeiro	90.000	80.749	177.648		-87.648
Guaratinguetá	180.000	118.378	260.432		-80.432
Jacareí	3.420.000	224.826	494.617	2.925.383	
Lavrinhas	-	7.002	15.404		-15.404
Lorena	360.000	86.764	190.881	169.119	
Pindamonhangaba	1.980.000	158.864	349.501	1.630.499	
Potim	540.000	21.984	48.365	491.635	
Roseira	1.080.000	10.257	22.565	1.057.435	
São José dos Campos	-	681.086	1.498.389		-1.498.389
Taubaté	1.890.000	299.423	658.731	1.231.269	
Tremembé	1.710.000	44.399	97.678	1.612.322	
TOTAL	15.300.000	1.897.176	4.173.787		

Fonte: SINDAREIA (2014).

É preciso então tentar relacionar os dados de “Produção Estimada Anual” com os quantitativos mássicos anuais extraídos das seções considerando as formas pelas quais a areia é produzida nos municípios e sabendo-se como as seções estão distribuídas entre eles. Sabe-se, no entanto, que esse cálculo gerará uma estimativa que indica apenas uma ordem de grandeza da extração na seção, já que se tem como resultado um valor médio e igualmente distribuído no tempo e no espaço do município.

De acordo com Silva (2011), “(...) nacionalmente, o panorama é de 90% de extração de areia de leitos de rio e apenas 10% em cava seca (desmonte hidráulico). No Estado de São Paulo, 45% são provenientes de várzeas, 35% de leito de rios e o restante das outras fontes”. Portanto, de toda a produção mineral anual de cada município do OTGM, adotou-se que cerca de 35% sejam provenientes da extração no leito do rio.

Com essa estimativa, novamente, tem-se uma ordem de grandeza do volume de areia retirado do Rio Paraíba do Sul por ano, no trecho paulista, que é reproduzida na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Extrações anuais estimadas por cidade.

Cidade	Produção anual (t)	Extração anual (t)
Aparecida	720.000	252.000
Caçapava	2.430.000	850.500
Cachoeira Paulista	540.000	189.000
Canas	360.000	126.000
Cruzeiro	90.000	31.500
Guaratinguetá	180.000	63.000
Jacareí	3.420.000	1.197.000
Lavrinhas	-	-
Lorena	360.000	126.000
Pindamonhangaba	1.980.000	693.000
Potim	540.000	189.000
Roseira	1.080.000	378.000
São José dos Campos	-	-
Taubaté	1.890.000	661.500

As estimativas de extração anual de areia em cada cidade permitem o cálculo do valor médio da extração por seção, através de uma simplificação em que a retirada de material se dá em uma área cujo centro de massa é a própria seção. Dentro dessa área, existe um certo número de seções transversais que estão representadas no modelo computacional, e é com esse quantitativo que o volume de extração é distribuído em torno da seção central de uma cidade. A Tabela 5.3 apresenta esses resultados.

Tabela 5.3 - Extrações de areia estimadas por ano, por seção.

Cidade	Extração anual t/ano	Seção intermediária a Montante	Seção intermediária a Jusante	Seções	Extração por seção t/ano
-	-	-	-	-	-
Aparecida	252.000	46	40	7	36.000
Caçapava	850.500	150	137	14	60.750
Cachoeira Paulista	189.000	04	00	5	37.800
Canas	126.000	06	04	3	42.000
Guaratinguetá	63.000	40	30	11	5.727
Jacareí	1.197.000	191	179	13	92.077
Lorena	126.000	30	06	25	5.040
Pindamonhangaba	693.000	80	67	14	49.500
Potim	189.000	47	46	2	94.500
Roseira	378.000	67	47	21	18.000
Taubaté	661.500	137	134	4	165.375
Tremembé	598.500	134	80	55	10.881

Como a cidade de Cruzeiro está fora do trecho em estudo e as cidades de Lavrinhas e São José dos Campos não apresentaram produção anual mineral, elas não foram listadas na tabela acima.

Devido à escassez de dados dentro desse assunto, estabeleceu-se essas mesmas intensidades de extrações de areia para todos os anos do intervalo de calibração do modelo, de 1982 a 2012.

5.3. Calibração do módulo hidrodinâmico

A etapa de calibração do modelo computacional incluiu a calibração de seu módulo hidrodinâmico em que, utilizando-se uma série de médias mensais a partir da série de vazões diárias disponíveis nas estações fluviométricas, pôde-se realizar uma comparação entre os dados de campo e os resultados do HEC-RAS para verificar a adequação da resposta do modelo.

Como os fatores de resistência ao escoamento, expressos pelo número de Manning, já foram calibrados nas seções transversais, restou comparar a série de vazões observadas e as calculadas pelo modelo nas seções dos postos de Pindamonhangaba, Guaratinguetá e Cachoeira Paulista.

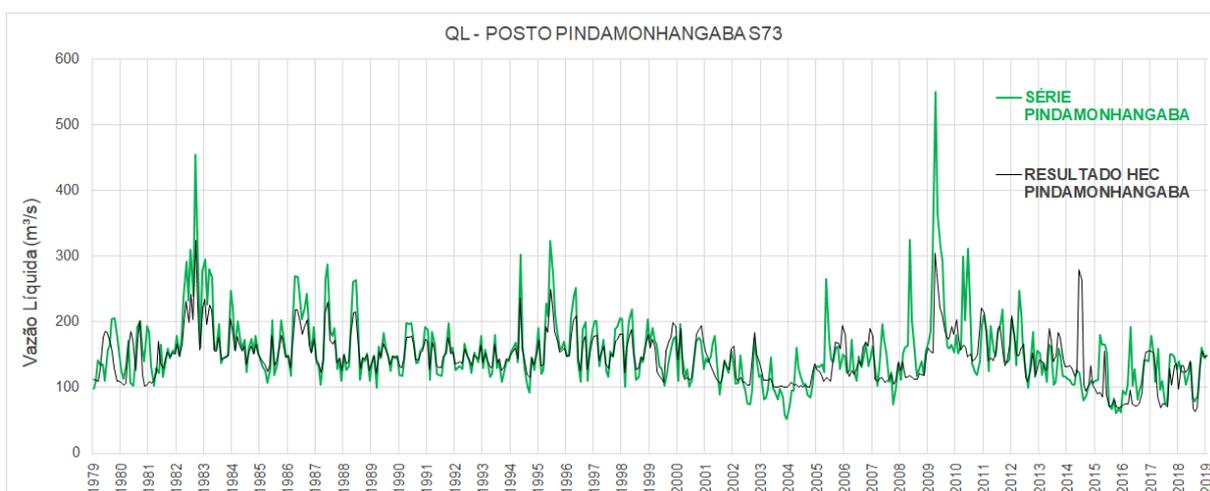


Figura 5.4 - Comparação entre as séries de vazão líquida de Pindamonhangaba e gerada pelo modelo.

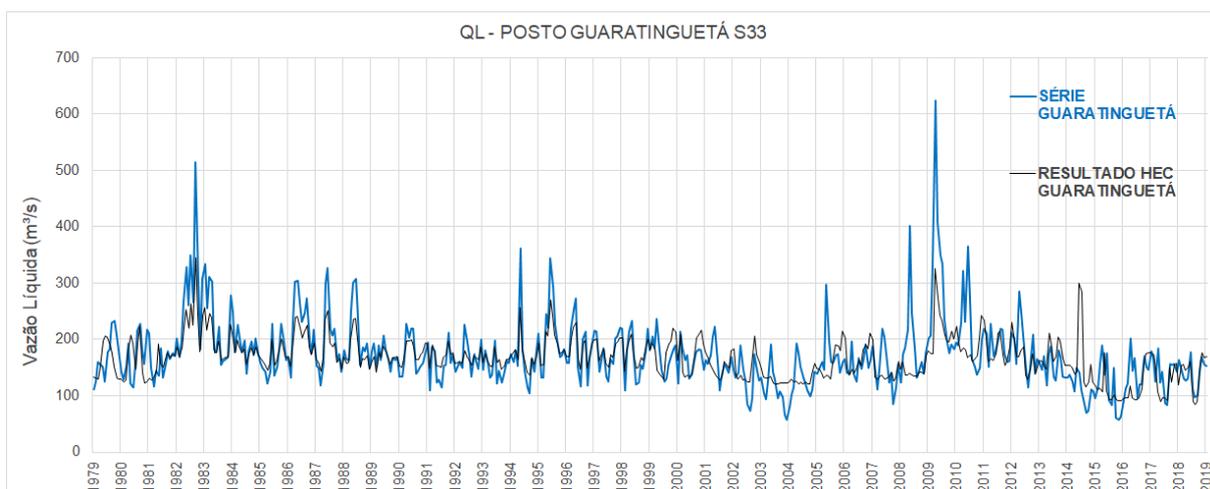


Figura 5.5 - Comparação entre as séries de vazão líquida de Guaratinguetá e gerada pelo modelo.

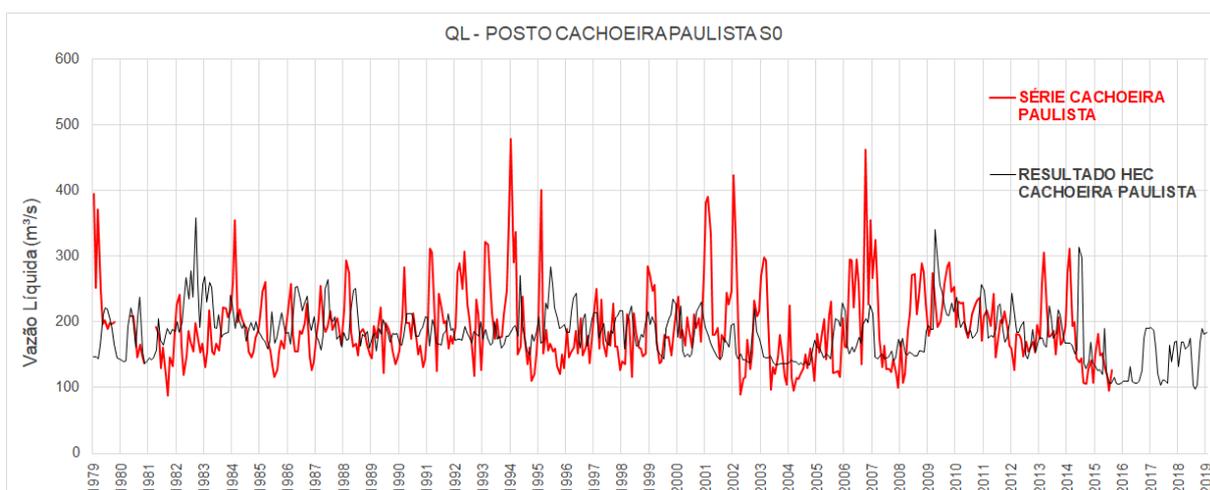


Figura 5.6 - Comparação entre as séries de vazão líquida de Cachoeira Paulista e gerada pelo modelo.

Observando-se as Figura 5.4 a Figura 5.6, percebe-se que a proximidade entre as séries comparadas é razoável, ao menos em termos médios. No gráfico de Cachoeira Paulista, existe uma maior divergência entre os picos e vales, e uma aparente defasagem entre as duas séries.

Utilizando o indicador estatístico NRMSD (desvio quadrático médio normalizado) para avaliar a diferença entre as vazões observadas e as advindas do modelo, chega-se aos valores exibidos na Tabela 5.4.

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{mod,i} - Q_{obs,i})^2}{n}} \quad (5.1)$$

$$NRMSD = \frac{RMSD}{\bar{Q}} \quad (5.2)$$

Onde:

$Q_{mod,i}$: valor calculado pelo modelo;

$Q_{obs,i}$: valor observado;

n: tamanho da amostra;

\bar{Q} : valor médio das observações.

Considerando, como regra prática, que valores de NRMSD até 0,10 são tidos como ótimos; entre 0,10 e 0,25, como bons, entre 0,25 e 0,50, como regulares; e acima de 0,50, como ruins, em termos da aderência do modelo às observações de campo.

As séries de São José dos Campos e Rio Comprido não foram analisadas pelo fato de possuírem poucos dados.

Tabela 5.4 - Valores de NRMSD para calibração do modelo.

	Pindamonhan gaba	Guaratinguetá	Lorena	Cachoeira Paulista
NRMSD	0,23	0,25	0,18	0,31

Sendo assim, pode-se dizer que os resultados do modelo atendem satisfatoriamente aos dados observados, pois possuem NRMSD menor ou igual a 0,2 ~ 0,3.

5.4. Calibração do módulo de transporte de sedimentos

A partir das condições impostas e descritas no item 5.1, o modelo HEC-RAS gerou seções transversais segundo a resolução das equações hidrodinâmica e de transporte de sedimentos. O balanço de massa de sedimentos efetuado em um volume de

controle computa as variações de volume e, assim, permite ao software calcular o rebaixamento ou elevação dos pontos da seção transversal, representando, respectiva e simplificada, os processos erosivos e depositantes, como explicado no item 2.3.5.

A etapa de calibração do módulo de transporte de sedimentos do modelo envolveu, principalmente, a análise da evolução das seções transversais em que se dispõe de informações a respeito de suas variações ao longo dos anos. Nessa análise, foi feita uma comparação da variação da área das seções transversais simuladas e observadas para se verificar a adequação das condições estabelecidas no modelo.

Era esperado que, num primeiro momento, utilizando os dados de entrada e os parâmetros de cálculos estabelecidos no modelo, a simulação computacional não apresentasse resultados compatíveis com as referências de campo. Por isso, fizeram-se necessários ajustes nas condições de entrada e de cálculo para que fosse possível atingir esse objetivo, ou seja, os ajustes foram feitos até que o modelo pudesse ser considerado como satisfatoriamente calibrado.

Embora seja uma simplificação conveniente, a adoção de vazões sólidas uniformemente distribuídas e correlacionadas com a vazão líquida segundo uma equação de regressão, tem grande potencial para gerar distorções em relação à real distribuição da carga de sedimentos na bacia. Por isso, o principal ponto de ajuste e de maior efetividade verificada compreendeu a alteração da relação entre as vazões sólidas e líquidas da grade numérica.

Nos trechos em que houve uma inversão de tendência dos processos erosivos, atuou-se de modo a restabelecer a concordância dos fenômenos simulados e observados de modo que:

- Onde fosse computado erosão quando era observado deposição, aumentou-se a descarga sólida;
- Onde fosse computado deposição quando era observado erosão, reduziu-se a descarga sólida.

Vale destacar que essa mecânica foi efetuada levando em consideração a manutenção da dinâmica sedimentar global prevista no trecho em estudo de quase 200 km. Ou seja, as alterações (aumento ou redução) nas contribuições em um dado trecho foram compensadas nos outros dois trechos (vide Figura 5.2), de tal forma que o volume de aporte total foi mantido entre as seções S191 e S0.

Dessa forma, promoveram-se, iterativamente, variações na descarga sólida lateral dos trechos, até que se chegou à variação final necessária para se obter uma aderência satisfatória com os dados observados nas três seções do estudo:

Jacareí - Pindamonhangaba:

+130 t/dia (aumento da descarga sólida para reduzir a erosão)

Vazão sólida final: $408 + 130 = 538$ t/dia

Pindamonhangaba - Guaratinguetá:

-80 t/dia (redução da descarga sólida para aumentar a erosão)

Vazão sólida final: $126 - 80 = 46$ t/dia

Guaratinguetá - Cachoeira Paulista:

-50 t/dia (redução da descarga sólida para aumentar a erosão)

Vazão sólida final: $92 - 50 = 42$ t/dia

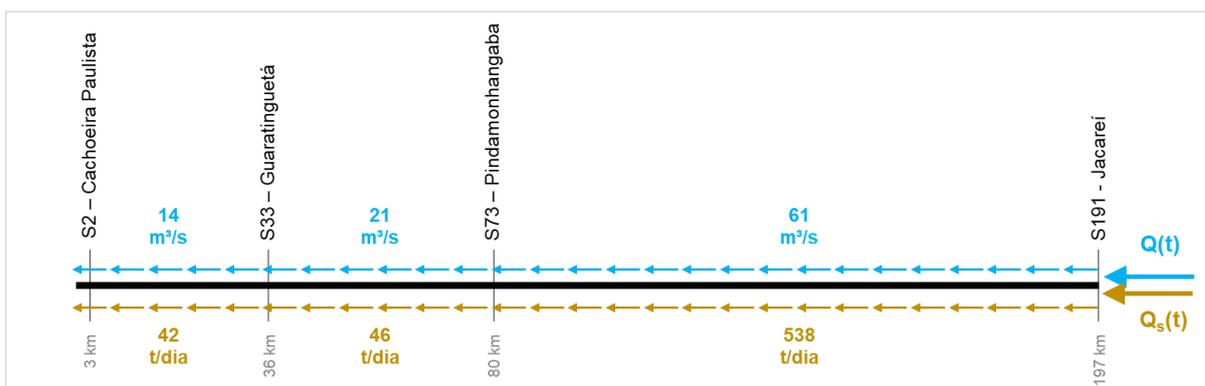


Figura 5.7 - Nova entrada de dados de vazão sólida lateral que permite melhor resultado na calibração.

A seguir, são apresentados os resultados da calibração associados à série de dados de entrada ilustrado na Figura 5.7.

5.4.1. Perfil longitudinal do rio

Com o conjunto de alterações geométricas das 192 seções do modelo, as conseqüentes variações de fundo do canal foram registradas. Usando a opção de exibição de variação leito do rio (*Channel invert variation*), comparou-se a posição de seções observadas com o calculado pelo modelo. Das quatro seções levantadas em campo, uma (Jacareí – S191) está na fronteira de entrada de dados do modelo, por esse motivo, somente as demais são comparadas (Pindamonhangaba – S73, Guaratinguetá – S33, Cachoeira Paulista – S02), como ilustrado na Figura 5.8.



Figura 5.8 - Variação da cota do talvegue de 1982 a 2012.

Percebe-se que a variação simulada do leito do rio se mostrou relativamente próxima daquela observada nos três postos fluviométricos mencionados anteriormente. Mais importante, as tendências de erosão e deposição em cada um deles ficaram concordantes, ocorrendo a primeira nas seções 33 e 73, e a segunda na seção 02.

5.4.2. Seções transversais

A variação das seções transversais ao longo do período de simulação foi analisada para os três postos considerados no item 5.4.1, em uma série anual.

Primeiramente, é exibida a evolução da seção transversal de acordo com os dados de campo e com a simulação do modelo. Como ilustrado na Figura 5.9 e na Figura 5.10, no posto de Cachoeira Paulista.

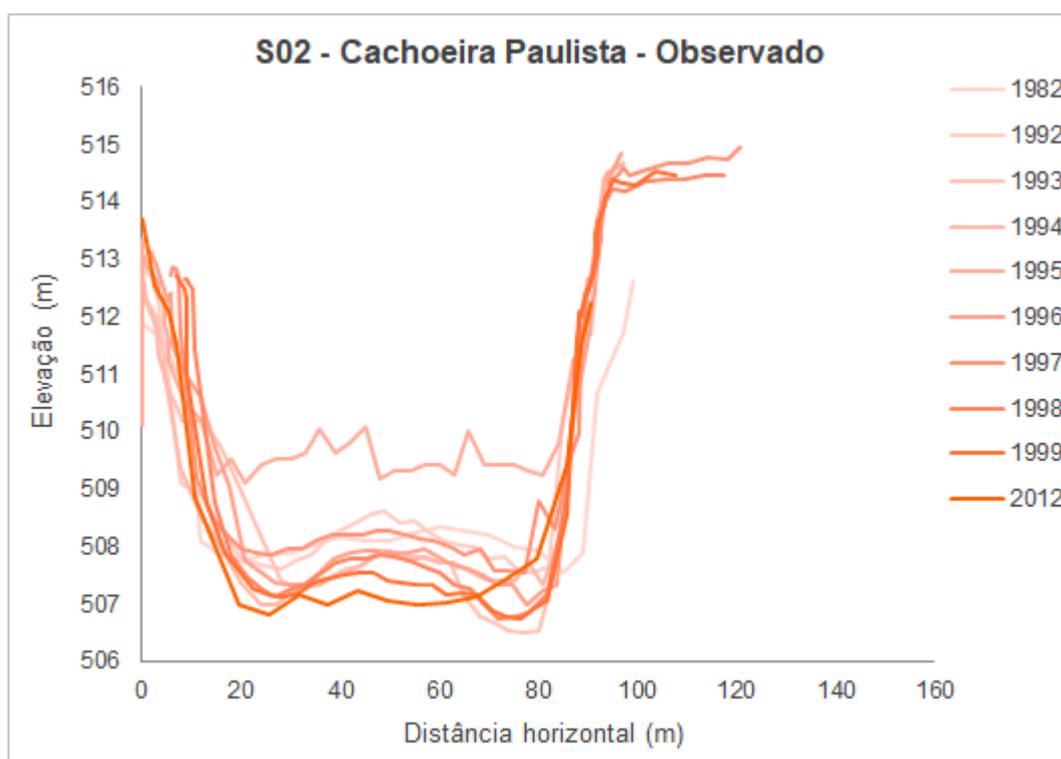


Figura 5.9 - Variação observada das seções transversais do posto Cachoeira Paulista – S02.

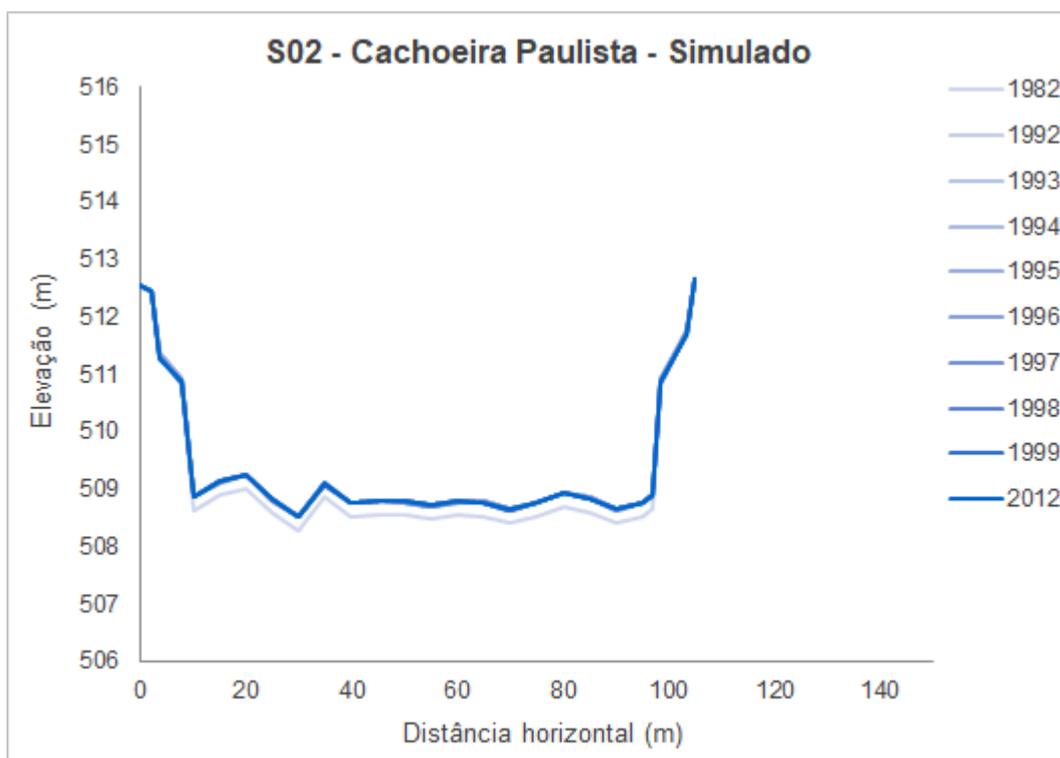


Figura 5.10 – Variação calculada das seções transversais do posto Cachoeira Paulista – S02.

Com a finalidade de comparação entre os dados de campo e os resultados do HEC-RAS, dispôs-se exemplos de seções observadas e simuladas em um conjunto de gráficos, como ilustrado na Figura 5.11.

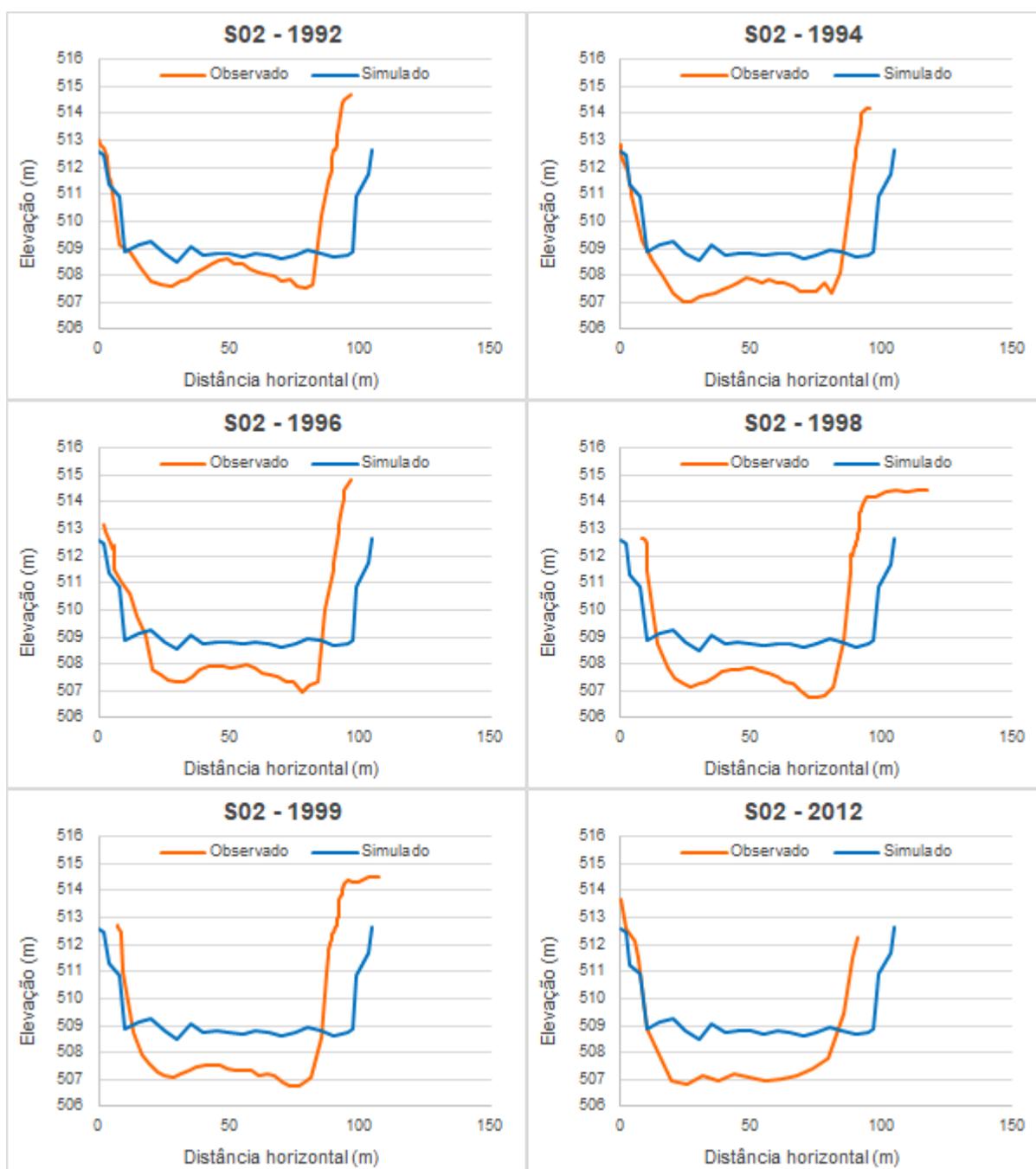


Figura 5.11 - Comparação entre as seções observadas e resultantes da simulação do HEC-RAS na fase de calibração (Posto de Cachoeira Paulista).

Para se comparar em termos quantitativos a evolução morfológica das seções de cada posto, adotou-se como critério a variação acumulada da área interna à seção transversal. Na Figura 5.12, se ilustra a convenção de sinais adotada para os fenômenos de erosão e deposição, quando se efetua a diferença de área entre a seção em um ano qualquer e outra referente a um ano inicial. Nesta convenção, as erosões são admitidas como positivas, pois implicam aumento da área livre da seção,

enquanto as deposições são tidas como negativas, pois implicam redução da área da seção.

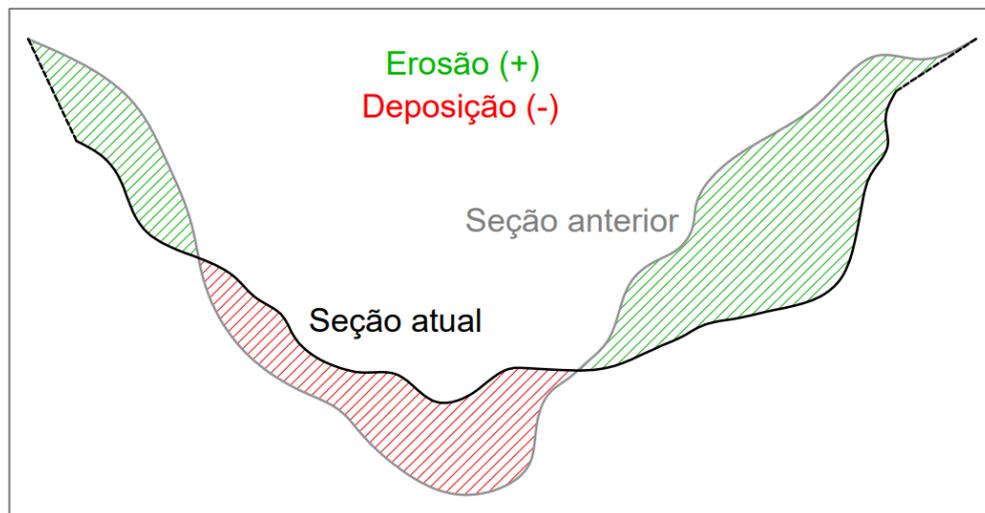


Figura 5.12 - Convenção de sinais de variação de área de acordo com o fenômeno de transporte de sedimentos.

Na Figura 5.13, está exibida a variação acumulada da área da seção transversal do posto de Cachoeira Paulista, nos anos em que estão disponíveis os dados de batimetria.

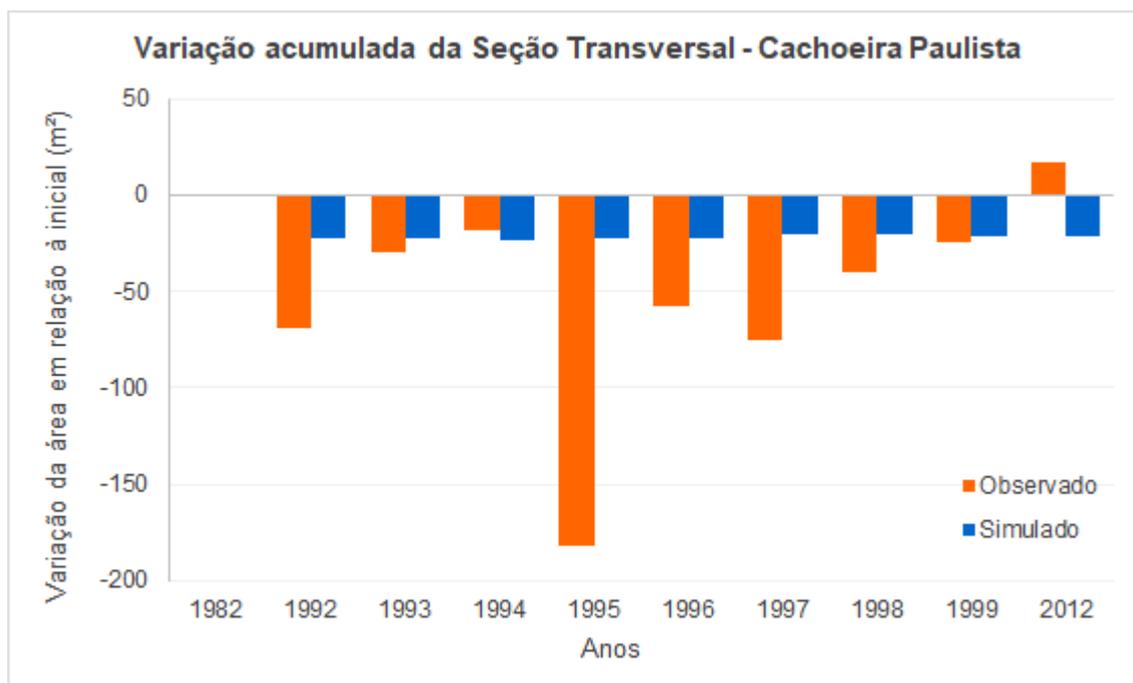


Figura 5.13 - Variação acumulada de área da S02 - Cachoeira Paulista.

Juntamente com o auxílio dos gráficos da Figura 5.11, é possível perceber que a deposição na seção transversal observada se deve pela redução de sua largura (as seções simuladas mudam de geometria somente na direção vertical) enquanto o modelo computacional refletiu o fenômeno através da elevação do leito do rio.

Apesar disso, nas datas de 1995 e 2012 houve diferenças mais significativas com a realidade. Para se analisar essa ocorrência, comparou-se o posto de Cachoeira Paulista com um relativamente próximo, 58230100 – Cruzeiro, conforme ilustra a Figura 5.14.

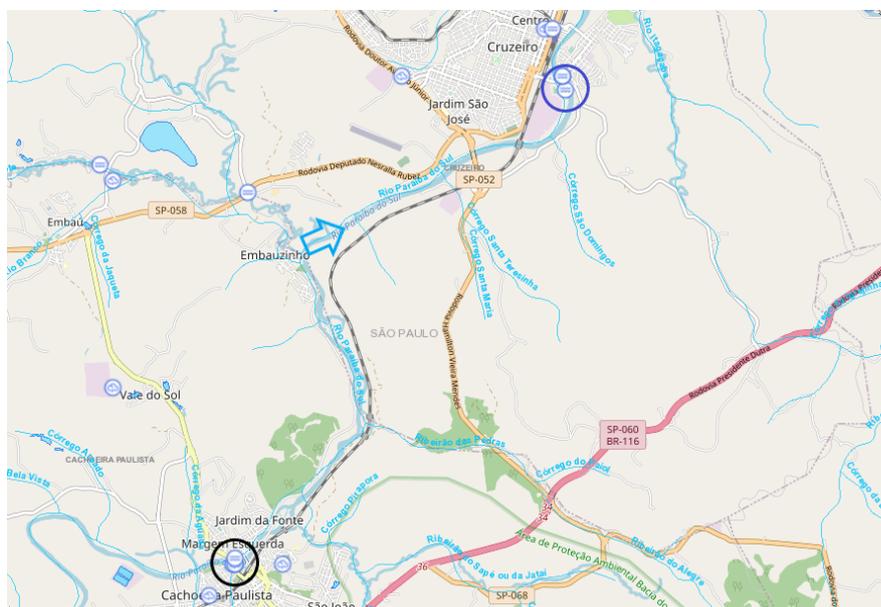


Figura 5.14 - Localização dos postos objetos de comparação, Cachoeira Paulista (círculo preto) e Cruzeiro (círculo azul). Fonte: adaptado do hidroweb ANA.

No primeiro caso, 1995, pode-se apontar a ocorrência de um evento singular que levou a uma deposição excessiva na seção ou mesmo de um erro durante o levantamento batimétrico. Analisando-se a série de vazões líquidas entre os dois postos, percebe-se que esse é um período em que as vazões atingem picos bem maiores do que o comum, podendo-se considerar como um momento de elevada deposição de sedimentos na seção (primeiro intervalo em vermelho na Figura 5.15).

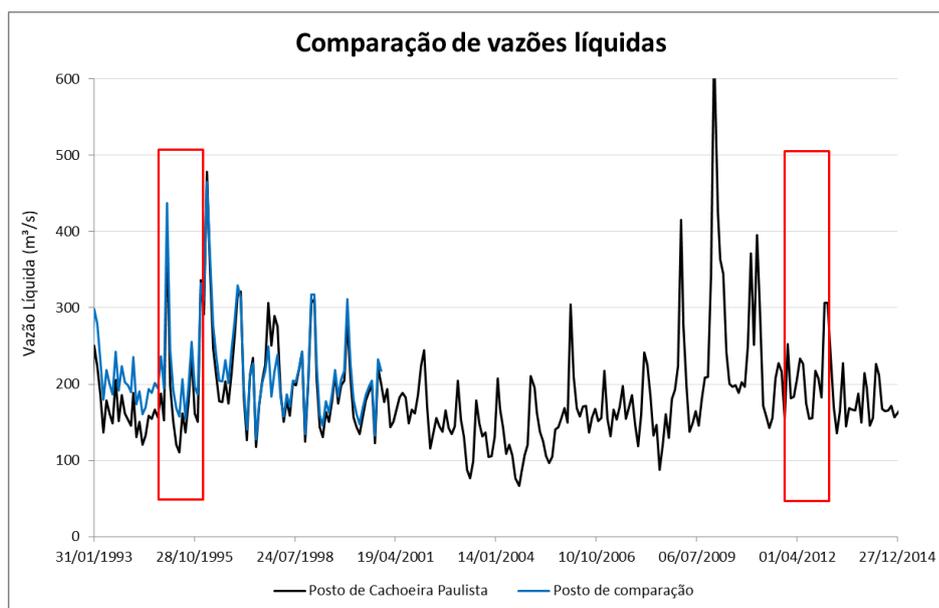


Figura 5.15 - Comparação de série de vazões líquidas entre o posto Cachoeira Paulista e posto vizinho.

Já no segundo caso, 2012, a falta de dados de batimetria entre 1999 e 2012 (ver Figura 4.13) dificulta o monitoramento das alterações que ocorreram na seção, podendo-se considerá-la como um fator que explicaria a mudança de tendência observada. Até mesmo por que, houve novamente um pico de vazões (maior da série) por volta de 2010 que pode ter alterado significativamente a configuração das seções batimétricas, como ilustrado no segundo intervalo em vermelho da Figura 5.15.

A seção seguinte, S33 - Guaratinguetá, apresentou erosões como indicado na Figura 5.16 e na Figura 5.17.

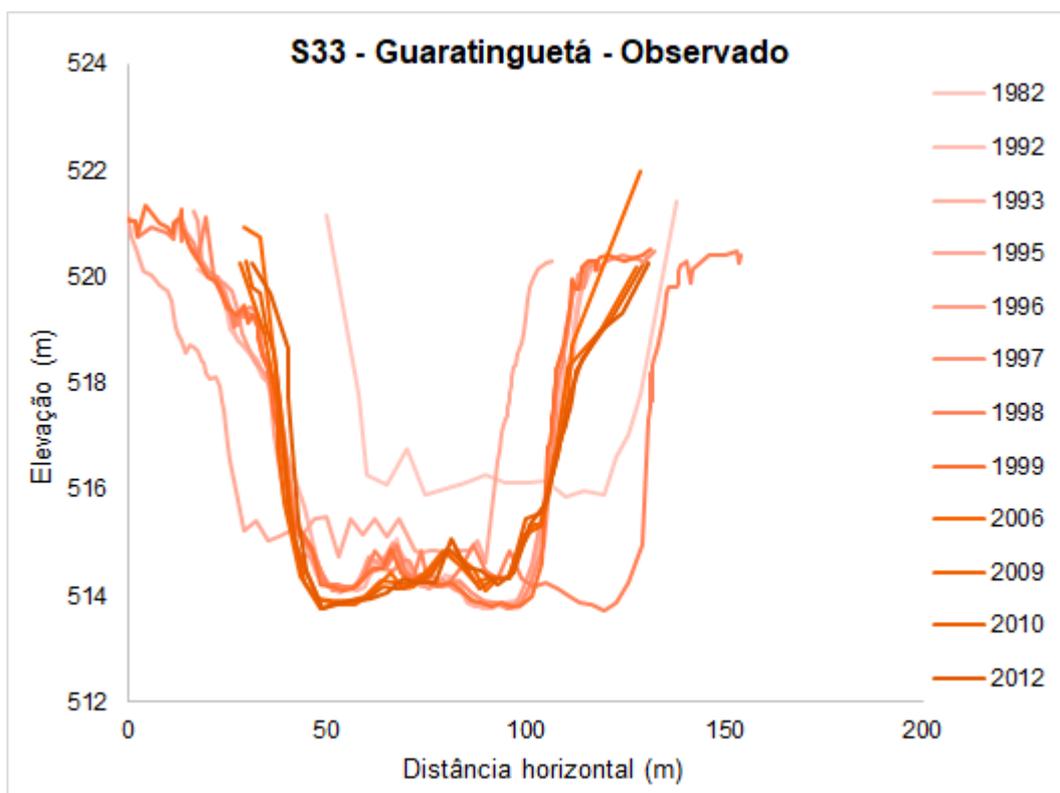


Figura 5.16 – Variação observada das seções transversais do posto Guaratinguetá – S33.

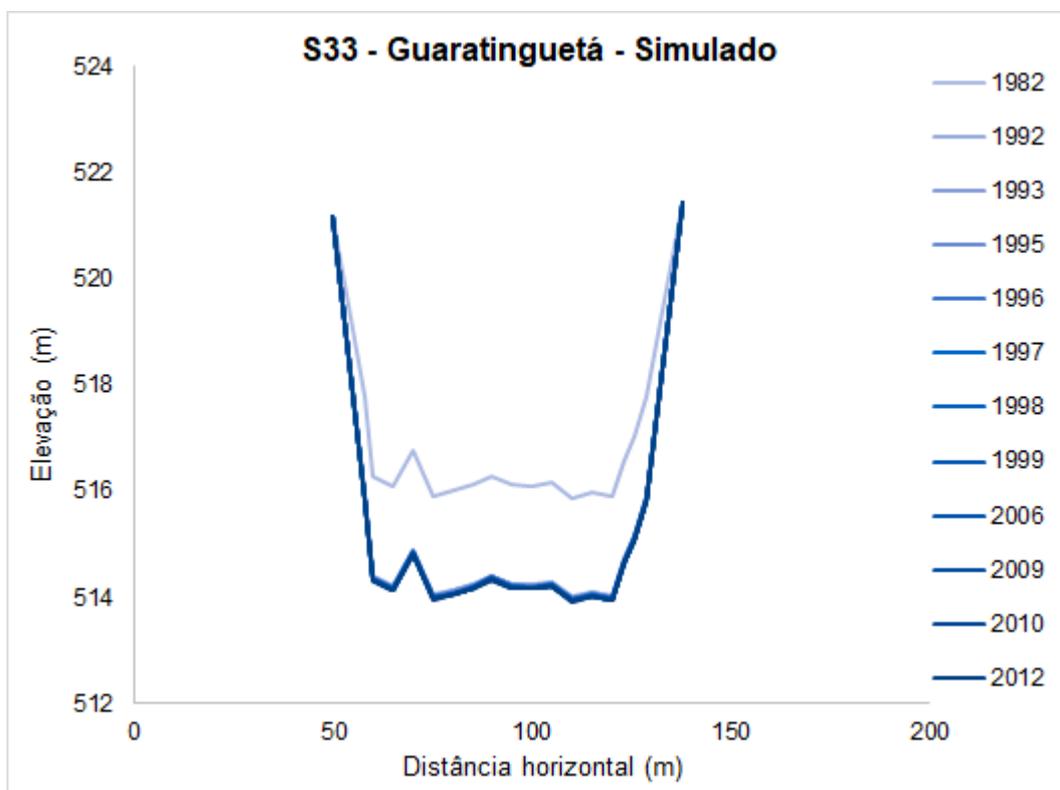


Figura 5.17 – Variação calculada das seções transversais do posto Guaratinguetá – S33.

A comparação entre as variações da seção transversal observada e simulada do posto de Guaratinguetá é apresentada na Figura 5.18.

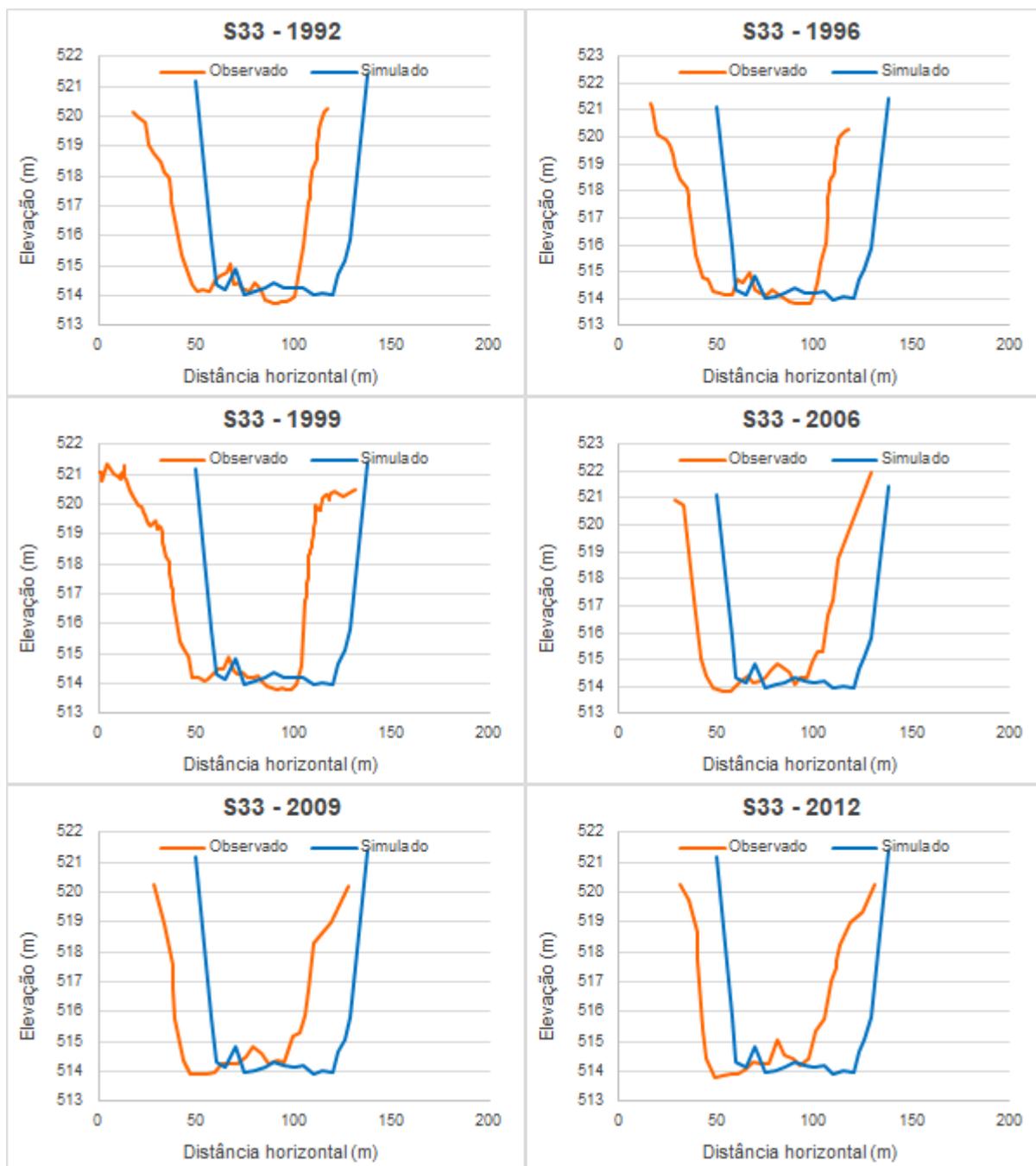


Figura 5.18 - Comparação entre as seções observadas e resultantes da simulação do HEC-RAS na fase de calibração (Posto de Guaratinguetá).

No gráfico da Figura 5.19, pode-se verificar a proximidade entre os resultados de erosão das seções observadas e simuladas no modelo.

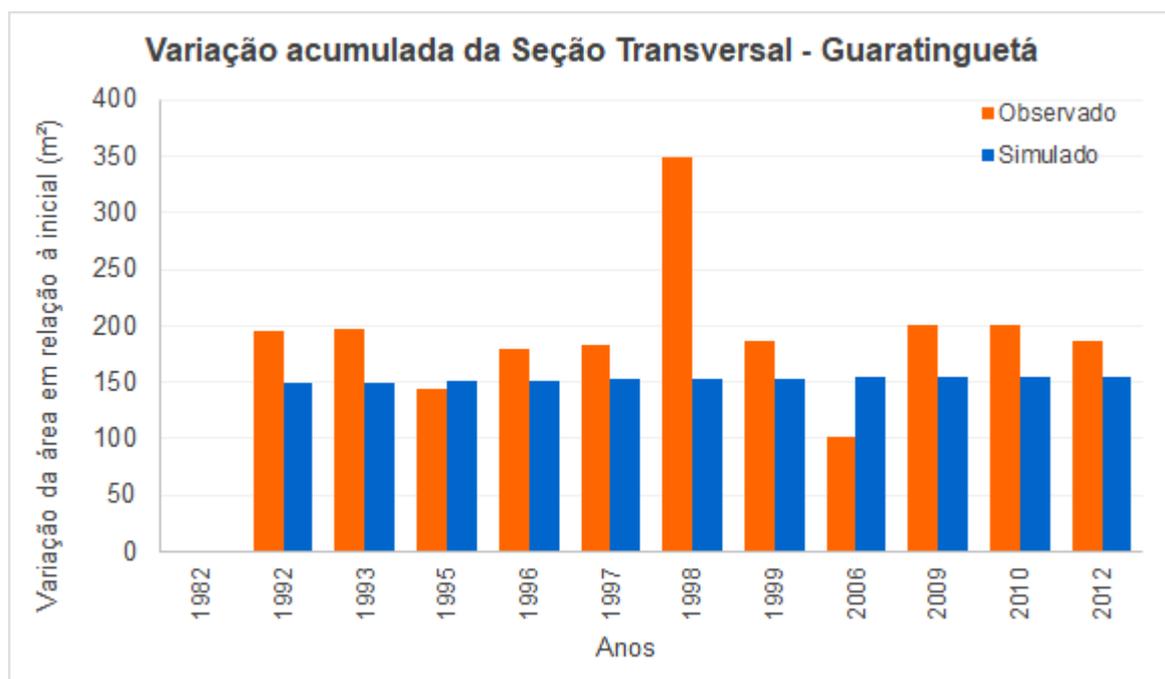


Figura 5.19 - Variação acumulada de área da S33 - Guaratinguetá.

Observou-se que existe uma discrepância significativa no ano de 1998 na Figura 5.19. Buscando uma explicação para tanto, verificou-se se um evento extremo de chuva possa não ter sido registrado devidamente, porém, analisando-se a série histórica de um posto próximo ao de Guaratinguetá, 58201000 – Potim (Figura 5.20), percebe-se que há uma adesão muito próxima com os dados do posto Guaratinguetá, na Figura 5.21.

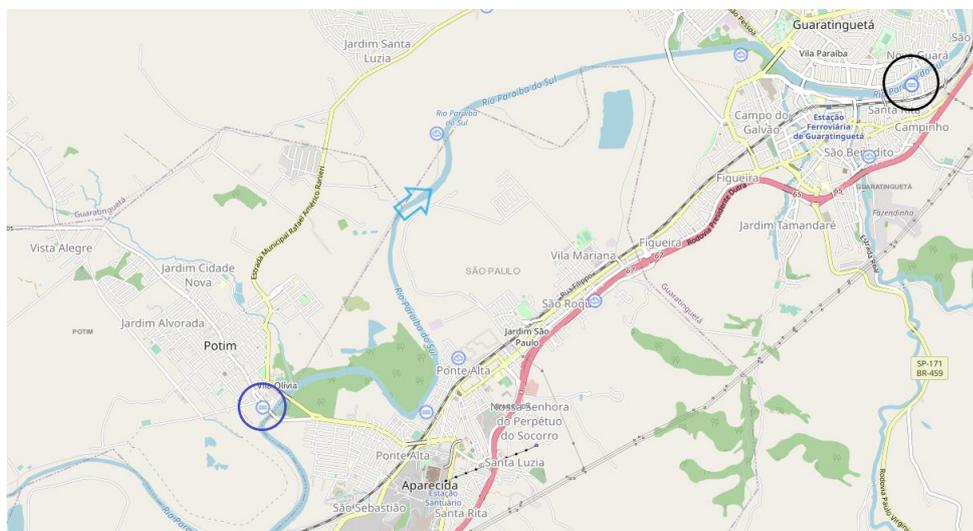


Figura 5.20 - Postos de Potim (círculo azul) e Guaratinguetá (círculo preto). Fonte: adaptado de hidroweb ANA.

Além disso, para o ano em questão (trecho destacado em vermelho na figura abaixo), as vazões não apresentaram valores muito elevados em relação à média, o que leva a crer que a fonte da disparidade vista no gráfico anterior possa ter se dado devido a um erro de leitura das dimensões da seção transversal ou uma extração de areia de magnitude extrema, o que acabou refletindo em uma seção muito díspar em relação às demais.

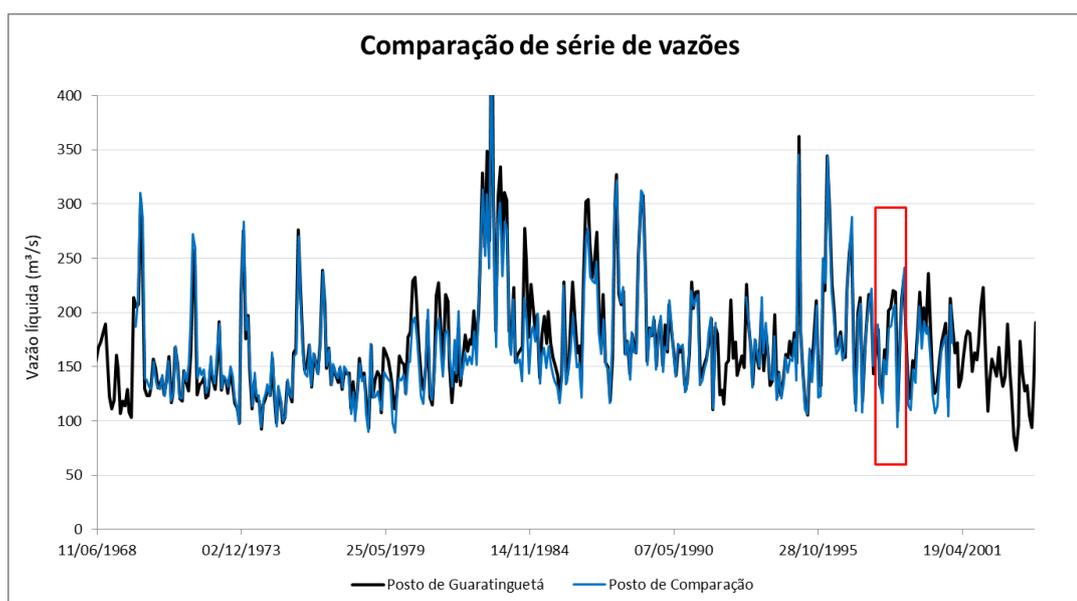


Figura 5.21 – Comparação de série de vazões líquidas entre o posto Guaratinguetá e posto vizinho.

Por último, na Figura 5.22 estão ilustradas as seções transversais observadas em cada ano do posto de Pindamonhangaba, e na Figura 5.23, as resultantes de cálculo do modelo computacional.

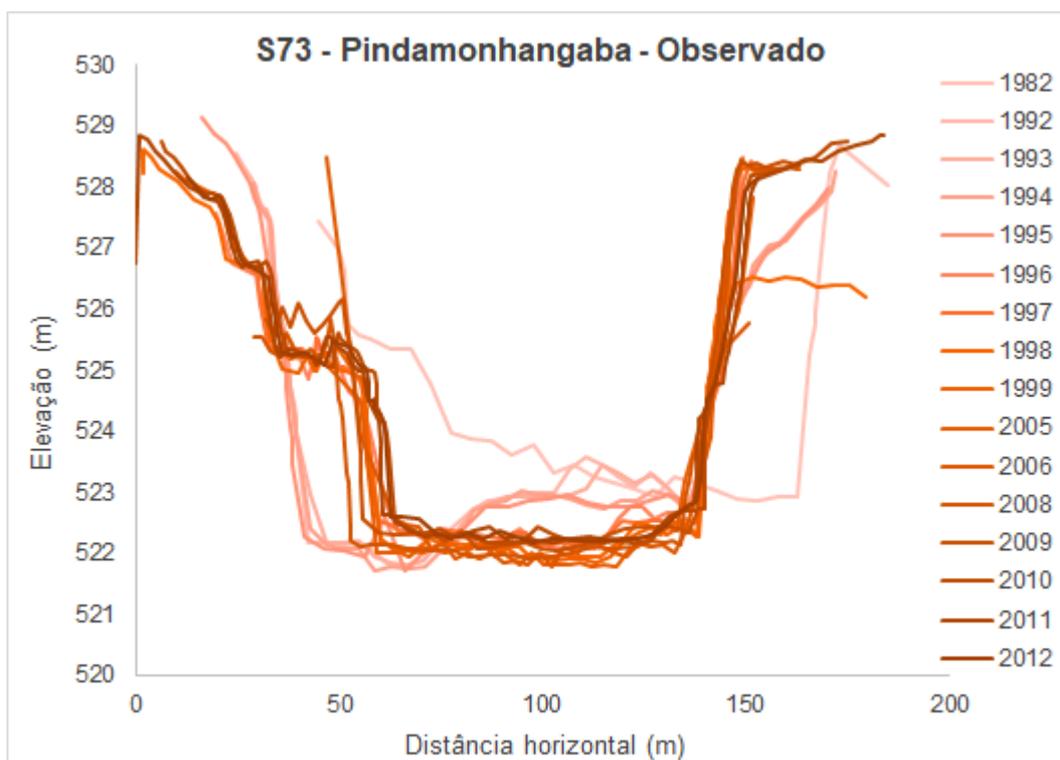


Figura 5.22 - Variação observada das seções transversais do posto Pindamonhangaba – S73.

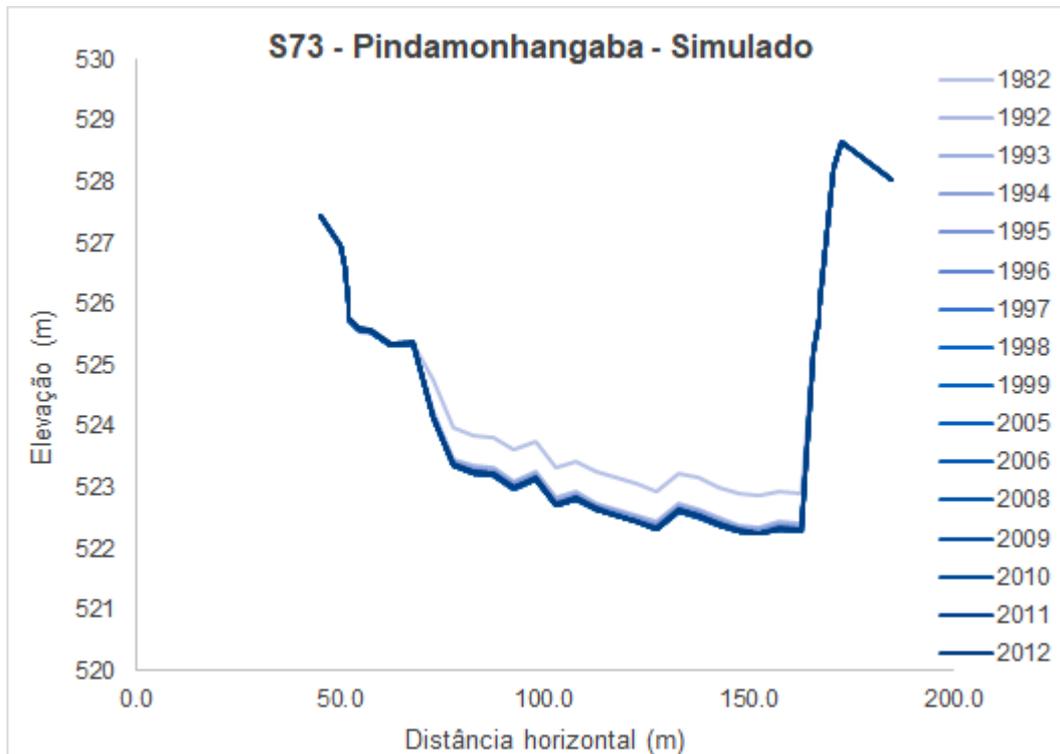


Figura 5.23 - Variação simulada das seções transversais do posto Pindamonhangaba – S73

Na Figura 5.24, tem-se a comparação das seções transversais do posto de Pindamonhangaba.



Figura 5.24 - Comparação entre as seções observadas e resultantes da simulação do HEC-RAS na fase de calibração (Posto de Pindamonhangaba).

Como se pode verificar no gráfico da Figura 5.25, a simulação apontou a ocorrência de erosões na seção transversal do posto de Pindamonhangaba, assim como se extrai a mesma conclusão dos dados de campo.

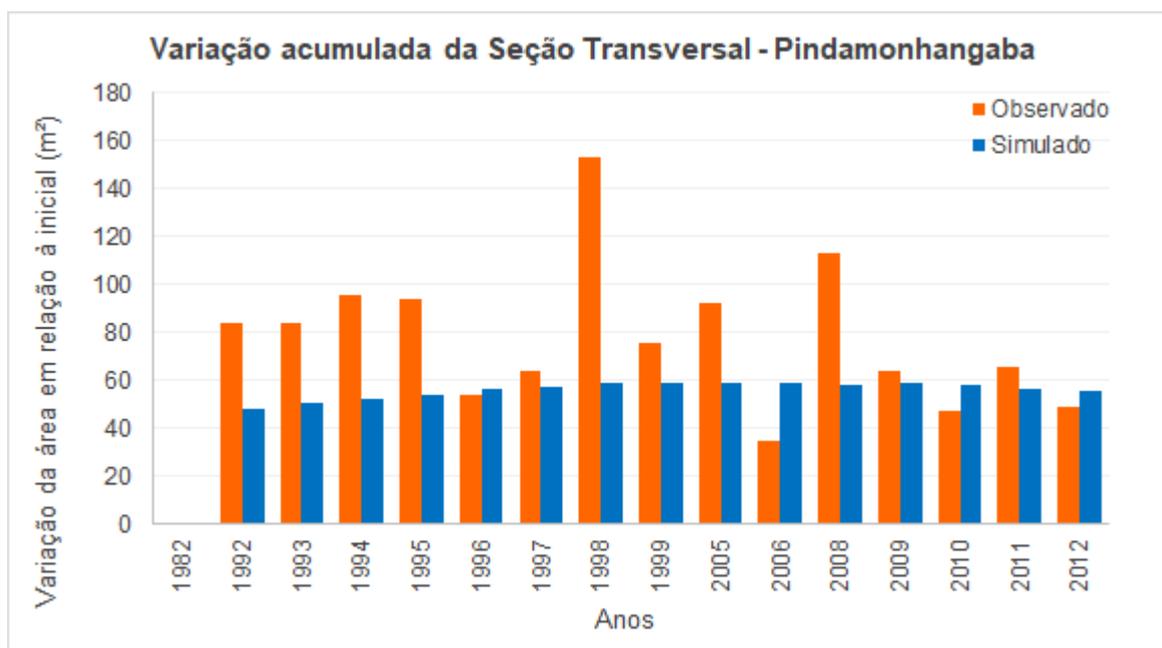


Figura 5.25 - Variação acumulada de área da S73 - Pindamonhangaba.

De uma forma geral, observou-se que as seções apresentadas pelo programa HEC-RAS seguem a característica unidimensional do modelo e, portanto, só apresentam deslocamentos verticais. Além disso, é possível perceber uma cessão dessa variação na maior parte do tempo de simulação, indicando a ocorrência de uma estabilidade dos processos de transporte de sedimentos nas seções.

Esta estabilidade, no entanto, se dá certamente pela deficiência dos dados utilizados, podendo-se citar a priori, as diversas aproximações utilizadas tanto para as séries de vazões líquidas quanto para as sólidas, comentadas nos capítulos anteriores. Embora tenha havia ao menos a permanência das tendências de erosão e deposição na maior parte do tempo, nos gráficos ilustrados, os dados de entrada conseguem, no máximo, simbolizar uma ordem de grandeza do que ocorre nas seções transversais, de modo que o resultado dessa calibração deve ser visto com cautela.

6. SIMULAÇÃO DE EXTRAÇÃO DE AREIA

As simulações realizadas no programa HEC-RAS abarcam a retirada de material ao longo do leito do Rio Paraíba do Sul, principalmente naqueles trechos que englobam as três seções transversais mais examinadas nesse trabalho (de acordo com a explicação do item 4.2).

As retiradas de material foram representadas por ações de dragagem (funcionalidade disponível no *software*) que por sua vez simulam a extração de areia, serviço hidráulico focado nessa pesquisa tendo em visto o contexto de exploração mineral no Rio Paraíba do Sul.

As magnitudes dessas extrações em cada seção transversal foram estimadas conforme explicado no item 5.2. Esse parâmetro, extração por seção (em toneladas por ano), é o dado de entrada que foi inserido no programa HEC-RAS, que permitiu a simulação da extração por meio de um modelo de dragagem. Nesse modelo, há a opção de se determinar a massa de sedimentos a ser retirada em uma seção, durante um intervalo de tempo, segundo um volume prismático no leito do canal – método “*Width-Mass (Prism)*”.

Primeiramente, planejou-se uma simulação de extração de areia com os parâmetros indicados na Tabela 5.3, referente ao nível atual de extração. O intuito dessa simulação foi o de formar um cenário base, em que são verificadas as variações da cota de fundo, para posteriormente serem traçadas comparações com cenários diferentes, em que se variou unicamente a magnitude dos volumes de areia extraídos por unidade de tempo.

O volume de extração foi considerado distribuído uniformemente ao longo do trecho de influência da seção central, referente a cada uma das cidades indicadas na Tabela 5.1, da qual se dispõe de dados. Essas zonas de influência têm como limite o ponto médio entre a seção central e a cidade a montante, bem como o ponto médio entre a seção central e a cidade a jusante, como se ilustra na Figura 6.1.

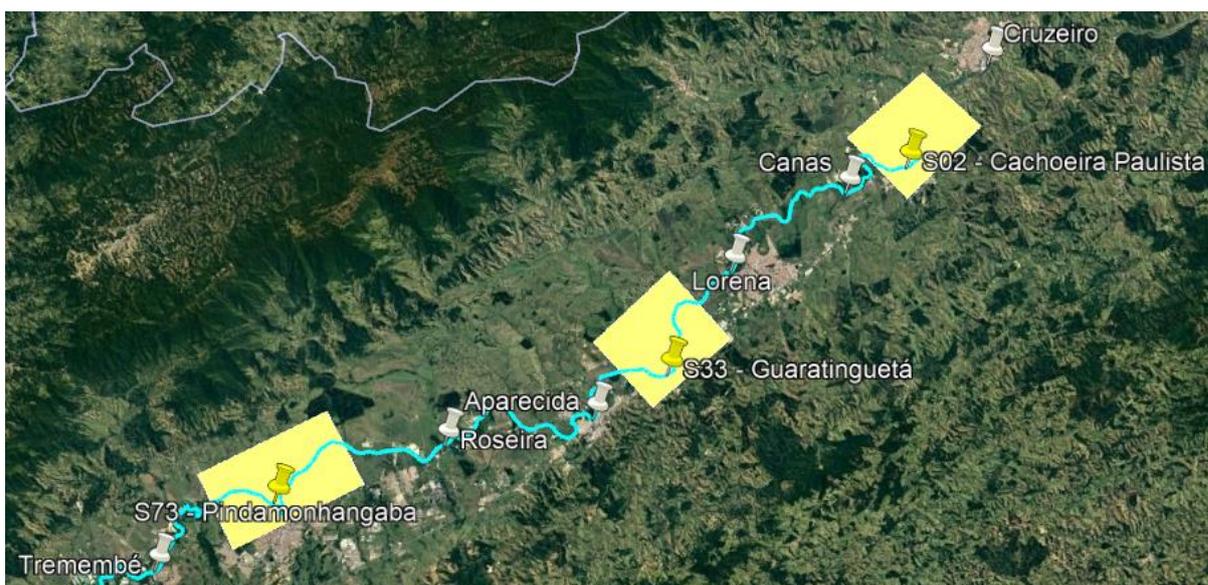


Figura 6.1 - Exemplo de Trechos de influência de dragagem.

Já para o caso de se estudar um evento extremo, se planejou estabelecer um plano de dragagem para as três cidades principais (Pindamonhangaba, Guaratinguetá e Cachoeira Paulista) que fosse além do cenário de referência, de modo a estimar o impacto que uma extração de areia acima do comum pudesse causar na configuração do corpo d'água.

Dessa forma, para cada uma das três cidades, foi estudado um cenário de extração extraordinária com magnitude 100% acima do usual, com intensidades apresentadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Estimativa de extração de areia, por seção (cenário modificado).

Cidade	Extração por seção (t/ano) (cenário ref. – Tabela 5.3)	Extração por seção (t/ano) (cenário modificado)
Pindamonhangaba	49.500	99.000
Guaratinguetá	5.727	11.455
Cachoeira Paulista	37.800	75.600

Por fim, definiu-se o intervalo de tempo da extração em um ano, iniciando em 01/01/2014 e terminando em 31/12/2014, dado que se trata do ano com informações suficientes para estimar o volume de extração de areia.

7. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste estudo, os impactos da extração de areia em trechos do Rio Paraíba do Sul foram analisados pela ótica da variação do seu talvegue, antes e após o período de extração de areia, nos cenários referencial e modificado. A simulação inicia-se desde 1982, porém o intervalo de extração extraordinária foi planejado para duração somente durante o ano de 2014.

A análise comparativa foi realizada entre esses dois cenários, e somente para as três seções principais do estudo, ainda que as outras seções do trecho também tenham experimentado extrações dentro da faixa de normalidade em ambos os casos.

7.1. Cenário Referencial

Ao se realizar a simulação do cenário referencial, o programa forneceu o perfil do talvegue para cada uma das seções ao longo do tempo, bem como do trecho inteiro. Na Figura 7.1, estão ilustradas as elevações do fundo do canal em função do tempo, destacando-se (em rosa) o intervalo de tempo comum em que a extração extraordinária ocorre, para fins de comparação posterior.

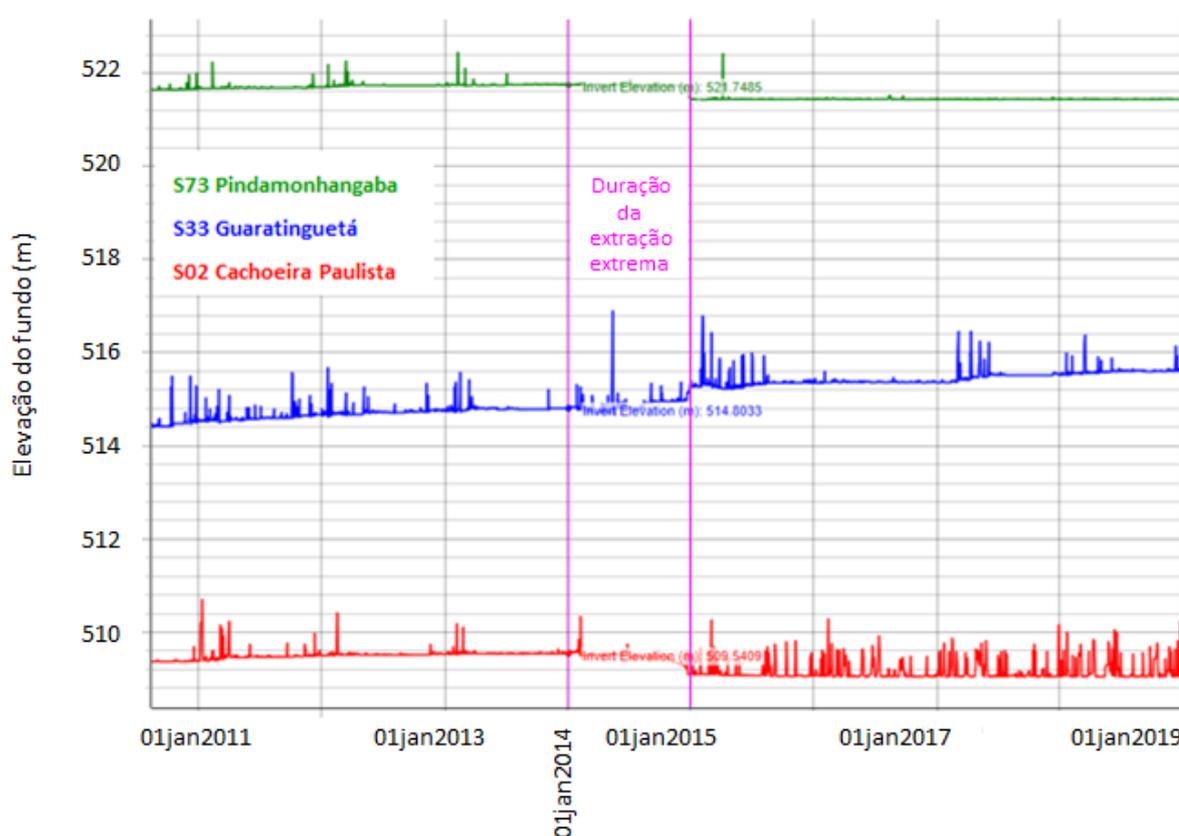


Figura 7.1 - Variação da cota de fundo das seções transversais (cenário referencial).

A variação da cota de fundo, durante o ano de 2014, está mais precisamente apresentada na tabela abaixo, segundo os resultados gerados pelo modelo:

Tabela 7.1 - Variação da cota de fundo das seções transversais do rio (cenário referencial), durante o ano de 2014.

Seção	Cota inicial (m)	Cota final (m)	Varição (m)
Pindamonhangaba	521,75	521,44	-0,31
Guaratinguetá	514,80	515,28	+0,48
Cachoeira Paulista	509,54	509,08	-0,46

Como se pode notar tanto pelo gráfico anterior quanto pela tabela acima, houve pouca variação do fundo do canal.

Visualiza-se, na Figura 7.2, o trecho inteiro de estudo, que mostra o perfil do talvegue do Rio Paraíba do Sul em três instantes: o início e o final do ano de 2014; e ao fim da

simulação, em 2018. Se observa que a cota de fundo ficou muito próxima em todos os momentos considerados.

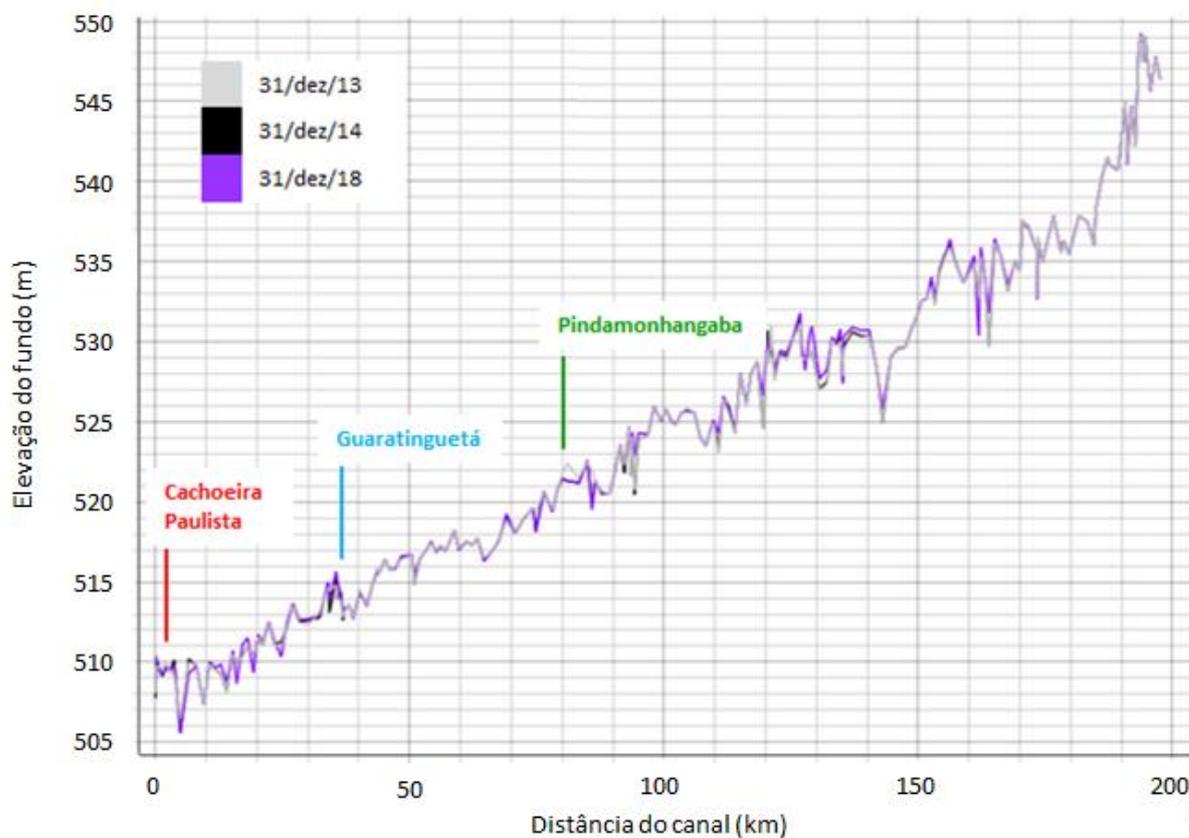


Figura 7.2 - Variação da cota de fundo do canal durante a simulação (cenário referencial).

Devido à pouca variação do talvegue no início (31/dez/13) e fim (31/dez/14) do período de comparação, bem como no fim da simulação (31/dez/18), as linhas que representam o fundo do canal estão muito próximas. Limitando a visualização para um trecho menor (Figura 7.3), em que estão localizadas as três seções principais, é possível ver um pouco melhor o quanto próximas essas curvas estão.

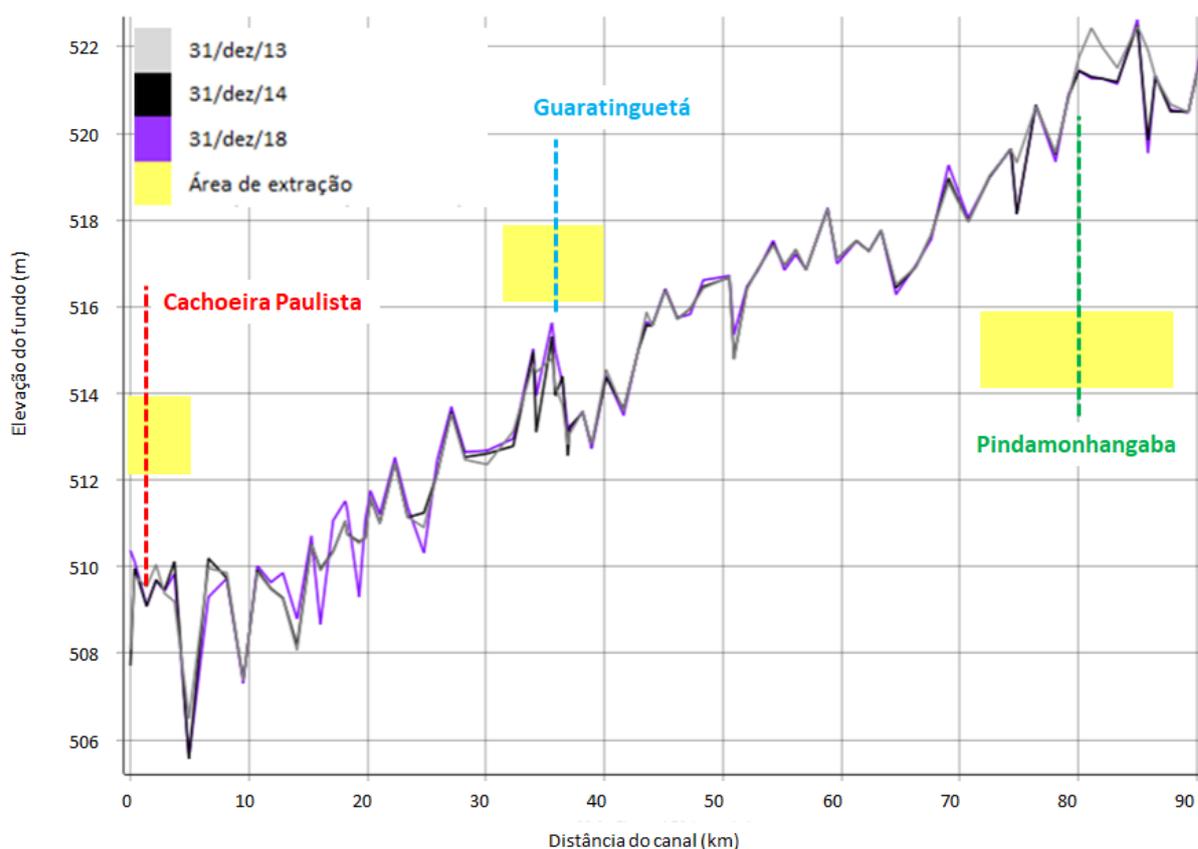


Figura 7.3 - Variação da cota de fundo do canal durante a simulação (cenário referencial).

7.2. Cenário Modificado

Para esse cenário (extração 100% maior), são exibidas informações análogas às do cenário referencial, para fins de comparação.

A Figura 7.4 trazida do modelo computacional, exibe a cota do talvegue nas três seções estudadas. Nela, já se percebe um maior impacto da atividade de extração com magnitude acima da esperada (intervalo destacado em rosa).

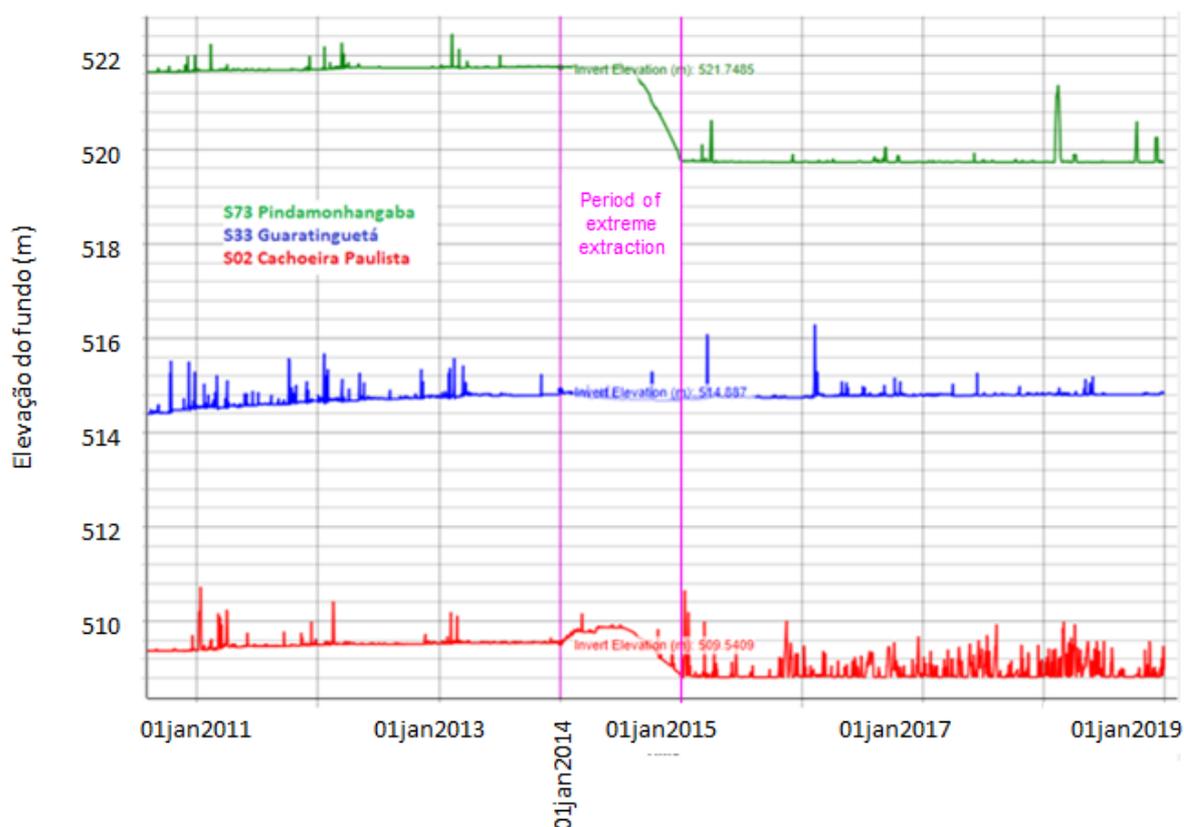


Figura 7.4 - Variação da cota de fundo das seções transversais (cenário modificado).

Novamente, cabe anotar na Tabela 7.2 as variações da cota de fundo das três seções, no início e no final do ano de 2014, indicadas na figura anterior.

Tabela 7.2 - Variação da cota de fundo das seções transversais (cenário modificado).

Seção	Cota inicial (m)	Cota final (m)	Variação (m)
Pindamonhangaba	521,75	519,78	-1,97
Guaratinguetá	514,89	514,70	-0,19
Cachoeira Paulista	509,54	508,81	-0,73

Na seção de Pindamonhangaba, a extração provocou o maior rebaixamento da cota de fundo, de quase 2 metros. Após o período de extração atípica, o fundo do rio se manteve praticamente na mesma elevação, como ocorreu no cenário anterior.

Na seção de Guaratinguetá, não houve alteração significativa na elevação do fundo do canal, possivelmente devido à baixa magnitude de extração no entorno da seção,

cerca de 3 vezes menor do que a de Cachoeira Paulista, e 10 vezes menor que a de Pindamonhangaba. É importante observar também que, no cenário referencial, houve deposição nesta seção, de onde se conclui que essa nova magnitude de extração foi capaz de inverter essa tendência.

Na seção de Cachoeira Paulista, ocorreu inicialmente um fenômeno de deposição, devido a um intenso aporte de sedimentos que ocorreu na seção, fruto da contribuição do afluente local. Após cerca de 6 meses (metade do período), o fundo do rio passou a ser escavado, levando-o ao patamar 0,73 m abaixo do inicial.

Os efeitos das extrações de areia no trecho como um todo podem ser melhor visualizados atentando-se ao gráfico da Figura 7.5.

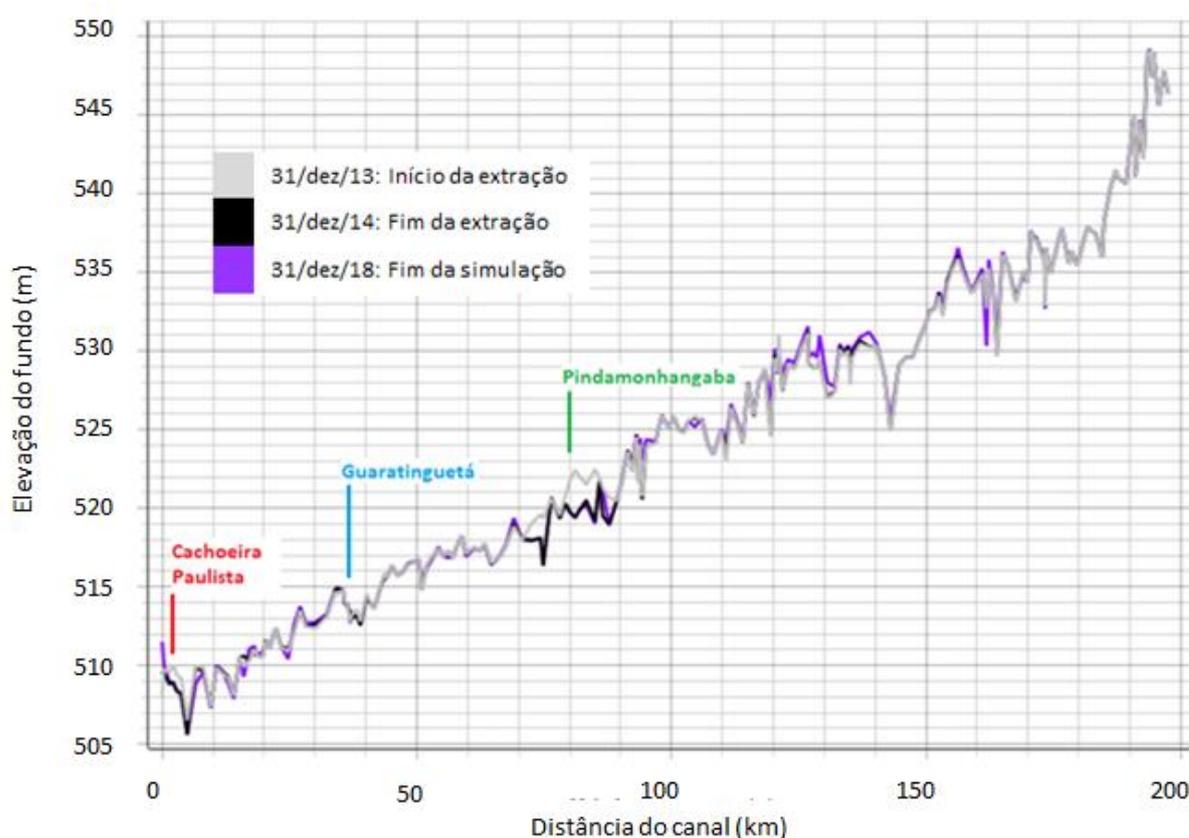


Figura 7.5 - Variação da cota de fundo do canal durante a simulação (cenário modificado).

Como se pode observar no gráfico, o trecho de Pindamonhangaba sofreu as maiores variações de seção, haja vista a magnitude do serviço hidráulico realizado. Na zona de extração em torno da seção central de Pindamonhangaba, a atividade extrativa

rebaixou o talvegue até o limite de erosão do leito, se mantendo nessa elevação até o término do período de simulação, como ilustra em maior detalhe o gráfico da Figura 7.6.

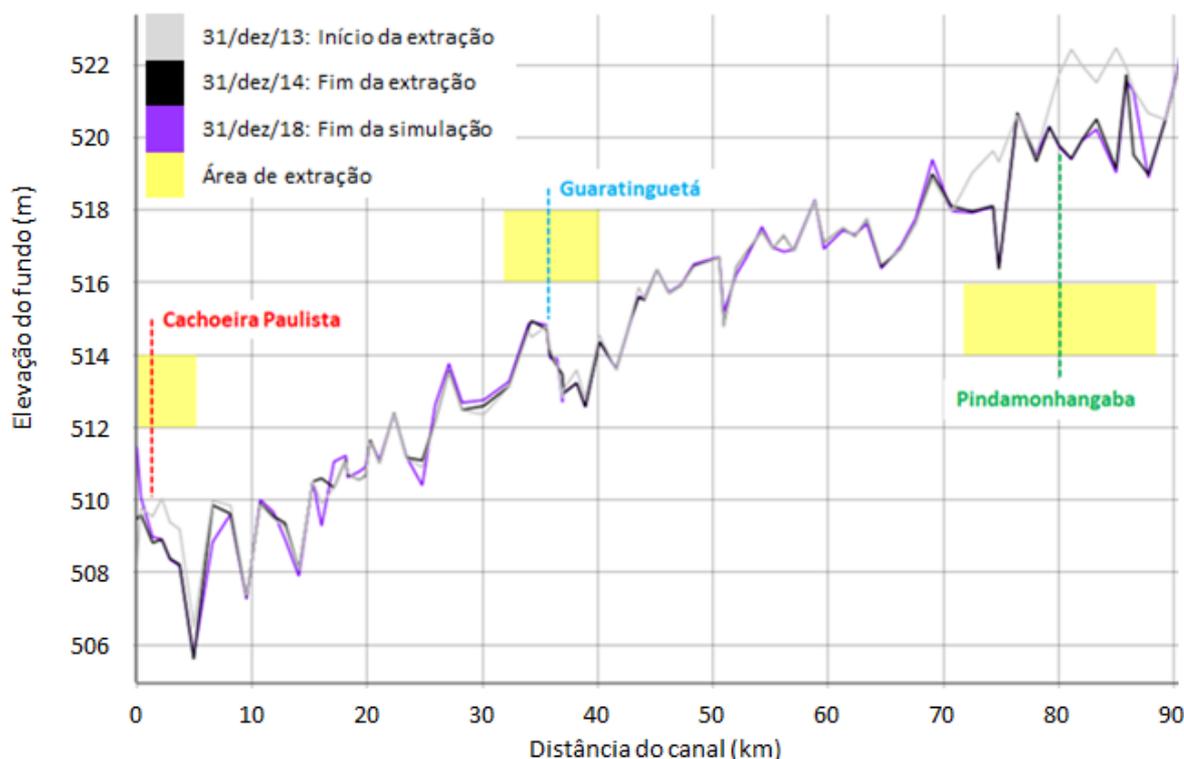


Figura 7.6 - Variação da cota de fundo do canal no cenário modificado, detalhe para o trecho das três seções.

No trecho de influência de Guaratinguetá, se verificou pouca alteração na seção com o aumento do volume de areia retirado, embora a jusante tenha ocorrido depósito de sedimentos. Isso foi resultado do aumento da intensidade de retirada de material, uma vez que no cenário referencial, se observava a tendência depositante nessa área.

No trecho de Cachoeira Paulista, houve significativa queda da cota de fundo em quase toda a extensão da zona de extração, haja vista que, como mencionado no cenário referencial, ocorreria uma grande entrada lateral de sedimentos na seção, neste período de um ano.

Pode-se dizer que os resultados se mostraram coerentes com o desenho da simulação, quando comparados com o cenário de referência. A atividade extrativista levou, de um cenário para o outro, à redução do fundo do rio, sendo que em duas

seções, não houve recuperação da cota do talvegue anos após o término desse evento extremo.

8. CONCLUSÕES

A construção de um modelo computacional unidimensional para representar a evolução morfológica do trecho paulista do Rio Paraíba do Sul exigiu a seleção de uma série de dados hidrossedimentológicos relativos ao período de 1982 a 2012 e disponibilizados por órgãos federal e estadual responsáveis.

Na etapa de calibração hidrodinâmica do modelo computacional, foram simuladas inicialmente apenas as vazões líquidas ocorrentes no trecho em estudo, de modo a se verificar a adequação entre os dados observados no período de 30 anos com os resultados extraídos do modelo. Cabe ressaltar que os dados de descargas líquidas foram previamente selecionados com base no critério de vazões líquidas específicas apresentadas por cada um dos postos analisados, permitindo manter aqueles que se mostravam mais consistentes e preencher séries artificialmente quando da ausência de informações em certas faixas de tempo. O resultado dessa etapa foi razoável, pois se pôde perceber uma concordância próxima entre os valores observados e simulados.

Vale destacar aqui um fator importante para a qualidade da calibração hidrodinâmica: a adoção de distribuições uniformes de vazões líquidas ao longo de todo o trecho, para representar as vazões dos afluentes. A partir das áreas de drenagens das seções principais do estudo e das suas vazões específicas, estimaram-se valores médios de vazões líquidas com base na diferença entre essas áreas. Dessa forma, essa simplificação contribuiu para que houvesse uma dissonância entre as vazões observadas e previstas pelo modelo, em cada seção e para cada intervalo de tempo, ainda que em termos médios, esta fosse uma aproximação razoável.

A calibração do transporte de sedimentos do trecho estudado incluiu a execução do módulo *Quasi-unsteady* do HEC-RAS, dessa vez com as vazões sólidas definidas, pôde-se verificar que, na maior parte dos pontos em que estavam disponíveis dados de variação das seções transversais, o leito do rio simulado, nas três seções analisadas, seguiu tendências de variação parecidas com a da realidade. Isso se tornou ainda mais evidente quando se utilizou como parâmetro de comparação a variação da área das seções transversais ao longo do tempo. Mais uma vez, no

entanto, é importante expor algumas restrições vivenciadas ao longo deste trabalho que impediram melhores resultados:

- O desconhecimento da localização, magnitude e frequência dos pontos de extração de areia em leito do rio, que atuaram no período e trecho do estudo. A aproximação possível para a inclusão dessa atividade foi descrita no capítulo 5 e traduz uma estimativa indireta em valores médios da extração, que por sua vez se distribuiu ao longo dos 200 km do trecho do Rio Paraíba do Sul. Essas informações seriam muito importantes para se atingir maior acurácia tanto na calibração quanto na simulação extraordinária de extração de areia.

- A distribuição granulométrica das seções transversais foi adotada com base em três diâmetros característicos, d_{35} , d_{50} e d_{65} , coletados ao longo de toda a extensão do trecho em estudo. Embora sejam parâmetros representativos da composição granulométrica do fundo do rio, a partir deles se adotou uma distribuição que não é a mais próxima do real, ainda mais tomando-se a mesma pelos 200 km de comprimento de calha de rio.

- A estimativa das vazões sólidas no canal, com base nas curvas-chave sólidas descritas no item 4.2.2, conforme comentado, constituiu uma fonte de imprecisão para a representação das vazões extremas, tanto pela carência de pontos amostrais em certas faixas de valores quanto pela maior quantidade de vazões elevadas que não foram representadas pela curva média da regressão. Dessa forma, os fenômenos de erosão e deposição foram afetados por essa distorção, podendo-se dizer que o modelo não capturou momentos de maior aporte de sedimentos em determinadas seções.

- O número de seções transversais com batimetria disponível ao longo do tempo para comparação com os resultados do modelo. Apenas em três seções transversais (Pindamonhangaba, Guaratinguetá e Cachoeira Paulista) havia dados das suas conformações espaciais para análise da evolução morfológica, o que, para o tamanho do trecho estudado, pode ser considerado pouco.

Todos esses obstáculos referentes à restrição de dados hidráulicos e sedimentométricos ou à simplificação da modelagem levaram a resultados que poderiam ter sido mais assertivos na etapa de calibração do modelo.

Ainda assim, após essa etapa, foi preparada uma simulação de extração de areia no leito do rio 100% maior do que a atuante nas três seções principais estudadas nesta pesquisa, de acordo com estimativas de produção mineral regionais. Se constatou que, a depender da magnitude de extração de areia, a morfologia fluvial pode ser drasticamente alterada por longos períodos, retornar a uma configuração próxima à inicial, ou sofrer mudanças pouco significativas.

As alterações morfológicas referidas foram analisadas nesse estudo quanto à variação da cota de fundo do rio que, na modelagem unidimensional do HEC-RAS, impõe as variações na direção vertical da seção transversal. De acordo com os resultados obtidos, a cota de fundo do canal não retornou à configuração inicial nos casos dos trechos de Pindamonhangaba e Cachoeira Paulista, devido aos eventos de extração excessiva para o corpo d'água. Vale destacar, entretanto, que tais resultados devem ser interpretados qualitativamente, considerando principalmente nas tendências observadas, pois a etapa de calibração do modelo não se desenvolveu com uma base sólida de informações.

Novamente, é imperativo lembrar que, embora a modelagem 1D tenha sido apropriada para este estudo de caso, que aborda um canal cuja dimensão longitudinal é a de maior preponderância e interesse, sabe-se que modelos bidimensionais poderiam apresentar resultados melhores e mais discretizados. Isso por que, nos cerca de 200 km do trecho do Rio Paraíba do Sul, ocorrem fenômenos hidráulicos significativos na direção lateral do escoamento que o modelo unidimensional não é capaz de representar. No item 5.4.2, foi possível perceber como as seções se alteraram na direção horizontal, tanto em largura quanto em posição, segundo as medições de campo.

Nessa extensão há inúmeros trechos curvos, que fazem com que o escoamento apresente componentes laterais de velocidade não desprezíveis, impactando na ação erosiva e depositante das margens. No leito do canal, também há prejuízo na modelagem considerando que a batimetria possui formações de fundo que

influenciam a velocidade do escoamento nas duas direções do plano horizontal e, portanto, no transporte de sedimentos. Pode-se citar ainda a interação do escoamento com estruturas existentes, sobretudo pontes, ou a recepção lateral do escoamento dos afluentes, que seriam melhor representadas em um modelo 2D.

No entanto, retomando a citada falta de alguns dados de entrada deste estudo, entende-se que a adoção de um modelo computacional superior traria desafios adicionais para a sua calibração. Se, por sua vez, o modelo bidimensional ofertaria uma melhor resolução do campo de velocidades do escoamento, ao invés de valores médios na seção transversal, por outro lado, demandaria uma grade numérica mais refinada do que a do presente estudo, que conta com um espaçamento médio entre seções de aproximadamente 1km, onde certamente não são sempre captadas seções relevantes como, por exemplo, pertencentes a curvas ou a fundos mais rebaixados ou elevados.

Um último contraponto em relação ao uso de softwares mais robustos é o tempo necessário para concluir uma simulação. Pelo caráter mais simplificador dos modelos unidimensionais, uma simulação se dá, para esse estudo de caso, em termos de horas. Já para um modelo bidimensional, o tempo de computação pode ser de alguns dias dependendo da resolução da malha numérica das seções, da complexidade da simulação, do desempenho do *hardware* e da extensão do trecho, que no caso é consideravelmente grande. Para modelos tridimensionais, essa tarefa se tornaria impraticável pois o número de rotinas de cálculo se elevaria consideravelmente.

Em síntese, a escolha do modelo computacional mais apropriado para simular os fenômenos hidráulicos e de transporte de sedimentos requer uma análise dos objetivos do estudo e das vantagens e desvantagens de cada um deles. Neste estudo do Rio Paraíba do Sul, a modelagem unidimensional se mostrou razoável para a representação dos fenômenos em uma escala macro espacial, apesar das limitações mencionadas e das restrições de dados, providenciando resultados relativos às alterações da morfologia fluvial em um cenário de exploração mineral no leito do rio.

Esse conjunto de informações podem servir como um indicativo dos limites toleráveis de extração de areia nos trechos estudados, de Jacareí até Cachoeira Paulista, de modo a prevenir impactos substanciais na dinâmica fluvial, que podem afetar os

múltiplos usos da água na região. Como se sabe, a exploração dos recursos hídricos no Vale do Paraíba inclui a captação de água para consumo e a navegação, atividades potencialmente impactadas por mudanças de declividade e profundidade que podem ser previstas pelo modelo computacional.

8.1. Recomendações para trabalhos futuros

Após o término deste trabalho, restam indubitavelmente aspectos a serem aprimorados, ou mesmo reestruturados, considerando todas as restrições mencionadas que impediram melhores resultados. Nesse sentido, serão levantadas a seguir as principais recomendações para os trabalhos futuros que envolvam o desenvolvimento do modelo computacional unidimensional do trecho paulista do Rio Paraíba do Sul, abordado nesta pesquisa.

A calibração hidrodinâmica do modelo contou com valores previamente ajustados do número de Manning durante a década de 1970, que pode ser aprimorada com uma nova etapa de calibração, contando-se com os dados de linha d'água do portal *hidroweb* da ANA e inclusive com a ferramenta de calibração automática de rugosidade do programa HEC-RAS.

Para a calibração do módulo de transporte de sedimentos, seria importante a obtenção de mais dados que permitem o cálculo do balanço sedimentar no trecho em estudo, destacando-se: melhores estimativas das extrações de areia no leito, considerando sua variabilidade no tempo e no espaço; mais dados de carga sólidas para o preenchimento de séries, principalmente no que tange às vazões extremas; e maior conhecimento acerca da granulometria presente no fundo do canal).

Além disso, como a quantidade de seções transversais disponibilizadas foi bem escassa, principalmente em relação à extensão do trecho estudado, seria extremamente importante conseguir mais dados de batimetria para melhor o resultado da calibração. É importante se atentar às ações da Política Estadual de Recursos Hídricos de São Paulo, que conta com recursos para a melhoria da gestão dos corpos d'água, entre os quais o Rio Paraíba do Sul, de extrema importância para a população por suas diversas potencialidades. Tendo-se sucesso nessa missão, pode-se prosseguir da seguinte maneira:

Manter a modelagem unidimensional para efetuar o balanço sedimentar de toda a extensão do rio (cerca de 200 km), bem como nas proximidades das seções conhecidas, ou seja, fornecendo condições de contorno locais;

Utilizar um modelo bidimensional para estudar trechos específicos do Rio Paraíba do Sul, a partir das informações de balanço sedimentar fornecidas pelo modelo 1D. Essa medida viabiliza o tempo computacional ao simular uma grade numérica menor, e permite um olhar mais detalhado para os fenômenos locais em uma seção transversal, tais como a variação horizontal, erosões nas margens e a interferência com estruturas próximas.

Por fim, sugere-se ainda a simulação de cenários mais específicos para a realidade local e o aprimoramento da análise dos resultados aproveitando as funcionalidades de um modelo 2D, em determinados trechos. Com isso, a ferramenta de suporte à gestão vislumbrada para o Rio Paraíba do Sul se torna mais robusta e permite oferecer informações mais precisas sobre os impactos das ações de exploração mineral.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDERREZZAK, K. K., PAQUIER, A. **Applicability of Sediment Transport Capacity Formulas to Dam-Break Flow over Movable Beds**. Journal of Hydraulic Engineer, ASCE, Fevereiro, 2011.

ACKERS, P., WHITE, W. R. **Sediment transport: New approach and analysis**, ASCE Journal of the Hydraulics Division, Vol. 99, HY11, 1973.

ASCE Journal of the Hydraulics Division, Vol. 99, HY11. Agência Nacional de Águas – ANA. **Estudos auxiliares para a Gestão do Risco de Inundações – Bacia do Rio Paraíba do Sul**. Disponível em < <http://gripbsul.ana.gov.br/ABacia.html>>. Acesso em 01/04/2020.

BARRETI, L. R. **“Evolução morfológica do Rio Paraíba do Sul por ações antrópicas”**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, São Paulo, 2005.

BISTAFA, S. R. **On the development of the Navier-Stokes equation by Navier**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 40, nº 2. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0239>. São Paulo, 2017.

BERNARDINO, J. C. M. **Estabilidade de cursos d’água escoando sobre leitos aluvionares não-coesivos**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Ed. rev. São Paulo, 2005.

BRUNNER, G. W. **HEC-RAS. River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Version 5.0**. United States Army Corps of Engineers – USACE. Davis – CA, 2016.

CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA – CTH. **Paraíba: Estudo Morfológico do rio. Relatório Parcial nº 3**. v. 4 – Desenhos. Convênio DAEE e EPUSP, São Paulo, 1981.

CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA – CTH. **PARAIBA DO SUL (rio): Estudo Morfológico – Relatório Parcial nº 8**. v. 1/4 – Textos, Tabelas e Fotografias. Convênio DAEE e EPUSP, São Paulo, 1983.

CHANG, H. H. **Fluvial Processes in River Engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1988.

CHANG, H. H. **River Morphology and River Channel Changes**. Tianjin University, China, 2008.

CHAU, K. W. **Application of the Preissmann scheme on flood propagation in river systems in difficult terrain**. International Association of Hydrological Sciences (IAHS). Hong Kong, 1990.

CHIEN, N.; WAN, Z. **Mechanics of Sediment Transport**. ASCE, Reston, VA, 1998.

COLEMAN, S. E.; NIKORA, V. I. **Exner equation: A continuum approximation of a discrete granular system**. Water Resources Research, 45, W09421, DOI:10.1029/2008WR007604, 2009.

COMITÊ DE INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL – CEIVAP. **Relatório de Situação – Bacia do Rio Paraíba do Sul. 2018**. AGEVAP. Rio de Janeiro, 2018.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Mineração por dragagem – Procedimento**. 2ª ed. São Paulo, 2016.

COSTA, S. B. **Modelo unidimensional preliminar de transporte de sedimentos para o reservatório Taiaçupeba**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

DOU, G.R. **Similarity Theory and its Application to the Design of Total Sediment Transport Model**. Research Bulletin of Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, China. 1974.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICO DO ESTADO DE SÃO PAULO – DAEE. **Estudo hidráulico do Rio Paraíba do Sul – Setor Paulista Relatório final**. v.1. Sondotécnica S.A., São Paulo, 1975.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICO DO ESTADO DE SÃO PAULO – DAEE. **Estudo hidráulico do Rio Paraíba do Sul – Setor Paulista Relatório final**. v.2. Sondotécnica S.A., São Paulo, 1975.

EINSTEIN, H. A. **The bed load function for Sediment Transportation in Open Channels, Technical Bulletin 1026**. US Department of Agricultural, Soil Conservation Service, Estados Unidos, 1950.

EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO AS – EMPLASA. **Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte**. Disponível em <<https://emplasa.sp.gov.br/RMVPLN>>. Acesso em 02/03/2020.

HASCHENBURGER, J. K.; CURRAN, J. **Sediment Transport Modeling of Reach Scale Geomorphic Processes**. Texas Water Development Board, Estados Unidos, 2012.

HORVÁTH, Z; WASER, J.; PERDIGÃO, R. A. P.; KONEV, A. BLOSCHL, G. **A two-dimensional numerical scheme of dry/wet fronts for the Saint-Venant system of shallow water equations**. International Journal for Numerical Methods in Fluids. 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Folhas Topográficas em escala 1:50.000. Departamento de Geociências. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/folhas-topograficas/15809-folhas-da-carta-do-brasil.html?=&t=sobre>>. Acesso em 11/11/2019.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Mineração e município: bases para planejamento e gestão dos recursos minerais**. São Paulo, 2003.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Ordenamento Territorial Geomineiro. Área: Região Metropolitana do Vale do Paraíba. Relatório Final**. São Paulo, 2015.

KRISHNAPPAN, B. G. **Modelling of Unsteady Flows in Alluvial Streams**. Journal of Hydraulic Engineering, V. 111, No. 2. 1985.

KRYLOVA, A. I.; ANTIPOVA, E. A.; PEREVOZKIN, D. V. **The derivation of the Saint–Venant equations**. Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. 2017.

MARTINS, J. R. S. **Hidrodinâmica aplicada à modelagem de qualidade das águas superficiais: revisão de processos e métodos**. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Edição Revisada -- São Paulo, 2017.

PAOLA, C.; VOLLER, V. R. **A generalized Exner equation for sediment mass balance**. Journal of Geophysical Research, 110, F04014, DOI: 10.1029/2004JF000274. 2005.

PEREIRA, F. F. **Modelo hidrodinâmico e de transporte bidimensional de grade não estruturada para lagos rasos**. Dissertação de mestrado do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4^a ed. EESC-USP, São Paulo, 2006.

REIS, B. J.; BATISTA, G. T.; TARGA, M. S.; CATELANI, C. S. **Influência das cavas de extração de areia no balanço hídrico do vale do Paraíba do Sul**. Revista Escola de Minas, DOI: 10.1590/S0370-44672006000400007. Dezembro, 2006.

RIBEIRO, R. M. **A Exploração em Cavas de Areia no Vale do Paraíba: Atores e Conflitos – Estudo de Caso de Jacareí e São José dos Campos**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba. São Paulo, 2010.

SALEH, F.; DUCHARNE, A.; FLIPO, N.; OUDIN, L.; LEDOUX, E. **Impact of river bed morphology on discharge and water levels simulated by a 1D Saint–Venant hydraulic model at regional scale**. Journal of Hydrology, 2012.

SART, C.; BAUME, J. P.; MALATERRE, P. O.; GUINOT, V. **Adaptation of Preissmann's scheme for transcritical open channel flows**. Journal of Hydraulic Research, 2010.

SCAPIN, J.; PAIVA, J. B. D. **Caracterização do transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano em Santa Maria – RS**. 1º Simpósio de Recursos Hídricos do Sul. 2004.

SEDIMENT TRANSPORT: The Ackers and White Theory Updated. Report SR 237. HR Wallingford. Reino Unido, 1990.

SILVA, R. C. V.; JÚNIOR, G. W. **Hidráulica fluvial**. Volume II. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. 255 p. ISBN 85-285-0072-1. 2005

SILVA, T. A.; QUAGLIO, O. A. **Métodos de extração de areia**. Universidade Federal do Paraná. Outubro, 2011.

VAN RIJN, L.C. **Sediment Transport Part II: Suspended Load Transport**. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 110(11), 1613–1641. 1984.

YEN, B. C. **Open Channel Flow Resistance**. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:1(20). Janeiro, 2002.

YANG, S.-Q.; TAN, S.-K.; LIM, S.-Y. **Flow resistance and bed form geometry in a wide alluvial channel**. *Water Resources Research*, v. 41, WO9419, DOI: 10.1029/2005WR004211, 2005.

YANG, S.-Q. **Sediment transport capacity in rivers**. *Journal of Hydraulic Research*. Julho, 2005.

ZAGHLOUL, N. A. **Gradually varied flow in circular channels with variable roughness**. *Advances in Engineering Software*. Elsevier Science Publishers Ltd. 1992

ZHANG, R. **A study of sediment transport capacity of middle and lower Yangtze River**. *J. Sediment Res.* 4(2), Beijing, China. 1959.