

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Leonardo Cirimbelli Rocha

**AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE EQUILÍBRIO, QUANTO
AO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS, DE UM TRECHO DO
RIO JACUÍ**

Porto Alegre
julho 2014

LEONARDO CIRIMBELLI ROCHA

**AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE EQUILÍBRIO, QUANTO
AO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS, DE UM TRECHO DO
RIO JACUÍ**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Civil

Orientadora: Ana Luiza de Oliveira Borges

Porto Alegre
julho de 2014

LEONARDO CIRIMBELLI ROCHA

**AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE EQUILÍBRIO, QUANTO
AO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS, DE UM TRECHO DO
RIO JACUÍ**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2014

Profa. Ana Luiza de Oliveira Borges
Dra. pela Université Joseph Fourier - Grenoble I
Orientadora

Profa. Carin Maria Schmitt
Dra. pelo PPGA/UFRGS
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Profa. Ana Luiza de Oliveira Borges (UFRGS)
Dra. pela Université Joseph Fourier – Grenoble I

Prof. Rafael Manica (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Eduardo Puhl (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, minha família e amigos
que sempre me apoiaram e especialmente durante o
período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu
lado.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Professora Ana Luiza de Oliveira Borges, orientadora deste trabalho, pois sem a sua ajuda eu não teria conseguido concluir esse projeto. Agradeço as horas que ela disponibilizou para me orientar e me ensinar sobre como se desenvolve o transporte de sedimentos no interior do caudal líquido de um rio. E sou imensamente grato pelas suas correções feitas em cima dos esboços, desse trabalho, que lhe eram apresentados.

Agradeço aos meus pais pelo esforço empreendido com as leituras e revisões feitas deste trabalho.

Agradeço ao Professor Rogério Dorneles Maestri, por ter contribuído com a ideia inicial que me motivou a realizar o trabalho de conclusão de curso na área de transporte de sedimentos.

Agradeço a engenheira civil Ana Carolina Victória Ribeiro pela tradução de alguns artigos do inglês para o português.

Agradeço ao geógrafo Estevam Borba que me ensinou os primeiros passos no *software* ARCGIS, os quais possibilitaram que além das figuras que existem neste trabalho fossem possíveis outras análises utilizando esse *software*.

Agradeço ao meu colega de trabalho, futuro engenheiro civil, Luiz Carlos Becker, por me auxiliar com o AutoCad.

Agradeço ao engenheiro eletricitista Pablo Ruas, que me ajudou na obtenção das imagens de satélite da região em estudo.

E finalmente agradeço ao apoio, à compreensão, e o incentivo que recebi dos meus familiares e amigos que nos momentos difíceis souberam motivar-me para continuar até o final.

Agradeço à professora Carin pelo esforço e dedicação para que este trabalho se tornasse relevante e bem apresentado.

Agradeço a todos os professores que, ao fazerem parte da minha vida acadêmica, contribuíram para a minha formação profissional.

Se cheguei até aqui foi porque me apoiei no ombro dos
gigantes.

Isaac Newton

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo avaliar qual é a condição de equilíbrio em que se encontra um trecho do Rio Jacuí compreendido entre os postos de medição fluvio-sedimentométricos Dona Francisca e Rio Pardo, os quais estão localizados à jusante da UHE Dona Francisca, considerando uma estimativa de extração de areia nesse trecho. Um terceiro posto, chamado São Jerônimo Jusante, foi analisado, porém foi dispensado por insuficiência de dados. Essa usina teve as suas atividades iniciadas no ano de 2001. Sendo esse ano um divisor para todas as estimativas feitas neste estudo, pois a barragem sendo um dispositivo hidráulico, influencia no escoamento e por consequência na taxa de sedimentos que circulam na massa líquida. A fim de analisar possíveis falhas ou inconsistências nos dados obtidos junto a Agência Nacional de Águas, esses dados foram correlacionados mediante ajuste de uma curva, tipo potência, pelo método de regressão linear com o objetivo de verificar dispersões que poderiam indicar inconsistências. Após essa fase foram feitos os cálculos relativos às estimativas do deflúvio sólido médio anual para os postos em análise. As estimativas do deflúvio sólido médio anual foram realizadas utilizando-se curvas-chave de sedimentos, juntamente com a curva de permanência de vazões para esses postos. A determinação da capacidade de transporte foi calculada considerando-se os métodos de Meyer-Peter e Müller, Einstein-Brown e Kalinske. A escolha do método a ser adotado no cálculo da capacidade de transporte baseou-se na resposta que cada método oferecia em relação às estimativas (5%, 10% ou 20%) da carga de fundo em função da carga suspensa. O método de Kalinske foi o que melhor se ajustou a taxa de 20% da descarga medida em suspensão. A determinação da estimativa de extração de areia e da granulometria foram feitas com base no anuário mineral brasileiro 2010 publicado pelo Ministério de Minas e Energia e por um estudo sobre a proveniência das areias do Rio Jacuí, respectivamente. Após a determinação dos deflúvios sólidos médios anuais e da capacidade de transporte para o trecho em estudo foi estimado o estado de equilíbrio do trecho de rio considerando dois cenários: no primeiro cenário considerou-se que o sedimento que circulava era apenas areia média na calha do rio e o segundo cenário como sendo a areia grossa representativa do trecho em questão. Sendo para ambos os casos encontrado um balanço positivo para o trecho em estudo no período anterior a construção da UHE Dona Francisca e um balanço negativo no período posterior.

Palavras-chave: Curva Chave de Sedimentos. Balanço de Sedimentos. Transporte de Sedimentos. Rio Jacuí.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do delineamento da pesquisa	32
Figura 2 – Função do método de Kalinske	54
Figura 3 – Área de abrangência da bacia do Atlântico Sul	58
Figura 4 – Estações fluviométricas e sedimentométricas da região de estudo	60
Figura 5 – Postos fluvio-sedimentométricos utilizados no estudo	61
Figura 6 – Fluviograma e dados de descarga sólida registrados no posto Dona Francisca.....	62
Figura 7 – Fluviograma e dados de descarga sólida registrados no posto Rio Pardo	63
Figura 8 – Mapa geológico simplificado do Rio Grande do Sul, com a localização dos pontos de coleta de sedimentos no Rio Jacuí	64
Figura 9 – Distribuição granulométrica do material de leito do Rio Jacuí	65
Figura 10 – CCS do posto Dona Francisca	69
Figura 11 – CCS do posto Rio Pardo	70
Figura 12 – CCS do posto São Jerônimo Jusante	71
Figura 13 – Curva de permanência do posto Dona Francisca	72
Figura 14 – Curva de permanência do posto Rio Pardo	73
Figura 15 – Desenho esquemático da divisão do Rio Jacuí em seções	75
Figura 16 – Detalhe da divisão do Rio Jacuí em seções	76
Figura 17 – MDE gerado a partir das curvas de níveis	77
Figura 18 – Perfil esquemático do Rio Jacuí	78
Figura 19 – Escolha do método de capacidade de transporte	80
Figura 20 – Relação ajustada entre velocidade e vazão para o posto Dona Francisca	81
Figura 21 – Relação ajustada entre largura e vazão para o posto Dona Francisca	82
Figura 22 – Relação ajustada entre área molhada e vazão para o posto Dona Francisca	82
Figura 23 – Relação ajustada entre velocidade e vazão para o posto Rio Pardo	83
Figura 24 – Relação ajustada entre largura e vazão para o posto Rio Pardo	83
Figura 25 – Relação ajustada entre área molhada e vazão para o posto Rio Pardo	84
Figura 26 – Balanço sedimentométrico para o cenário 1 anterior a construção da UHE Dona Francisca	87
Figura 27 – Balanço sedimentométrico para o cenário 1 posterior a construção da UHE Dona Francisca	88
Figura 28 – Balanço sedimentométrico para o cenário 2 anterior a construção da UHE Dona Francisca	88
Figura 29 – Balanço sedimentométrico para o cenário 2 posterior a construção da UHE Dona Francisca	89

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Planilha para cálculo da curva de permanência	45
Quadro 2 – Planilha para cálculo da vazão média diária e do deflúvio médio diário	46
Quadro 3 – Dados dos postos fluvio-sedimentométricos em estudo	62
Quadro 4 – Nomenclatura adotada para a caracterização da distribuição granulométrica do material de leito	66
Quadro 5 – Leis ajustadas para consistência dos dados	67
Quadro 6 – Consistência dos dados do posto Dona Francisca	68
Quadro 7 – Consistência dos dados do posto Rio Pardo	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultado do deflúvio sólido médio anual	74
Tabela 2 – Declividades adotadas para o Rio Jacuí	878
Tabela 3 – Estimativa da capacidade de transporte média anual por arraste no trecho entre os postos Dona Francisca e Rio Pardo	84
Tabela 4 – Produção anual de areia no Brasil e estimativa da produção do Rio Jacuí	85

LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

CCS – Curva Chave de Sedimentos

FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

MDE – Modelo Digital de Elevação

SIG – Sistema de Informações Geográficas

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

C'_s – concentração medida (ppm)

C_R – concentração relativa

d – amplitude de cada intervalo da curva de permanência

D_{50} – diâmetro de peneiração da areia tal que 50% em peso é mais fina

D_{90} – diâmetro de peneiração da areia tal que 90% em peso é mais fina

f_i – frequência relativa de cada intervalo da curva de permanência

F_1 - fator que exprime a velocidade de sedimentação

g – aceleração da gravidade (m/s^2)

J – perda de carga unitária (m/m)

K – fator de correção adimensional

K_s – coeficiente de Manning-Strickler

K_R – coeficiente de Manning-Strickler igual a K_s quando o fundo é plano

L – largura do rio (m)

n – número de intervalos adotados

___ – número de classes ou frações granulométricas na composição de material do leito

N_v – quantidade total de valores da amostra

R – raio hidráulico (m)

S – declividade (m/m)

___ – declividade do gradiente de energia (m/m)

s – densidade do sedimento (adimensional)

U – velocidade média do escoamento (m/s)

____ – velocidade média de partículas (m/s)

q'_{nm} – descarga sólida não medida por metro de largura (t/dia•m)

q'_{sp} – descarga sólida por unidade de largura (N/s.m)

Q_{st} – descarga sólida total (t/dia)

Q_{sm} – descarga sólida medida (t/dia)

Q_{nm} – descarga sólida não medida (t/dia)

Q – descarga líquida (m³/s)

$Q_{máx}$ – a vazão máxima da série (m³/s)

$Q_{mín}$ – a vazão mínima da série (m³/s)

Q_j – limite inferior de cada intervalo da curva de permanência

α – valor adimensional

β – valor adimensional

λ – fator adimensional de correção para a concentração de sólidos medidos

η – coeficiente de rugosidade de Manning (m)

ν - viscosidade cinemática do fluido (m²/s)

γ – peso específico da água (kN/m³)

γ'_s – peso específico dos grãos (kN/m³)

u – porosidade

q_{sa} – descarga sólida de arrasto (N/s•m)

τ_0 – tensão de cisalhamento total no leito (N/m²)

p – profundidade média (m)

τ_{ci} – força trativa crítica, em (N/m²)

D_{si} – diâmetro médio da partícula (m)

i_f – fração, por peso, do material do leito numa dada classe granulométrica

m – soma dos valores de i_f/D_{si} para todas as frações granulométricas na composição do leito

f – indica uma função

d_i – quantidade de dados de descarga líquida observados dentro de cada intervalo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	29
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	29
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	29
2.2.1 Objetivo principal	29
2.2.2 Objetivos secundários	29
2.3 HIPÓTESE	30
2.4 PRESSUPOSTO	30
2.5 PREMISSA	30
2.6 DELIMITAÇÕES	30
2.7 LIMITAÇÕES	31
2.8 DELINEAMENTO.....	31
3 PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS	35
3.1 AGENTES EROSIVOS	35
3.2 FORMAS DE EROSÃO	37
3.2.1 Erosão eólica	37
3.2.2 Erosão fluvial	37
3.2.3 Erosão hídrica superficial	38
4 DEFLÚVIO SÓLIDO MÉDIO ANUAL	41
4.1 CURVA CHAVE DE SEDIMENTOS	41
4.2 CURVA DE PERMANÊNCIA	43
4.3 DETERMINAÇÃO DO DEFLÚVIO SÓLIDO MÉDIO ANUAL.....	46
5 CAPACIDADE DE TRANSPORTE E BALAÇO SEDIMENTOLÓGICO	49
5.1 TRANSPORTE SÓLIDO POR ARRASTE	49
5.1.1 Método de Meyer-Peter e Müller	49
5.1.2 Método de Einstein-Brown	51
5.1.3 Método de Kalinske	52
5.2 TRANSPORTE SÓLIDO EM SUSPENSÃO	54
5.3 BALANÇO SEDIMENTOLÓGICO	55
6 MATERIAIS E MÉTODOS	57
6.1 DESCRIÇÃO DA REGIÃO EM ESTUDO	57
6.2 DADOS DISPONÍVEIS	60
6.2.1 Dados Disponibilizados pela ANA	60

6.2.2 Dados Morfométricos e Morfológicos	63
6.2.3 Dados de Granulometria do Leito	63
7 TRATAMENTO DOS DADOS	67
7.1 CONSISTÊNCIA DOS DADOS	67
7.2 CÁLCULO DA CCS	68
7.3 CÁLCULO DO DEFLÚVIO SÓLIDO MÉDIO ANUAL	71
7.3.1 Curvas de Permanência de Vazões	71
7.3.2 Estimativa do Deflúvio Sólido Médio Anual	74
7.4 ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS MORFOLÓGICOS E MORFOMÉTRICOS	74
7.4.1 Largura Média do Rio Jacuí	76
7.4.2 Perfil Longitudinal e Declividade dos Trechos do Rio Jacuí	76
7.5 CÁLCULO DA CAPACIDADE DE TRANSPORTE	89
7.6 DADOS DE EXTRAÇÃO DE AREIA	85
7.7 BALANÇO SEDIMENTOLÓGICO	86
8 CONCLUSÕES	91
REFERÊNCIAS	95
APÊNDICE A	97
APÊNDICE B	103
APÊNDICE C	107

1 INTRODUÇÃO

Os rios e cursos de água sempre possuíram uma enorme importância para o desenvolvimento da vida humana. Muitas civilizações somente prosperaram devido aos benefícios fornecidos pelos cursos de água. Exemplos dessas civilizações são a Egípcia e a Chinesa, as quais se desenvolveram às margens dos rios Nilo e Amarelo. Muitas dessas civilizações prosperaram devido à utilização dos recursos que os cursos de água tinham para oferecer. Santos (2008) cita como exemplo a utilização da água dos rios para abastecimento, irrigação e geração de energia. Porém existem outros recursos, que não somente a água, que os rios podem oferecer.

A areia é outro recurso que está disponível em todos os rios. Ela possui diversas utilidades. Para a construção civil, ela é de suma importância, porque, na maioria dos processos construtivos, a areia de alguma forma é um insumo presente.

Em se tratando de um recurso natural, a sua disponibilidade depende dos agentes naturais para que ela se torne renovável e esteja disponível à extração. Porém, atualmente, a demanda é muito maior que a sua geração. Assim o presente trabalho tem por objetivo estudar um trecho do Rio Jacuí e verificar o estado de equilíbrio desse trecho, no que diz respeito às entradas e saídas de sedimentos.

Para tanto este trabalho se divide em três partes principais. Na primeira denominada de revisão bibliográfica, na qual são apresentados uma série de conceitos fundamentais para o entendimento do processo de transporte de sedimentos na sua totalidade. Será discutido como os sedimentos são originados (processos erosivos), como é a sua produção (tipos de erosão) e por fim como ocorre o transporte de sedimentos no interior de um rio.

Na segunda parte desse estudo é onde são desenvolvidos os métodos de cálculos propostos na revisão bibliográfica. Tais métodos propiciaram que a estimativa do aporte sólido, proveniente da erosão provocada na bacia hidrográfica fosse apurado. Essa segunda parte engloba o cálculo da capacidade de transporte do trecho de rio em estudo, parâmetro muito importante pois determina a quantidade de sedimentos que podem ser transportados pela massa líquida.

Por fim é realizado o balanço sedimentológico sobre esse trecho do rio em estudo. O balanço sedimentológico foi a ferramenta utilizada nesse trabalho como método de avaliação da situação de equilíbrio do trecho do rio em estudo face à quantidade de sedimentos aportada pela bacia e pela capacidade de transporte que o rio possuía.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: qual a relação entre o aporte sólido, a retirada de sedimentos e o estado de equilíbrio de um trecho do Rio Jacuí?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é o estabelecimento do balanço de sedimentos em um trecho do Rio Jacuí considerando o seu regime de vazões, as retiradas/retenção de sedimentos e o aporte sólido no trecho de rio em estudo.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) a determinação da curva chave de sedimentos para o trecho de rio em estudo que possibilita estimar o aporte de sedimentos;
- b) a determinação da curva de permanência das vazões que possibilita o conhecimento do regime fluviométrico do trecho de rio em estudo;
- c) a estimativa da carga de fundo do trecho em estudo;
- d) estimativa das deposições/retiradas de sedimentos.

2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que através da curva chave de sedimentos é possível estabelecer o aporte sólido de sedimentos em um trecho do Rio Jacuí sujeito à retirada de sedimentos, permitindo avaliar seu estado de equilíbrio.

2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressupostos que:

- a) a existência de dados sedimentométricos e hidrológicos que são obtidos junto ao administrador da rede hidrológica nacional (ANA – Agencia Nacional de Águas), permitem aplicar os métodos de cálculo escolhidos;
- b) a qualidade destes dados permite estabelecer os regimes fluviométrico (vazão) e sedimentométrico que representam o trecho de rio em estudo;
- c) existirá um trecho do Rio Jacuí com dados de retirada/retenção de sedimentos que sejam confiáveis e compatíveis com o regime sedimentométrico do mesmo.

2.5 PREMISSA

O trabalho tem por premissas que:

- a) os métodos de estabelecimento da curva chave de sedimentos e de estimativa do aporte sólido encontrados na literatura são aplicáveis ao trecho de rio em estudo;
- b) os métodos de avaliação da capacidade de transporte de um escoamento são válidos para as características dos sedimentos presentes no trecho de rio em estudo.

2.6 DELIMITAÇÕES

As delimitações deste trabalho estão vinculadas à validade de seus resultados, ou seja, como foram utilizados dados medidos em postos fluviométricos e sedimentométricos escolhidos na região do trecho do Rio Jacuí em estudo, estes resultados não podem ser extrapolados nem generalizados para outras áreas.

2.7 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) a extensão das séries de dados hidro-sedimentológicas disponíveis para o trecho do Rio Jacuí em estudo;
- b) a qualidade dos dados de retirada/retenção de sedimentos;
- c) a quantidade e a qualidade dos dados oriundos da rede hidrométrica e sedimentométrica;
- d) as limitações dos métodos escolhidos para avaliação do aporte sólido e da capacidade de transporte.

2.8 DELINEAMENTO

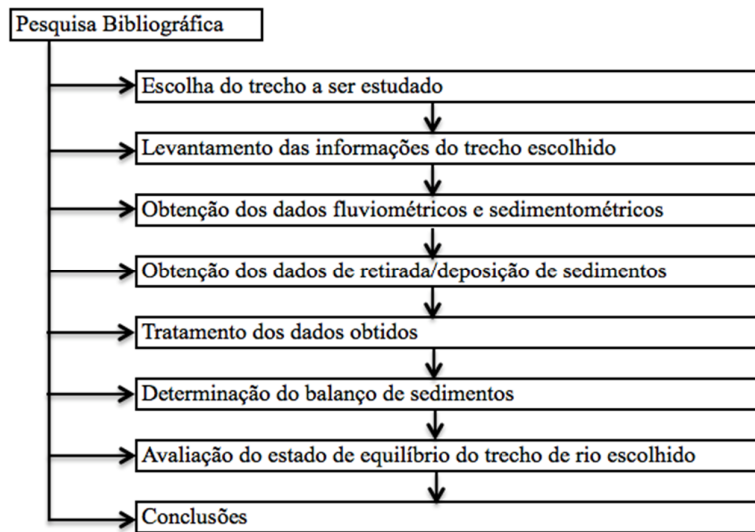
O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, as quais estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) escolha do trecho de rio para estudo;
- c) levantamento das informações disponíveis;
- d) obtenção dos dados dos postos fluviométricos na área de estudo;
- e) obtenção dos dados dos postos sedimentométricos na área de estudo;
- f) estabelecimento do regime fluviométrico do trecho de rio e sua curva de permanência de vazões;
- g) estabelecimento da curva-chave de sedimentos do trecho de rio;
- h) determinação do aporte sólido de sedimento;
- i) determinação da capacidade de transporte do escoamento;
- j) determinação do balanço de sedimentos;
- k) avaliação do estado de equilíbrio do trecho de rio em estudo;
- l) conclusões.

Primeiramente, realiza-se a pesquisa bibliográfica, a qual objetiva obter informações necessárias e relevantes que permitem avaliar o estado de equilíbrio (balanço sedimentométrico) do trecho de rio em estudo. Esta etapa estende-se ao longo de todo o trabalho.

Na etapa seguinte, é feita a escolha do trecho de rio para estudo. Neste item se teve o cuidado de escolher o trecho de rio que possui o maior número de informações disponíveis, ou seja, foi escolhido aquele trecho de rio que possui a maior quantidade de dados fluviométricos e sedimentométricos.

Figura 1 – Representação esquemática do delineamento da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

As etapas de levantamento das informações disponíveis e obtenção dos dados dos postos fluviométricos e sedimentométricos se resumem à coleta de dados. Dados como regime fluviométrico e sedimentométrico foram obtidos junto aos órgãos responsáveis pela administração da bacia hidrográfica na qual o rio escolhido está inserido, os quais podem ser obtidos *on-line* no site da Agência Nacional de Águas (ANA), que é o órgão responsável, a nível nacional, pela gestão das informações sobre as bacias hidrográficas brasileiras.

As etapas em que são determinados os regimes fluviométricos e estabelecida as curvas chave de sedimentos e de permanência de vazões, correspondem ao tratamento dos dados coletados nas etapas de levantamento das informações disponíveis e obtenção dos dados dos postos fluviométricos e sedimentométricos. A determinação do aporte sólido e da capacidade de transporte também faz parte da etapa de tratamento dos dados. Para essa tarefa, primeiramente, se estabelece o regime fluviométrico do trecho de rio em estudo através da curva de permanência. Após a curva de permanência estar estabelecida é possível vincular os dados sedimentométricos com os dados fluviométricos. Essa vinculação somente é possível

através da curva-chave de sedimentos, a qual transforma dados de descarga líquida em dados de descarga sólida, permitindo assim determinar a descarga sólida de abastecimento, ou aporte sólido, da bacia hidrográfica. Isso permite estabelecer um balanço sedimentométrico para o trecho de rio em estudo, que consiste numa avaliação do que o rio consegue transportar (capacidade de transporte) e a quantidade de sedimentos que a ele é aportada.

A penúltima etapa é aquela na qual foi avaliado o estado de equilíbrio do rio em estudo com base nos dados coletados e tratados.

Na última etapa, são avaliados os resultados do balanço de sedimentos para o trecho de rio escolhido.

3 PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

Bordas e Semmelmann (2012, p. 917) entendem a erosão como um "[...] processo de deslocamento de seu local de origem das partículas sólidas da superfície do solo ou das paredes dos leitos dos córregos e rios, sob efeito do escoamento.". De acordo com os autores ela ocorre no momento em que as forças hidrodinâmicas produzidas pelo escoamento ultrapassam a resistência oferecida pelas partículas. Os conceitos para o entendimento deste fenômeno são apresentados ao longo deste capítulo.

3.1 AGENTES EROSIVOS

São considerados agentes erosivos aqueles elementos do meio físico que causam, ou afetam, diretamente a erosão. De acordo com Carvalho (2008) tais agentes podem ser considerados ativos ou passivos. Como agentes ativos o autor cita:

- a) água;
- b) temperatura;
- c) insolação;
- d) vento;
- e) ação antrópica;
- f) outras.

A água, quando ocorre na forma de precipitação, possui elevado efeito erosivo. De acordo com a intensidade da chuva esses efeitos podem ou não ser potencializados. Chuvas fortes e de curta duração são as que possuem a maior possibilidade de promover a desagregação das partículas do solo e, em contrapartida, as precipitações fracas e de longa duração são as responsáveis por transportar os sedimentos desagregados. As chuvas fracas e de longa duração são responsáveis pela formação do escoamento superficial, a qual ocorre porque o solo atinge a sua capacidade máxima de absorção de água. Quando a água não consegue mais infiltrar no solo, tem-se o início do escoamento superficial (CARDOSO, 1998).

De acordo com Carvalho (2008), a temperatura aliada à insolação possui um efeito desagregador de grande importância, pois quando combinadas, ambas provocam dilatações e contrações sucessivas que enfraquecem o solo, facilitando a remoção das partículas.

Considerado como um agente ativo de menor importância, o vento não possui influência na desagregação das partículas sólidas, pois ele atua sobre as partículas já destacadas. Geralmente, o vento possui uma relevância maior como agente erosivo quando outros agentes erosivos não conseguem atuar. Em planícies, o vento é preponderante à água, pois nestes locais não se processa o escoamento superficial devido à falta de declividade do terreno (CARVALHO, 2008).

Devido ao crescimento populacional e à ocupação territorial, a ação antrópica tende a intensificar-se. São exemplos de ações antrópicas, que favorecem os processos erosivos: as remoções de terra, as escavações e o preparo do solo para cultivo de alimentos.

Os agentes passivos são àqueles que necessitam agir de forma conjunta com um agente erosivo ativo para ter o seu efeito de erosão. Carvalho (2008) considera como agentes passivos:

- a) topografia;
- b) gravidade;
- c) tipo de solo;
- d) cobertura vegetal;
- e) ações antrópicas.

O efeito da topografia está relacionado com a declividade e comprimento das encostas. Terrenos mais acidentados fazem com que a água da chuva escoe tão rápido que não consiga infiltrar no solo provocando o aumento das tensões entre solo e água e a consequente remoção desse solo.

A menos que exista uma força externa atuando juntamente com a ação gravitacional, a erosão não ocorre. Como mencionado anteriormente, a força gravitacional é uma potencializadora dos efeitos erosivos causados pela água.

No caso do agente passivo, a ação antrópica diz respeito a ação do Homem como agente erosivo, ou seja, como realiza efetivamente a erosão. A agricultura e a remoção de terra para

fiz construtivos são exemplo da contribuição humana para o desenvolvimento dos processos erosivos.

3.2 FORMAS DE EROSÃO

Existem duas formas em que a erosão se processa nos solos: a geológica e a acelerada. A forma geológica é aquela que se processa de forma natural, sem a intervenção humana e de forma contínua. A erosão acelerada possui essa denominação devido às práticas realizadas pelo homem, como agricultura e obras civis, que aceleram os processos erosivos.

Basicamente existem três de ocorrência da erosão: a eólica, a fluvial e a hídrica superficial segundo Carvalho (2008). Neste capítulo são descritos os agentes erosivos responsáveis por esses tipos de erosão.

3.2.1 Erosão eólica

A erosão eólica ocorre em terrenos secos devido a falta de água no solo, fazendo com que as partículas percam coesão, assim facilitando a sua erosão por ação do vento. O vento somente consegue transportar o material que já foi erodido. Por esse motivo, o vento torna-se importante somente em regiões planas, nas quais o escoamento superficial possui dificuldade de se processar, e em regiões áridas e semi-áridas, onde a proteção vegetal é escassa.

3.2.2 Erosão fluvial

A erosão fluvial é a erosão provocada pelo próprio escoamento dos rios. Por ser provocada pelo próprio rio, a erosão fluvial ocorre de forma contínua. Essa erosão é de grande interesse na morfologia fluvial, pois é ela a responsável por quase todas as modificações que ocorrem nos rios, como por exemplo, alterações nas posições dos meandros, aprofundamento e alargamento do seu leito. A erosão hídrica fluvial pode se desenvolver como erosão de leito ou da margem. De acordo com Carvalho (2008, p. 39), a erosão do leito fluvial é "[...] ocasionada pela ação da corrente, enquanto que a erosão de margem pode ocorrer pela ação da corrente, pela ação das ondas ou mesmo pelo encharcamento do terreno marginal provocando seu desabamento."

3.2.3 Erosão hídrica superficial

A erosão hídrica superficial ocorre devido ao impacto das gotas de chuva ao caírem sobre superfícies desprotegidas. Esse processo desenvolve-se tanto em terrenos planos como em declives. As gotas de chuva possuem uma quantidade de energia potencial gravitacional no momento da sua formação, a qual é transformada em energia cinética ao longo da sua trajetória de queda livre, até atingir o solo, desagregando-o. No momento em que a capacidade de infiltração do solo é excedida, se inicia o escoamento superficial, o qual é o responsável pelo deslocamento da partícula da sua origem até o seu destino final que é o curso de água. O fenômeno da erosão hídrica pode ser acelerado ou mitigado pela ação do homem (CARVALHO, 2008).

De acordo com Cardoso (1998) os fatores que influenciam a erosão hídrica superficial são:

- a) erosividade do agente erosivo;
- b) erodibilidade do solo;
- c) declividade e comprimento das encostas;
- d) uso do solo e cobertura vegetal.

Segundo o autor, a erosividade pode ser traduzida como a capacidade do agente erosivo de desagregar o solo. No caso da precipitação, a sua erosividade seria função, basicamente, do tamanho da gota de chuva, da energia da gota de chuva no momento do impacto com o solo e da intensidade da precipitação.

A erodibilidade é a facilidade com que o solo pode ser desagregado. A erodibilidade do solo é função da sua composição (argiloso, siltoso, etc.), a qual determina suas características físicas como, por exemplo, granulometria e ângulo de atrito interno. Para as mesmas condições de precipitação Cardoso (1998, p. 97) cita:

Os solos com elevados teores de silte ou areia fina são, em geral, pouco erodíveis, tendência que se acentua com o aumento do teor de matéria orgânica. Por outro lado quanto mais grosseira for a estrutura granular do solo, e menor for a sua permeabilidade, maior será a sua propensão para ser erodido.

A declividade e o comprimento das encostas são outros fatores preponderantes na erosão hídrica. Quanto maiores forem a declividade e os comprimentos desses trechos, maior é a energia que tem o escoamento superficial para promover a erosão. O escoamento superficial

possui uma capacidade de transporte como os cursos de água possuem. E por não possuir nenhum sedimento sendo transportado no início do seu escoamento ele tende a ir erodindo o terreno para suprir o débito que possui na capacidade de transporte. Cardoso (1998, p. 97) descreve de forma semelhante a importância do fator declividade na erosão hídrica superficial.

Quanto mais declivosa, for uma encosta, para iguais condições de erosividade da precipitação e de erodibilidade do solo, mais susceptível ela é à erosão, uma vez que as partículas desagregadas pelo impacto da chuva têm maior tendência para se deslocarem no sentido descendente. Além disso, para iguais alturas do escoamento superficial, a tensão de arrastamento no fundo e a correspondente capacidade de erosão aumentam com o declive. Mantendo invariáveis todos os outros fatores, a erosividade do escoamento superficial ainda com o comprimento da encosta na medida em que a altura do escoamento e a tensão de arrastamento no fundo também aumentam.

4 DEFLÚVIO SÓLIDO MÉDIO ANUAL

Segundo Carvalho (2008), o deflúvio sólido médio ou também chamado de descarga sólida de abastecimento, é um dos parâmetros mais importantes em estudos sedimentológicos. Segundo o autor, o método mais utilizado e exato no cálculo do deflúvio sólido médio é utilizando-se a curva de permanência, obtida a partir das descargas líquidas médias diárias, juntamente com a Curva Chave de Sedimentos (CCS). Nesta pesquisa será discutida a forma de calcular o deflúvio sólido médio quando não existem medições diárias de sedimentos. Essa abordagem será adotada, porque, de acordo com o autor a existência de dados eventuais é mais comum no Brasil. Para a realização dessa conversão, o autor descreve como sendo a CCS juntamente com a curva de permanência, as melhores ferramentas para a realização deste procedimento. Ambas são descritas no decorrer deste capítulo.

4.1 CURVA CHAVE DE SEDIMENTOS

Neste item são apresentados os procedimentos necessários para a construção da CCS que segundo Carvalho (2008, p. 294) possui a seguinte definição:

Curvas de transporte de sedimentos relacionam concentração, descarga sólida ou valores derivados de estudos sedimentológicos, em geral, com outras grandezas como tempo, descarga líquida, nível d'água, profundidade, velocidade e demais derivadas de estudos afins. Podem ser obtidas pela simples ligação dos pontos ou por curva média interpolada entre os pontos plotados ou disponíveis, o que é feito conforme o caso em estudo.

Para se ter uma boa representatividade da descarga sólida por meio da CCS deve-se ter o maior número de pontos possíveis entre os valores mínimo e máximo da descarga líquida observada (CARVALHO, 2008). A quantidade de dados entre os valores extremos da descarga líquida observada é importante, porque valores extremos não representam, na média, os valores ocorridos de descarga líquida. Caso fossem assumidos os valores extremos como representativos dos valores médios de ocorrência da descarga líquida não se estaria representando a realidade. De acordo com o autor, a CCS pode ser obtida de valores de concentração de sedimentos ou descarga sólida. Recomenda-se que a CCS seja traçada

utilizando-se os dados de descargas sólida, pois apresentam uma menor dispersão quando comparados aos dados de concentração, segundo o autor.

Sobre o traçado da CCS, Carvalho et al. (2000, p. 110) fazem as seguintes recomendações:

O traçado da curva-chave de sedimentos exige cuidados especiais, uma vez que a dispersão dos dados obtidos é grande. A uma mesma vazão a descarga sólida pode variar de 10 a 100 ou mais. Diversos fatores podem influir no traçado, sendo os principais derivados dos diversos fenômenos, como o processo de erosão, a variação sazonal, tempo entre pique da concentração de sedimento e o pique da vazão, e os eventos de enchentes. Em anos de cheias extremas, a produção de sedimentos pode ser muito grande, afetando a curva-chave.

Mais recomendações sobre o traçado e a quantidade de pontos utilizados na confecção da curva são feitas por Carvalho et al. (2000, p. 111):

Essas curvas podem ser traçadas para períodos sazonais ou de tempo. Normalmente são traçadas em escala bilogarítima, podendo ser obtida uma reta interpolada entre os pontos, ou mais retas, de acordo com a tendência dos pontos. Cuidado especial deverá se ter quando um grande número de pontos está concentrado em uma faixa de variação, o que matematicamente influenciará na direção da curva.

Sobre a importância da frequência e qualidade dos dados, Carvalho et al. (2000, p. 114) citam:

Pouca quantidade de dados de sedimento, falando-se da frequência de operação, pode conduzir à obtenção de parâmetros inadequados. Dados de operação eventual devem cobrir toda a variação do nível d'água e a vazão no posto, bem como abranger todo o período de estiagem, primordialmente, do período chuvoso. Parâmetros adequados de estudos são de primordial importância. Assim, pode-se chegar à conclusão que, mesmo tendo-se bons dados, se estes não foram obtidos com frequência adequada, conduzirão a estudos corretos.

A Construção da CCS consiste na plotagem das medições observadas de descargas sólida e líquida em escala bilogarítima conforme recomendação anterior de Carvalho et al. (2000). Após graficar, deve-se fazer uma inspeção visual nos pontos procurando encontrar a melhor tendência para traçar a curva. Pode-se traçar mais de uma curva caso não exista uma tendência única entre os pontos plotados sendo necessário traçar uma curva para cada um desses intervalos. De acordo com Carvalho (2008), a curva a ser ajustada entre os pontos plotados possui a seguinte expressão:

$$Q_{st} = \alpha \cdot Q^\beta \quad (1)$$

Sendo:

Q_{st} – descarga sólida total em t/dia;

Q – descarga líquida em m^3/s ;

α e β – valores adimensionais, a serem ajustados.

Carvalho (2008) sugere que, para a determinação da curva, sejam escolhidos dois pontos e substituídos na equação (1). Após a substituição dos dois pontos na equação (1), tem-se duas equações, as quais podem ser resolvidas aplicando as propriedades dos logaritmos para que o coeficiente β seja determinado. Restando apenas a substituição deste coeficiente em qualquer uma das duas equações para que seja determinado o coeficiente α . Cabe salientar que esta forma de ajuste era válida quando os utensílios de cálculo eram limitados. Hoje em dia, se faz um ajuste estatístico empregando todos os pontos com o auxílio, por exemplo, de planilhas eletrônicas e calculadoras gráficas. Uma vez determinados os coeficientes, pode-se gerar uma lista de descargas sólidas a partir dos dados de descarga líquida. A geração desses dados é importante no cálculo do deflúvio sólido médio, o qual será visto na sequência deste trabalho. Cabe salientar que a eficiência da CCS pode ser comprometida devido ao fato que ela visa preencher as lacunas de dados de descarga sólida que não foram medidos a partir de dados eventuais.

4.2 CURVA DE PERMANÊNCIA

Tucci (2012) define a curva de permanência como sendo uma curva que relaciona os valores de descarga líquida, ou nível, com a probabilidade desses valores serem iguais ou maiores que os valores observados. O autor afirma que a curva de permanência pode ser estabelecida com dados diários, semanais ou mensais, sendo a metodologia empírica uma das formas de sua construção.

A descrição da metodologia empírica é a seguinte (TUCCI, 2012 p. 603):

A metodologia de determinação da curva de permanência consiste em estabelecer n intervalos de classe de vazões (ou níveis). Os intervalos podem ser estabelecidos de acordo com a magnitude das vazões procurando ter uma quantidade razoável de valores que caíam em cada intervalo. [...] A subdivisão de cada intervalo pode ser baseada na escala logarítmica devido à grande variação de magnitude das vazões envolvidas. [...].

De acordo com o autor a amplitude de cada intervalo é calculada pela seguinte expressão:

$$d = \frac{[\ln(Q_{\text{máx}}) - \ln(Q_{\text{mín}})]}{n} \quad (2)$$

Sendo:

$Q_{\text{máx}}$ – a vazão máxima da série;

$Q_{\text{mín}}$ – a vazão mínima da série;

n – o número de intervalos adotados.

Carvalho (2008) sugere que sejam adotados entre 20 e 30 intervalos.

Para o cálculo dos limites inferiores de cada intervalo Tucci (2012) sugere:

$$Q_j = EXP[Q_{\text{mín}} + (j-1) \cdot d] \quad (3)$$

Sendo:

$Q_{\text{mín}}$ – vazão mínima da série;

j – número do intervalo;

d – amplitude do intervalo;

EXP – função exponencial natural.

Os autores informam que a frequência (f_i) de cada intervalo é obtida pela quantidade de dados de descarga líquida observados dentro de cada intervalo, sendo o seu valor acumulado em porcentagem calculado pela equação (4):

$$f_i = \frac{d_i}{N_v} \cdot 100 \quad (4)$$

Sendo:

d_i – quantidade de dados de descarga líquida observados dentro de cada intervalo;

N_v – quantidade total de valores da amostra.

No quadro 1 é mostrado, como sugestão, uma planilha para a determinação da curva de permanência.

Quadro 1 – Planilha para cálculo da curva de permanência

Intervalo	Intervalo Médio	Quantidade de Eventos	Frequência Relativa	Frequência Acumulada (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)

(fonte: adaptado de CARVALHO, 2008)

Para a montagem da curva de permanência é sugerida a seguinte rotina de cálculo:

- a) coluna 1 – é preenchida utilizando as equações (2) e (3) e adotando-se o valor de intervalos sugerido por Carvalho (2008);
- b) coluna 2 – é determinada pela média aritmética entre os extremos do intervalo;
- c) coluna 3 – é a quantidade de eventos existentes entre os extremos do intervalo;
- d) coluna 4 – é calculada de acordo com a equação (4);
- e) coluna 5 – é determinada pela acumulação dos valores da coluna 5.

Após o procedimento pode-se gerar a curva de permanência plotando um gráfico das descargas líquidas em função da frequência acumulada. A plotagem dessa curva fornece uma boa ideia do regime fluviométrico, pois se pode obter a informação da frequência com a qual uma certa vazão ocorre no rio.

4.3 DETERMINAÇÃO DO DEFLÚVIO SÓLIDO MÉDIO ANUAL

A determinação do deflúvio sólido médio pode ser feita, segundo Carvalho (2008), com base em dados diários ou de medições eventuais de sedimentos. Caso existam apenas dados de medições eventuais de descarga sólida, existe a possibilidade que eles sejam convertidos em dados diários. O autor sugere que, para a realização desse procedimento, seja seguida uma rotina de passos:

- a) 1 – traçar a curva de permanência do curso de água para o ano que se quer calcular o deflúvio sólido médio com base nos dados de descarga líquida;
- b) 2 – determinar a CCS;
- c) 3 – calcular da vazão média diária e o deflúvio médio diário;
- d) 4 – determinar o deflúvio sólido médio anual.

O primeiro passo do processo é realizado através do procedimento sintetizado na planilha apresentada no quadro 1. O segundo passo é realizado utilizando-se o método de ajuste descrito no item 4.1. A construção da CCS (segunda etapa) é realizada utilizando-se o método do traçado visual.

Para o cálculo da terceira etapa Carvalho (2008, p. 318) sugere um procedimento utilizando as variáveis apresentadas no quadro 2.

Quadro 2 – Planilha para cálculo da vazão média diária e do deflúvio médio diário

Porcentagem do tempo	Vazão igualada ou superada	Intervalo entre % sucessivas	Vazão média do intervalo	Descarga sólida total	Descarga sólida média	Vazão média X intervalo	Descarga sólida média X intervalo
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)

(fonte: adaptado de CARVALHO, 2008)

- a) coluna 1 e 2 – valores da curva de permanência obtidos de tal forma a se ter pontos em maior quantidade nas posições de maior variação da curva de permanência, sendo o primeiro ponto o valor máximo da descarga do período;
- b) coluna 3 – diferença entre dois valores sucessivos da coluna 1;
- c) coluna 4 – vazão média entre dois valores sucessivos da coluna 2;
- d) coluna 5 – valores obtidos da CCS com os resultados da coluna 2;
- e) coluna 6 – média entre dois valores sucessivos da coluna 5;
- f) coluna 7 – produto dos valores das colunas 3 e 4, dividido por 100 (produto das frações da coluna 3 pelos valores da coluna 4);
- g) coluna 8 – produto dos valores das colunas 3 e 6, dividido por 100.

Após a conclusão das três primeiras etapas sugeridas por Carvalho (2008) o cálculo do deflúvio médio anual é separado em três etapas. A primeira é a determinação da vazão média no período. Essa determinação é feita realizando-se o somatório da coluna 7 do quadro 2. A segunda etapa é idêntica a primeira, porém o somatório é realizado da coluna 8. Por fim, a terceira etapa, a determinação do deflúvio médio anual no período, é dado pelo produto do valor encontrado na segunda etapa por 365 dias.

Carvalho (2008, p. 319) faz as seguintes considerações sobre o cálculo do deflúvio:

O deflúvio sólido calculado a partir de dados de vazões mensais, [...], certamente resulta em valor médio menor que o verdadeiro. Isso é devido ao fato de a descarga sólida ser muito influenciada pelos valores de vazões máximas, quando grande quantidade de sedimentos é transportada para os cursos d'água. Para valores mais exatos de deflúvio sólido médio, convém calcular a partir de dados de vazões médias diárias.

5 CAPACIDADE DE TRANSPORTE E BALANÇO SEDIMENTOLÓGICO

Segundo Borges (1987), a capacidade de transporte é definida como a máxima quantidade de sedimentos que podem ser transportados por um escoamento sem alterar a forma da seção transversal do leito. Sendo assim, a capacidade de transporte não possui um valor máximo único, ou seja, a capacidade de transporte é alterada pela própria carga sólida transportada. Cardoso (1998) complementa essa definição descrevendo a capacidade de transporte de um rio como uma propriedade que varia ao longo do seu percurso. De acordo com o autor as propriedades que influenciam na capacidade de transporte de um rio são a declividade da linha de água e a velocidade do escoamento. Neste capítulo são apresentados os métodos para o cálculo dos tipos de transporte sólido que ocorrem em um escoamento.

5.1 TRANSPORTE SÓLIDO POR ARRASTE

Segundo Carvalho (2008), a descarga sólida de arrasto representa a menor parte da descarga sólida total e que ela corresponde de 5% a 10% da descarga sólida em suspensão. Apesar de representar uma pequena parcela do transporte sólido total, a descarga sólida de fundo é muito importante, pois é através da deposição do sedimento de fundo que o rio busca equilibrar a sua capacidade de transporte. Em se tratando de um fenômeno bastante complexo, existem diversos métodos para a sua determinação. Neste item são apresentados os métodos escolhidos para a estimativa da carga sólida de fundo, os quais são adotados pela ANA para tratamento dos dados sedimentológicos dos rios brasileiros.

5.1.1 Método de Meyer-Peter e Müller

De acordo com Cardoso (1998), a fórmula de Meyer-Peter e Müller foi desenvolvida a partir de uma sequência extensiva de experimentos, os quais conferiram ao método uma grande aceitação devido à base experimental sólida utilizada na sua formulação.

Cardoso (1998) expressa a fórmula proposta por Meyer-Peter e Müller como sendo:

$$\left(\frac{K_S}{K_R}\right)^{3/2} \cdot \gamma \cdot R \cdot J = 0,047 \cdot \gamma'_s \cdot D + 0,25 \cdot \left(\frac{\gamma}{g}\right)^{1/3} \cdot (q'_{SP})^{2/3} \quad (5)$$

Nos quais,

$$K_S = \frac{U}{\left(R^{2/3} \cdot J^{1/2}\right)} \quad (6)$$

$$q'_{SP} = q_{SV} \cdot (1 - \nu) \cdot (\gamma'_s - \gamma) \quad (7)$$

$$K_R = \frac{1}{\eta} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{(D_{90})^{1/6}}{26} \quad (9)$$

Sendo:

K_S – coeficiente de Manning-Strickler;

K_R – coeficiente de Manning-Strickler igual a K_S quando o fundo é plano;

D – diâmetro médio das partículas (mm);

R – raio hidráulico (m);

J – perda de carga unitária (m/m);

U – velocidade média do escoamento (m/s);
 g – aceleração da gravidade (m/s²);
 γ – peso específico da água (kN/m³);
 γ'_s – peso específico dos grãos (kN/m³);
 q'_{sp} – descarga sólida por unidade de largura (N/s.m);
 η – coeficiente de rugosidade de Manning;
 D_{90} – diâmetro de peneiração da areia tal que 90% em peso é mais fina
 v – porosidade.

No caso de fundo plano para o canal $K_S/K_R=1$ (CARDOSO, 1998).

As condicionantes para a utilização do método, segundo Cardoso (1998), são as seguintes:

- a) a altura do escoamento (h) variando entre 0,01 m e 1,20 m;
- b) a declividade (i) do fundo maior ou igual à 0,0004;
- c) o diâmetro das partículas esteja compreendido entre 0,4 mm e 30 mm;
- d) a densidade dos grãos esteja contida no intervalo de 1,25 e 4,2.

5.1.2 Método de Einstein-Brown

De acordo com Carvalho (2008), esse método de Einstein-Brown é uma modificação do método original proposto por Hans Einstein. Devido ao transporte sólido por arraste se desenvolver em consequência das flutuações provocadas pelo escoamento turbulento, o início e término do movimento das partículas é expresso de forma probabilística.

Cardoso (1998) apresenta a fórmula de Einstein-Brown como sendo:

$$\phi = \frac{q_{sp}}{\gamma_s \cdot F_1 \cdot \sqrt{g(s-1) \cdot D_{50}^3}} \quad (10)$$

Nos quais,

$$F_1 = \left[\frac{2}{3} + \frac{36 \cdot v^2}{g \cdot (D_{50})^3 \cdot (s-1)} \right]^{\frac{1}{2}} - \left[\frac{36 \cdot v^2}{g \cdot (D_{50})^3 \cdot (s-1)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$s = \frac{\gamma_s}{\gamma} \quad (12)$$

Sendo:

F_1 – fator que exprime a velocidade de sedimentação;

v – viscosidade cinemática do fluido (m^2/s);

s – densidade do sedimento (adimensional);

g – aceleração da gravidade (m/s^2);

γ – peso específico da água (kN/m^3);

γ_s – peso específico dos grãos (kN/m^3);

q_{SP} – descarga sólida por unidade de largura ($N/s.m$);

D_{50} – diâmetro de peneiração da areia tal que 50% em peso é mais fina.

5.1.3 Método de Kalinske

De acordo com Stevens e Yang¹ (1989 apud CARVALHO, 2008 p. 241), a fórmula desenvolvida por Kalinske para o cálculo da descarga sólida de arrasto, para material de granulometria uniforme é “[...] baseada na equação de continuidade que determina que a descarga sólida do leito é igual ao produto da velocidade média das partículas em movimento pelo peso de cada partícula e pelo número de partículas.”. Assim como o método de Einstein-Brown, o método de Kalinske é utilizado para estimativas da carga de fundo, porém é aplicado a sedimentos de granulometria igual as areias.

¹ STEVENS, H, H; YANG, C, T. **Summary and use of selected fluvial sediment-discharge formulas**. United State Geological Survey, 1989. 121 p. (Water Resources Investigations Report , 89-4026).

A expressão proposta por Kalinske é (CARVALHO, 2008):

$$q_{sa} = 25,28 \sqrt{\tau_0} \sum_{i=1}^n \tau_{ci} \frac{i_f / D_{si}}{m} f \left[\frac{U}{V} \right] \quad (13)$$

No qual,

$$\tau_0 = 62,4 \cdot p \cdot S \quad (14)$$

$$\tau_{ci} = 12 \cdot D_{si} \quad (15)$$

$$\frac{U}{V} = f \left[\frac{\tau_{ci}}{\tau_0} \right] \quad (16)$$

Sendo:

q_{sa} – descarga sólida de arrasto (N/s•m);

n – número de classes ou frações granulométricas na composição de material do leito;

τ_0 – tensão de cisalhamento total no leito (N/m²);

p – profundidade média (m);

S – declividade do gradiente de energia (m/m);

τ_{ci} – força trativa crítica (N/m²);

D_{si} – diâmetro médio da partícula (m);

i_f – fração, por peso, do material do leito numa dada classe granulométrica;

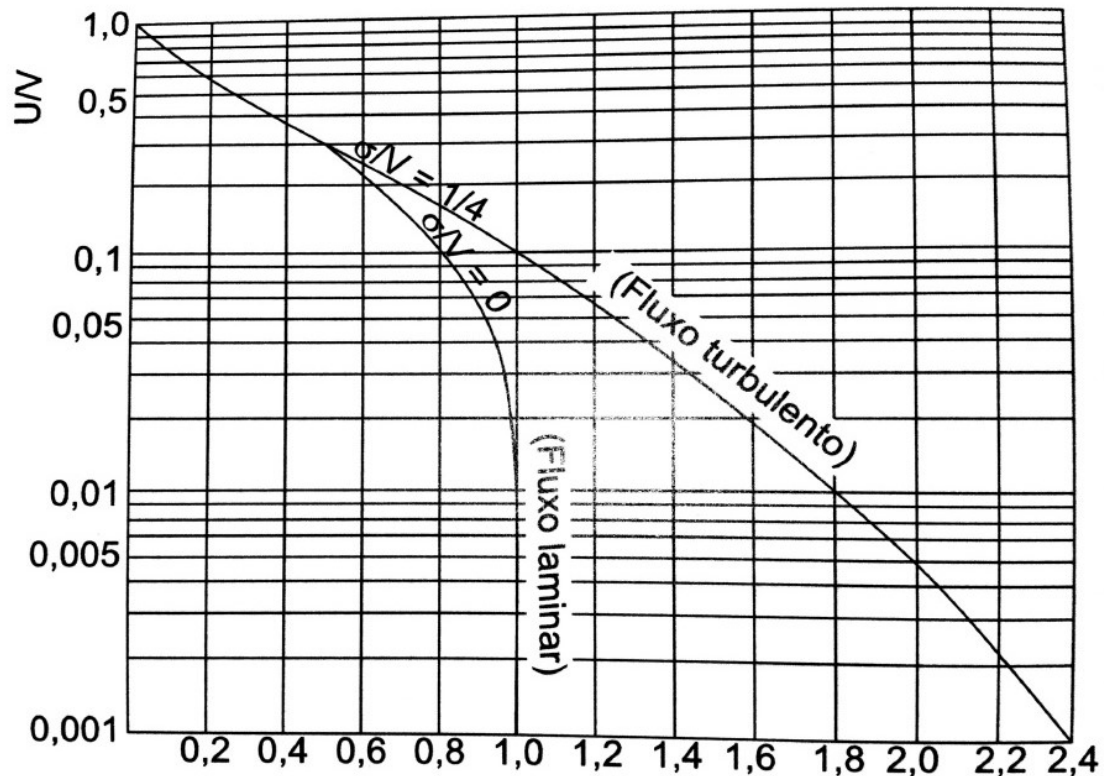
m – soma dos valores de i_f/D_{si} para todas as frações granulométricas na composição do leito;

f – indica uma função dada pela figura 2;

U – velocidade média de partículas (m/s);

V – velocidade média do escoamento (m/s).

Figura 2 – Função do método de Kalinske



(fonte: CARVALHO, 2008)

As condicionantes do método são (CARVALHO, 2008):

- a) peso específico do sedimento é considerado constante;
- b) é aplicável a areias;
- c) considera a granulometria dos sedimentos uniforme.

5.2 TRANSPORTE SÓLIDO EM SUSPENSÃO

O material em suspensão representa a maior parcela da descarga sólida total. Segundo Carvalho (2008), a quantidade de sólidos transportados em suspensão varia de 80 a 90% podendo chegar até 95% do total transportando pelo rio. O autor relata que a quantidade de sedimentos em suspensão pode variar de acordo com os seguintes parâmetros:

- a) curso d'água;
- b) posição da seção;
- c) velocidade do escoamento;
- d) tipo de escoamento;
- e) profundidade;
- f) granulometria e outros fatores.

A determinação da descarga sólida em suspensão é feita diretamente com os dados obtidos na administradora da rede hidrológica através da equação 18, a qual representa a descarga sólida medida (CARDOSO, 1998).

$$Q_{sm} = 0,0864 \cdot Q \cdot C'_s \quad (17)$$

5.3 BALANÇO SEDIMENTOLÓGICO

De acordo com Borges (1987), o balanço sedimentológico pode ser utilizado como ferramenta para avaliar o estado de equilíbrio em que se encontra um curso d'água. A autora explica que o equilíbrio, normalmente, ocorre devido à ausência dos fenômenos de erosão e deposição em um curso de água. Ou seja, a capacidade de transporte e a descarga sólida são praticamente idênticas. É nesse contexto que o balanço sedimentológico é feito, pois segundo a autora o equilíbrio de um curso d'água é muito suscetível a mudanças sendo os fatores naturais ou provocados pelo homem a causa desse desequilíbrio.

Para analisar o balanço sedimentológico, é necessário que se tenha os conhecimentos da descarga sólida de abastecimento e da capacidade de transporte para que, a partir deles, se tenha condições de estimar se ocorrem os fenômenos de deposição ou erosão no curso d'água. As modificações do leito fluvial dependem da relação entre a capacidade de transporte e a disponibilidade de sedimentos.

As condições de deposição e suas consequências, segundo Borges (1987, p. 7) podem ser assim definidas:

O depósito em um trecho do curso d'água ocorre quando a descarga de abastecimento (volume de sedimentos que entra) é maior do que a capacidade de transporte do escoamento. Consequentemente, parte do sedimento é transportada e parte (excesso) se deposita, [...].

Por outro lado as condições da erosão e suas influências de acordo com Borges (1987, p. 7), são:

A erosão ocorre, se possível, quando o volume de sedimento que entra no trecho é inferior à capacidade de transporte do escoamento. O volume extra de sedimento necessário para satisfazê-la é obtido através da erosão do fundo e das margens, provocando rebaixamento do leito e alargamento da seção transversal.

Basicamente o balanço de sedimentos nada mais é do que uma relação entre a quantidade aportada de sedimentos e a capacidade de transporte do escoamento, o qual nos permite avaliar a condição de equilíbrio de um trecho de rio.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será descrito como foram obtidos os dados para o estudo e como foram feitos os cálculos necessários para se chegar nas conclusões do trabalho.

6.1 DESCRIÇÃO DA REGIÃO EM ESTUDO

Neste capítulo, são abordados os aspectos físicos da região em estudo, na qual se localiza o Rio Jacuí, objeto de estudo desse trabalho. Serão abordados os aspectos fisiográficos da região em estudo, bem como será realizada uma descrição dos dados fluviométricos e sedimentométricos disponíveis na região, com vistas a gerar a bases de informações que fundamentará o entendimento do trânsito de sedimentos e das condições de equilíbrio do transporte sólido em trecho do Rio Jacuí.

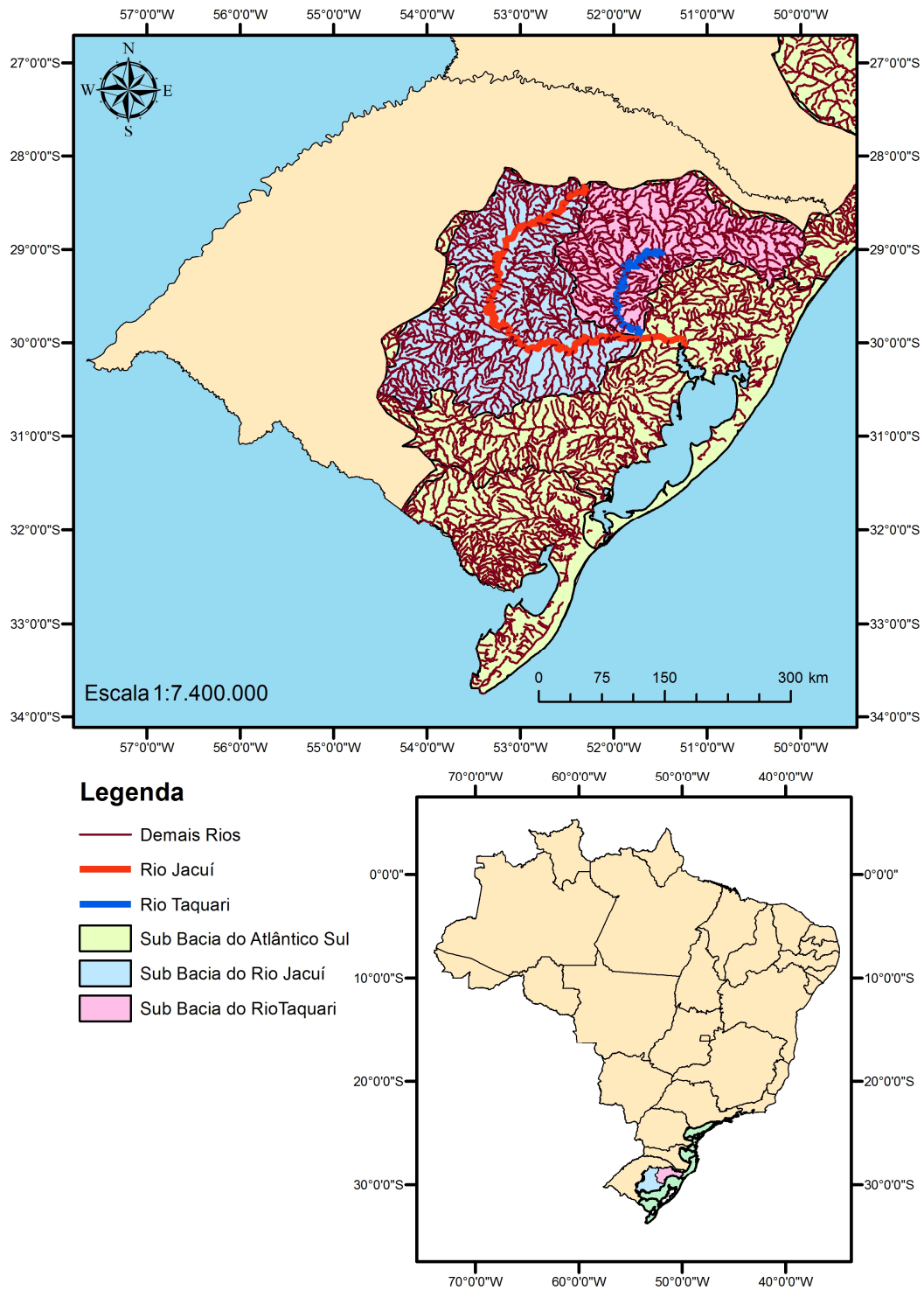
O Rio Jacuí está inserido na bacia hidrográfica do Atlântico Sul, a qual pode ser caracterizada da seguinte forma (BRASIL, 2006 p. 23):

[...] corresponde à porção mais meridional do Brasil, no que concerne à vertente litorânea, abrangendo 2,2% do território nacional e 6,8% da população, detendo 2,6% da disponibilidade hídrica do país e exercendo 14,6% da demanda dos recursos hídricos.

Situada entre as coordenadas 24°30' e 34°30' de Latitude Sul, 48°00' e 58°00' de Longitude Oeste, a Região Hidrográfica Atlântico Sul apresenta área de 186.080 km², sendo 142.178 km² do Rio Grande do Sul (76,4%), 36.649 km² de Santa Catarina (19,7%) 5.732 km² do Paraná e 1.521 km² de São Paulo (0,8%).

A figura 3 representa a caracterização e localização da bacia do Atlântico Sul segundo a definição citada anteriormente.

Figura 3 – Área de abrangência da bacia do Atlântico Sul



(fonte: elaborado pelo autor)

O Rio Jacuí corresponde ao maior rio do estado do Rio Grande do Sul. De acordo com a FEPAM a descrição da bacia hidrográfica do Rio Jacuí é feita da seguinte maneira (RIO GRANDE DO SUL, 2014):

A bacia hidrográfica do Rio Jacuí tem área de 71.600 km², que corresponde a 83,5% da área da região hidrográfica do Guaíba.

O Rio Jacuí nasce no Planalto, nos municípios de Passo Fundo e Marau, e toda a sua área de drenagem caracteriza-se pelo uso intensivo do solo para agricultura e pecuária.

O seu trecho superior caracteriza-se também pelo aproveitamento energético, onde estão instaladas as UHEs (usinas hidrelétricas) Ernestina, Passo Real, Salto do Jacuí, Itaúba e Dona Francisca.

O Rio Jacuí tem suas principais nascentes localizadas no Planalto, cerca de 10 km a leste da cidade de Passo Fundo, numa altitude aproximada de 730 m. Seu comprimento total aproximado é de 710 km. Corre, na direita, o Rio Jacuí-mirim; muda para a direção sul até a Depressão Central, onde recebe as águas dos rios Vacacaí-mirim e Vacacaí na margem direita. Daí toma a direção oeste-leste, com a denominação de Baixo Jacuí recebe a contribuição do rio Taquari na margem esquerda, e percorrendo cerca de 300 km até a sua foz, com a formação do Delta do Jacuí, onde desembocam os rios Gravataí, Sinos e Cai.

A precipitação média anual na bacia é variável, atingindo 1.600 mm no seu valor mais alto, nas zonas compreendidas pelo curso principal do Rio Jacuí até a foz do Jacuizinho e pelas cabeceiras do rio das Antas. O seu valor mais baixo, em torno de 1.200 mm anuais, encontra-se na zona compreendida pelo curso principal do Rio Jacuí, entre Dona Francisca e a confluência com o rio Taquari.

Os principais contribuintes do Jacuí, em sua margem direita são os rios Jacuí-mirim, Ivaí, Vacacaí-mirim e Vacacaí, e na margem esquerda os rios Jacuizinho, Pardo e Taquari.

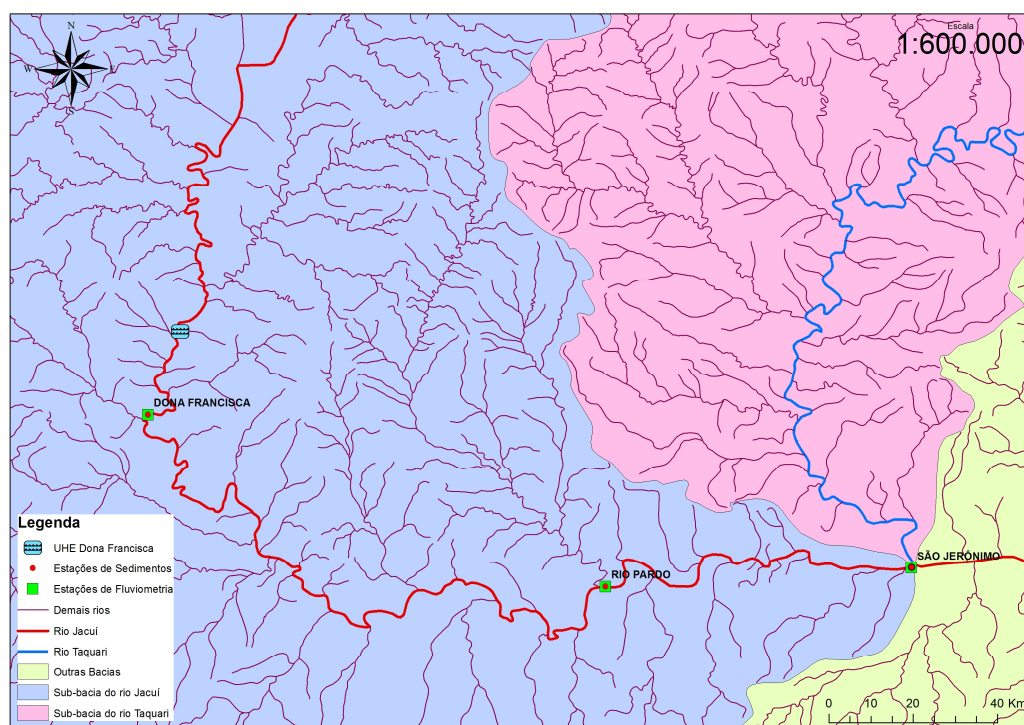
Na área de drenagem da bacia do Jacuí encontram-se aglomerações urbanas de porte significativo, destacando-se as cidades de Santa Maria (face leste), Cachoeira do Sul, Rio Pardo, São Jerônimo, Triunfo, Caxias do Sul (face norte que drena para o rio das Antas), Bento Gonçalves (drena para o rio das Antas), Lajeado (rio Taquari), Estrela (rio Taquari) e Taquari (rio Taquari).

A área norte do Rio Jacuí predominam as culturas intensivas de soja e trigo, através do sistema de cultura rotativa. Na área sul aparece, além destas culturas, o cultivo do arroz e um incremento da pecuária. Salientamos que o mau uso do solo agrícola e a falta de práticas conservacionistas conduzem aos processos erosivos, com o aumento da turbidez e dos sólidos totais nas águas desta bacia.

O Rio Jacuí é navegável da foz até Cachoeira do Sul, trecho onde se localizam 3 eclusas para navegação. É o principal trecho de pesca comercial de águas interiores do Rio Grande do Sul.

Na figura 4 fica evidente a diferença na quantidade de estações fluviométricas em relação as sedimentométricas, existe uma densidade muito maior de registros de dados de vazão do que de sedimentos. O motivo pelos quais existem mais estações de um tipo em relação ao outro não é escopo da discussão deste trabalho. Dentre todas essas estações foram selecionadas apenas três, as quais são: Dona Francisca, Rio Pardo e São Jerônimo Jusante, por possuírem dados sedimentométricos. A localização das estações no Rio Jacuí, a serem empregadas neste estudo, são mostradas na figura 4.

Figura 5 – Postos fluvio-sedimentométricos utilizados no estudo



(fonte: elaborado pelo autor)

O quadro 3 resume as principais informações de cada posto que foi selecionado para o estudo. Cabe salientar que o posto São Jerônimo Jusante não apresenta dados de vazão, apenas o registro de cotas de linha de água, o que limitará seu uso neste estudo.

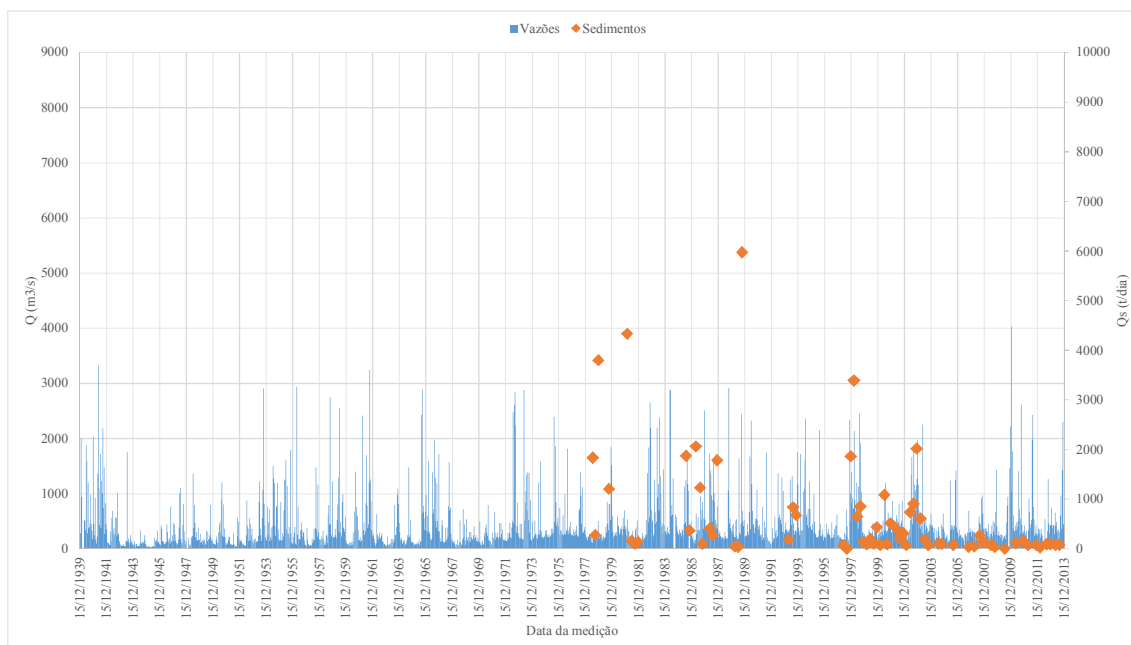
Quadro 3 – Dados dos postos fluvio-sedimentométricos em estudo

Nome do Posto	Dona Francisca	Rio Pardo	São Jerônimo Jusante
Código na ANA	85400000	85900000	87035000
Série de dados (Vazão)	1939 - 2013	1939 - 2013	-
Série de dados (Sedimentos)	1978 - 2013	1998 - 2013	1981 - 1987
Latitude Sul	29°37'39"	29°59'41"	29°56'00"
Longitude Oeste	53°21'12"	52°22'38"	51°41'00"
Área de Drenagem (km ²)	14014	38753	68261

(fonte: elaborado pelo autor)

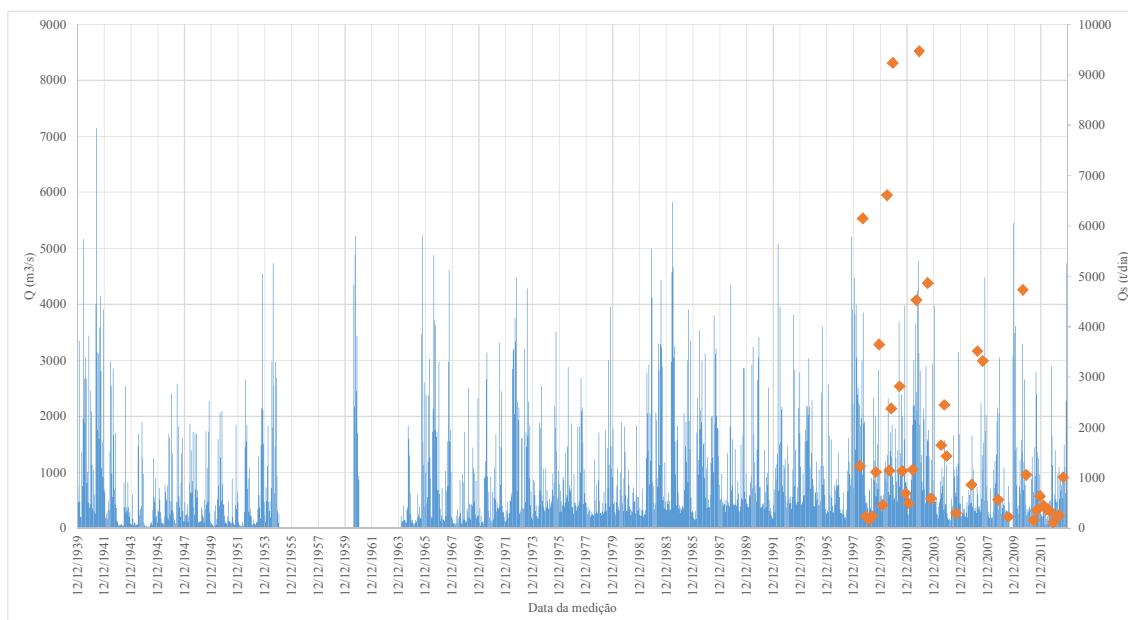
Nas figuras 6 e 7 é possível visualizar os fluviogramas, os quais representam as variações das vazões ao longo do tempo, registrados pelos postos em estudo, sobre os quais são apresentados os valores de descarga sólida medidos. Nota-se que as medições de descarga sólida de sedimentos são esporádicas e nem sempre realizadas no momento em que o rio está conduzindo as maiores vazões. Percebe-se, também, uma grande variabilidade nas medições e uma tendência de redução desta variabilidade no posto de Dona Francisca (figura 6) após o ano de 2003.

Figura 6 – Fluviograma e dados de descarga sólida registrados no posto Dona Francisca



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 7 – Fluviograma e dados de descarga sólida registrados no posto Rio Pardo



(fonte: elaborado pelo autor)

6.2.2 Dados Morfométricos e Morfológicos

Os dados morfométricos e morfológicos do Rio Jacuí foram obtidos através de imagens de satélite e de bases cartográficas da região em estudo. Os dados topográficos, utilizados nesse trabalho, foram obtidos de cartas topográficas digitalizadas e publicadas pelos autores HANSENACK e WEBER². Estas informações serviram de base para a estimativa do perfil longitudinal do trecho do Rio Jacuí compreendido entre os postos de Dona Francisca e de Rio Pardo.

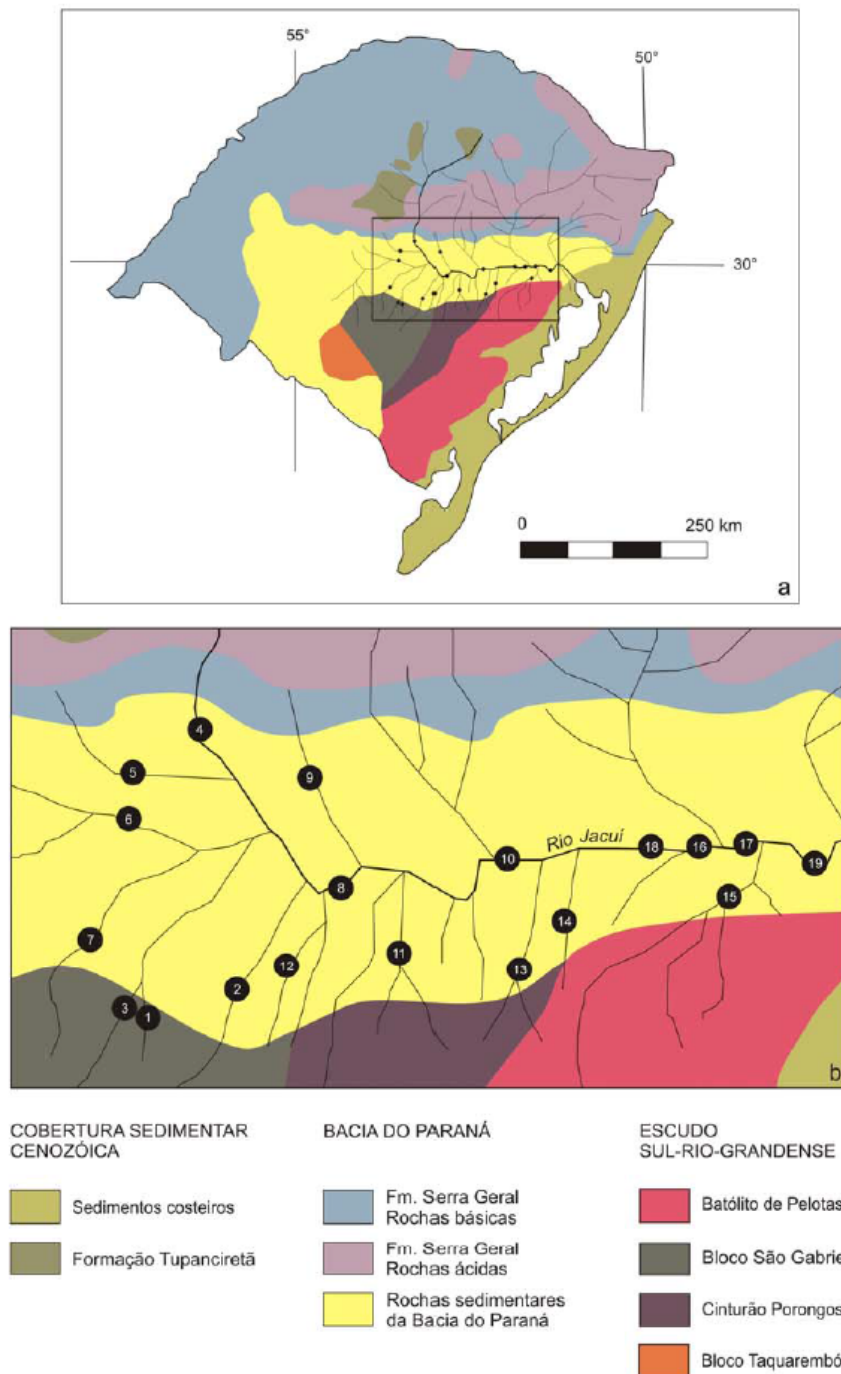
6.2.3 Dados de Granulometria do Leito

Conforme dados de levantamento granulométrico realizado por Machado (2011), em dezenove pontos de coleta distribuídos ao longo do Rio Jacuí e seus afluentes, existe uma diferenciação na composição da granulometria presente no leito do Rio Jacuí e seus afluentes. As amostras coletadas nos afluentes da porção norte da bacia, os quais drenam os solos derivados das rochas da bacia do Paraná, possuem uma granulometria mais fina, com menos de 40% de areia grossa e/ou muito grossa. As amostras coletadas nos afluentes da margem

² HANSENACK, H.; WEBER, E. (Org.) **Base Cartográfica Vetorial Contínua do Rio Grande do Sul – Escala 1:50.000**. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia. 2010. 1 DVD-ROM

direita, os quais drenam diretamente as rochas do escudo sul-rio-grandense, apresentam granulometria na faixa das areias grossas e muito finas. A figura 8 ilustra os pontos de coleta que serviram de base para a caracterização do diâmetro médio dos sedimentos.

Figura 8 – Mapa geológico simplificado do Rio Grande do Sul, com a localização dos pontos de coleta de sedimentos no Rio Jacuí



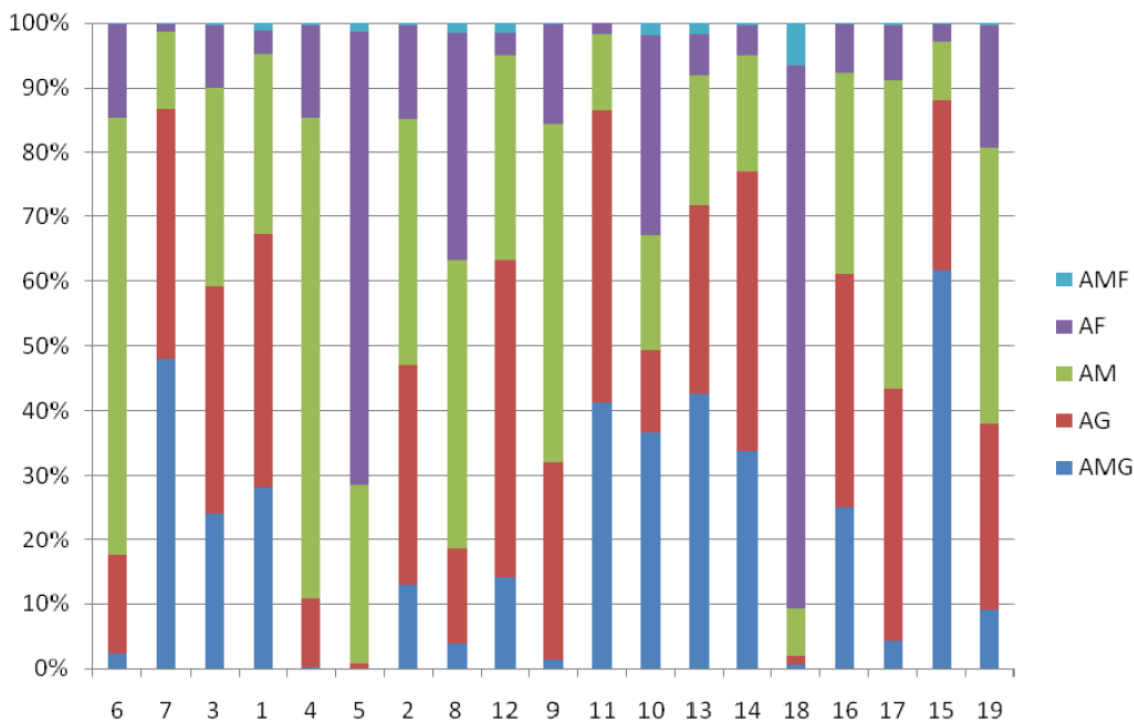
(fonte: MACHADO, 2011 p. 27)

A figura 9 mostra a distribuição granulométrica obtida em cada uma das amostras de fundo coletadas ao longo do Rio Jacuí, após terem sido secas, pesadas e peneiradas.

No trecho do Rio Jacuí que compreende os postos sedimentométricos em análise neste estudo, as medições feitas por Machado (2011) indicam:

- a) presença de areia média na seção próxima à barragem Dona Francisca (amostra 4), com menos de 10% de areia grossa;
- b) predominância de areia média no trecho entre as cidades de Dona Francisca e Cachoeira do Sul (amostra 8);
- c) predominância de areia grossa no trecho entre as cidades de Cachoeira do Sul e Rio Pardo;
- d) presença de areia grossa e areia muito grossa na seção próxima ao posto Rio Pardo, com menos de 48% de areia média e areia muito fina (amostra 10);
- e) trechos do leito, entre as cidades de Rio Pardo e São Jerônimo, alternando entre areia grossa (amostras 18 e 16) e média (amostras 17 e 19).

Figura 9 – Distribuição granulométrica do material de leito do Rio Jacuí



(fonte: MACHADO, 2011 p. 36)

De acordo com o autor a nomenclatura utilizada na figura 8 e o intervalo de diâmetros que caracteriza cada tipo de areia é mostrado no quadro 4.

Quadro 4 – Nomenclatura adotada para a caracterização da distribuição granulométrica do material de leito

Sigla	Significado	Faixa Granulométrica (mm)
AMF	Areia Muito Fina	< 0,125
AF	Areia Fina	0,125 – 0,25
AM	Areia Média	0,25 – 0,50
AG	Areia Grossa	0,50 – 1,00
AMG	Areia Muito Grossa	1,00 – 2,00

(fonte: adaptado de MACHADO, 2011)

Uma vez que obter a distribuição granulométrica dos sedimentos é importante para os cálculos da capacidade de transporte, pois nas equações de transporte de sedimentos a variável D_{50} faz-se presente quase que na totalidade dos modelos aqui apresentados para o cálculo da capacidade de transporte, os resultados apresentados por Machado (2011) sobre a distribuição servirão de base para a definição da granulometria média que circula no Rio Jacuí. Assim, os valores de D_{50} adotados como referência serão 0,375 mm e de 0,75 mm para, respectivamente, os postos de Dona Francisca e Rio Pardo.

7 TRATAMENTO DOS DADOS

Nesta seção são apresentados os métodos que foram utilizados no tratamento dos dados brutos para que fosse possível a sua utilização nos diversos métodos de cálculos da capacidade de transporte que são pertinentes a este trabalho. Antes, porém, foi realizada uma análise prévia dos dados, buscando eliminar possíveis inconsistências, bem como preencher algumas falhas dos dados.

7.1 CONSISTÊNCIA DOS DADOS

Para analisar a consistência dos dados obtidos junto a ANA os mesmos foram plotados de forma a facilitar a visualização das tendências de suas variações. Em um primeiro momento, foram relacionados os dados de vazão e de velocidade e, em seguida os dados de velocidade média foram relacionados em função da largura e da área da molhada. Em seguida foram retirados pontos que apresentavam, visualmente, uma discrepância em relação aos demais. Em outras palavras, foram retirados os dados que não apresentavam a mesma tendência dos demais. Após retirar os dados que apresentam inconsistência foram ajustadas, pelo método da regressão linear, leis do tipo potência para as tendências de variação. A partir dessas leis ajustadas foram corrigidos os dados que haviam sido retirados da série de dados. O quadro 5 mostra as leis de tendência ajustadas e as tabelas 6 e 7 mostram os dados que eram inconsistentes e que foram ajustados com o emprego destas leis. No apêndice B é possível visualizar os gráficos destas funções ajustadas.

Quadro 5 – Leis ajustadas para consistência dos dados

Lei Ajustada	Dona Francisca	R ²	Rio Pardo	R ²
Vazão x Velocidade	$Q=647,8*Vel^{1,4534}$	0,93	$Q=1505,6*Vel^{1,688}$	0,98
Vazão x Cota	$Q=0,205*Cota^{1,4078}$	0,98	$Q=0,021*Cota^{1,7462}$	0,94
Largura x Cota	$L=82,222*Cota^{0,1052}$	0,69	$L=105,04*Cota^{0,1123}$	0,60
Área molhada x Cota	$Am=33,76*Cota^{0,5262}$	0,80	$Am=12,056*Cota^{0,7589}$	0,94

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 6 – Consistência dos dados do posto Dona Francisca

Data	31/07/1986		27/02/1998		22/08/2000		05/10/2004		28/06/2009	
Dado	Original	Corrigido	Original	Corrigido	Original	Corrigido	Original	Corrigido	Original	Corrigido
Cota (cm)	-	187,81	-	-	-	-	-	-	380,00	90,72
Vazão (m³/s)	-	326,60	-	-	-	-	-	-	3,51	116,89
Área molhada (m²)	-	530,68	-	-	-	-	445,40	447,80	10,70	361,86
Largura (m)	-	142,62	-	-	-	-	143,00	137,86	18,30	132,11
Velocidade média (m/s)	-	0,615	1,706	2,304	3,115	0,483	-	-	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

No dia 31 de Julho do ano 1986, apesar de haver o registro, no boletim sedimentométrico disponibilizado pela ANA, da medição da concentração de sedimentos, os outros dados estavam em branco. Então se adotou, como dado representativo da vazão para esse dia, a vazão que consta no boletim fluviométrico e, a partir desse dado de vazão e das leis ajustadas, foram reconstruídos os demais dados, conforme mostrado no quadro 6.

O mesmo procedimento foi realizado para o posto Rio Pardo (quadro 7), sendo que a medição do dia 03 de Outubro de 2000 teve seu dado de vazão estimado através do boletim fluviométrico e os demais calculados pelas leis ajustadas apresentadas no quadro 7.

Quadro 7 – Consistência dos dados do posto Rio Pardo

Data	17/08/2000		03/10/2000		06/10/2009	
Dado	Original	Corrigido	Original	Corrigido	Original	Corrigido
Cota (cm)	-	-	86	602,36	78	673,92
Vazão (m³/s)	-	-	-	1503	2236	1828,51
Área molhada (m²)	-	-	-	1551,67	1997	-
Largura (m)	-	-	-	213,86	242	-
Velocidade média (m/s)	4,86	0,549	-	0,999	1,122	-

(fonte: elaborado pelo autor)

7.2 CALCULO DA CCS

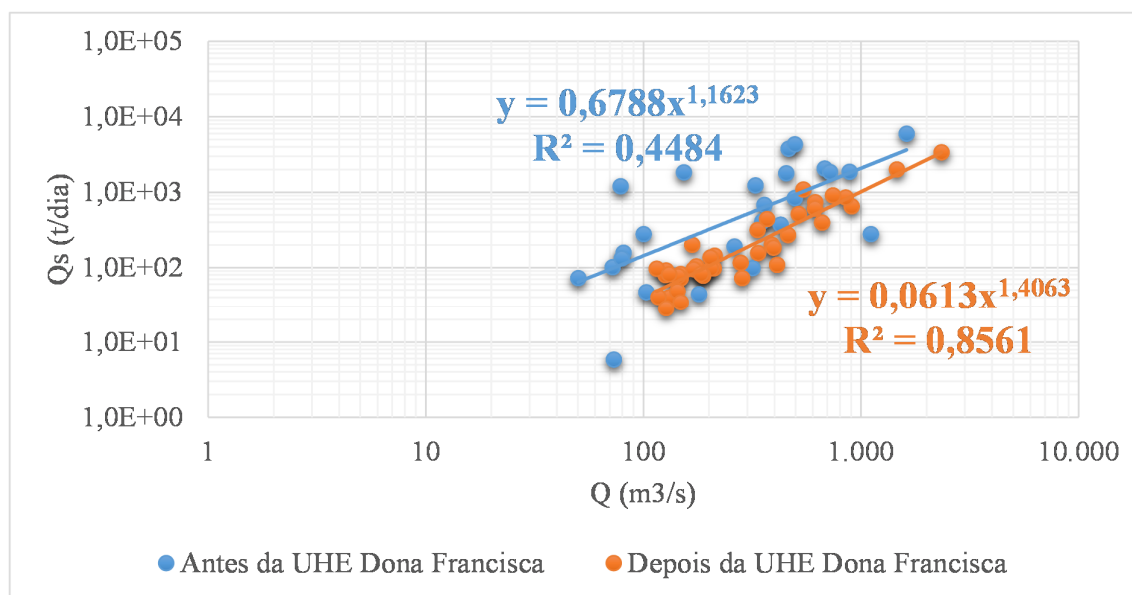
As curvas chaves de sedimentos foram determinadas com base nos dados obtidos diretamente do banco de dados disponibilizados pela ANA no seu sítio para os postos envolvidos no estudo, após análise de consistência de dados. Os dados de sedimentos são fornecidos em forma de concentração (ppm), porém é necessário converter essa concentração em quantidade de sedimentos transportada por dia. Essa conversão é feita com o auxílio da equação 17, a

qual nos fornece os valores da descarga sólida em toneladas por dia. A construção das CCS seguiu os procedimentos sugeridos, neste trabalho, no capítulo 4.1.

Os dados que deram origem as CSS, apresentadas nas figuras 10 a 12, foram separados em dois períodos, antes de 2001 e depois. Essa separação foi feita com o intuito de identificar possíveis mudanças no comportamento da CCS, em função da entrada em operação da UHE Dona Francisca ocorrida no ano de 2001.

Para o posto Dona Francisca (figura 10) nota-se uma grande dispersão nos dados de descarga sólida em função da vazão, mostrando a grande variabilidade do processo de geração de sedimentos em uma bacia hidrográfica. Contudo, para o período posterior à construção barragem, esta variabilidade diminui, sugerindo a existência de outros controles na geração dos sedimentos, como por exemplo, a retenção de água e sedimentos pela barragem. Esta variabilidade também é percebida, a partir da análise do coeficiente de determinação das tendências ajustadas: ele aumenta no período após a barragem.

Figura 10 – CCS do posto Dona Francisca

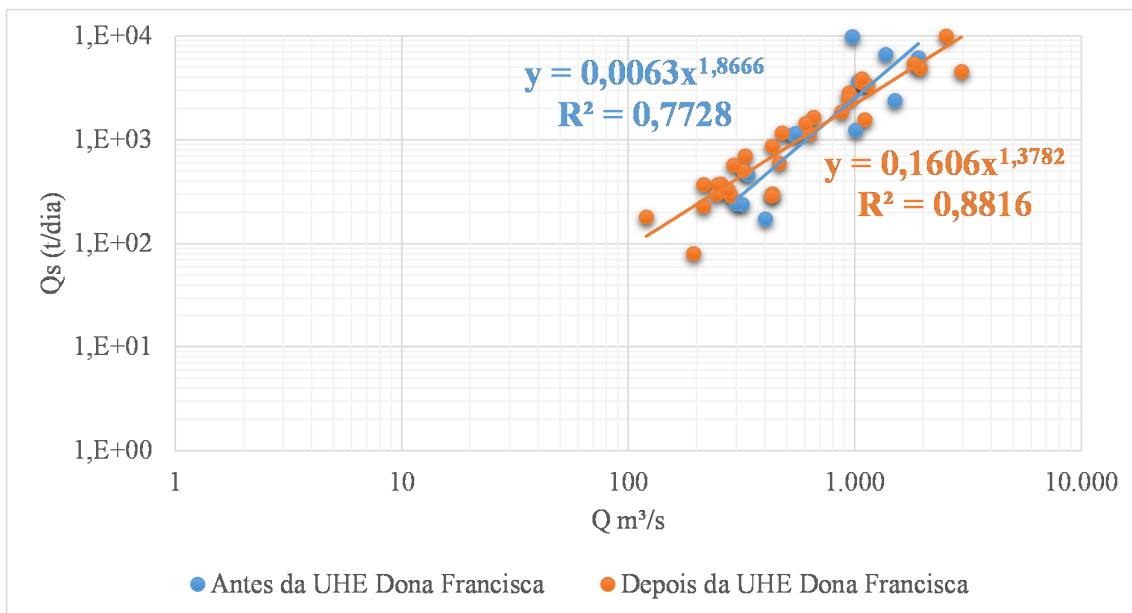


(fonte: elaborado pelo autor)

De forma semelhante, para o posto Rio Pardo, nota-se uma redução na variabilidade dos dados, porém de forma mais sutil. Pela figura 11, nota-se que, indiferente do período analisado, as CCS ajustadas possuem uma diferença no crescimento da descarga sólida com a vazão, mostrando que após o início da operação da barragem, as descargas sólidas geradas

pelas vazões mais elevadas foram atenuadas e as geradas pelas vazões mais baixas, aumentadas. Contudo, o fato de que as medições sedimentológicas para o posto Rio Pardo tenham iniciado no ano de 1998, coincidentemente o ano em que foi iniciada a construção da UHE Dona Francisca, pode estar influenciando esta análise. A inexistência de uma clara alteração na CCS do posto Rio Pardo também pode ser atribuída ao fato da existência de uma grande área contribuinte, drenada por muitos afluentes, entre Dona Francisca e Rio Pardo, na qual os processos de geração e de transporte de sedimentos não estão sendo afetados pela barragem.

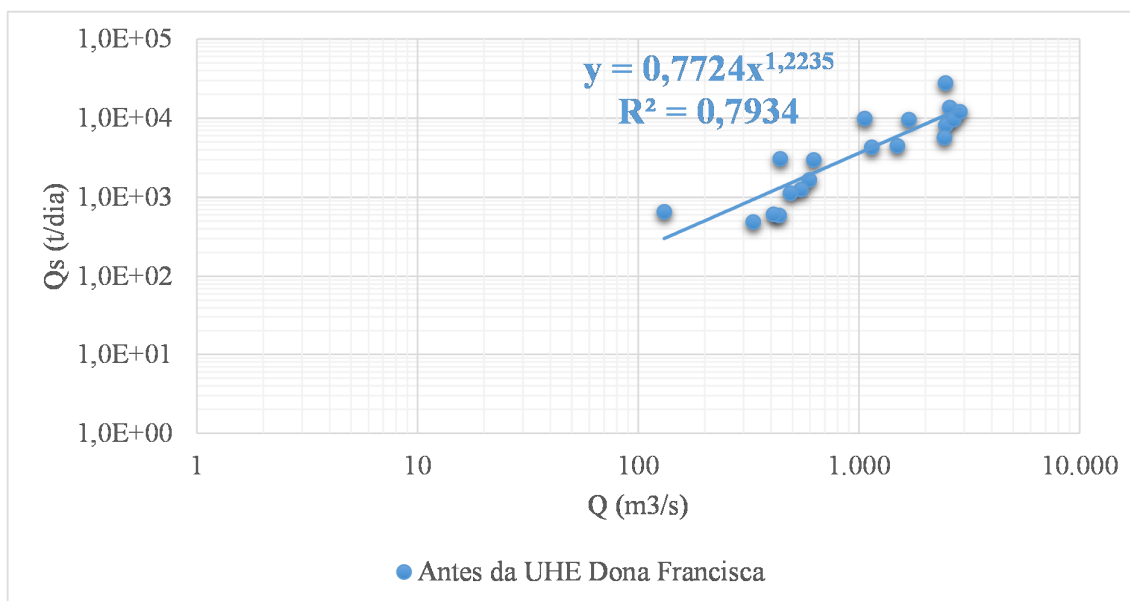
Figura 11 – CCS do posto Rio Pardo



(fonte: elaborado pelo autor)

Na figura 12 é apresentada a CCS de sedimentos para o posto São Jerônimo Jusante, cujos dados existem apenas para um período anterior à construção e operação da UHE Dona Francisca, para a qual também se nota a variabilidade na quantidade de sedimentos medida.

Figura 12 – CCS do posto São Jerônimo Jusante



(fonte: elaborado pelo autor)

7.3 CÁLCULO DO DEFLÚVIO SÓLIDO MÉDIO ANUAL

O cálculo do deflúvio sólido médio anual é uma das ferramentas que nos permite estimar a totalidade do aporte de sedimento da bacia hidrográfica, ou seja, por meio dele pode-se obter estimativas das quantidades de sedimentos que são geradas na bacia hidrográfica, sendo de vital importância o conhecimento dos seus valores, para avaliar a condição de equilíbrio do trecho em estudo do Rio Jacuí, e estabelecer seu balanço sedimentológico.

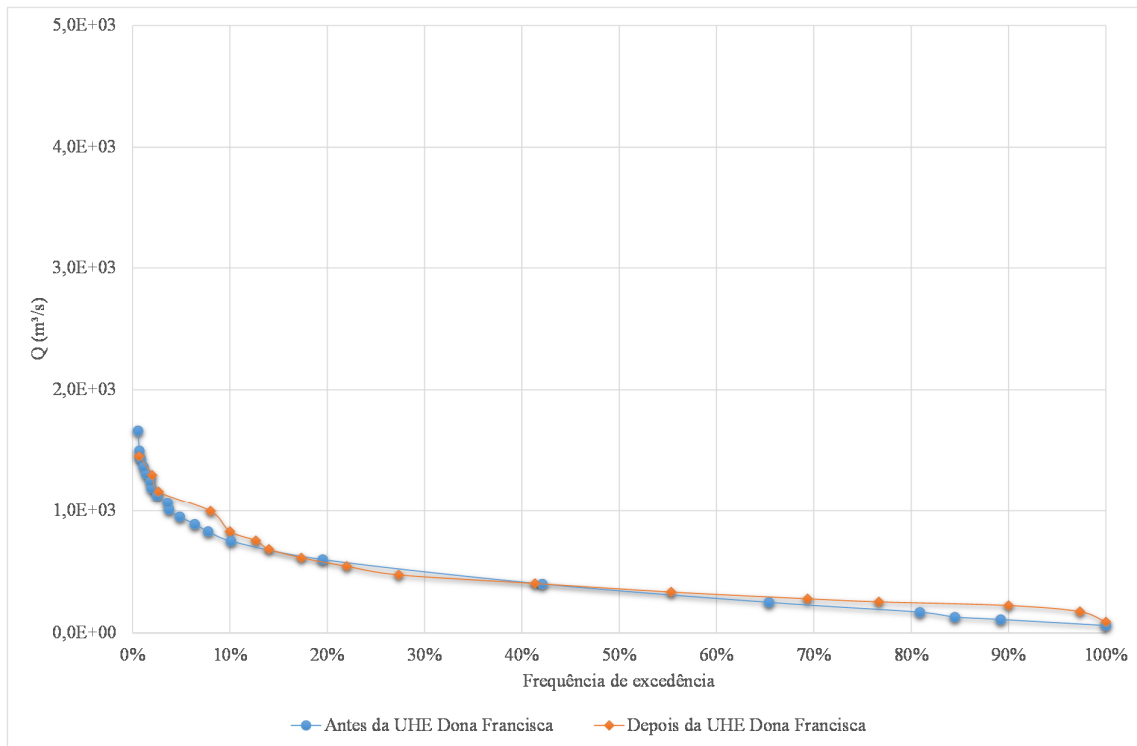
O cálculo do deflúvio parte do estabelecimento de uma curva de permanência de vazões, a partir da qual a quantidade de sedimento em transporte, obtida a partir da CCS, é ponderada, de forma a permitir avaliar, ao longo do registro de vazões, a totalidade de massa (ou volume) de sedimentos que transitou no curso de água.

7.3.1 Curvas de Permanência de Vazões

As curvas de permanência de vazões informam a porcentagem do tempo, no período em que foram registradas as vazões, em que determinada quantidade de vazão foi observada na calha do rio, associando, às vazões, sua probabilidade de ocorrência. Essas curvas foram calculadas com base nos dados das médias mensais de cada ano da série de dados de vazões obtidos junto a ANA. A metodologia de cálculo dessas curvas está referenciada no item 4.2 deste

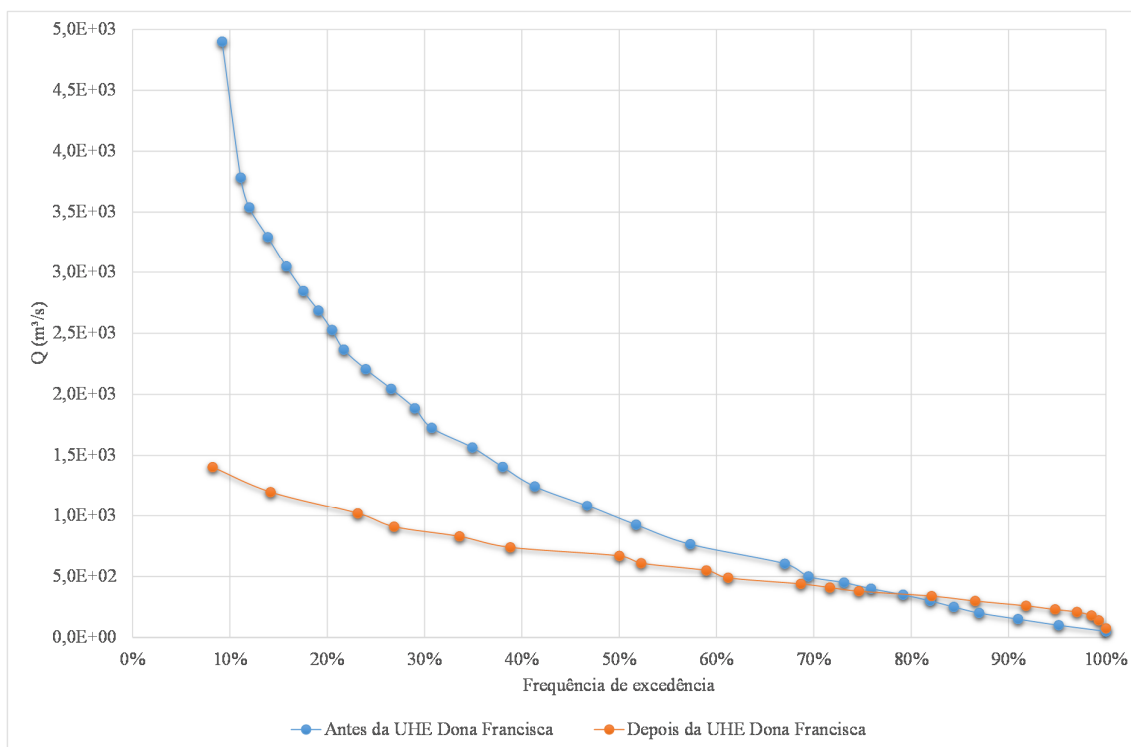
trabalho. O resultado pode ser visto nas figuras 13 e 14 apresentadas para cada posto de estudo, construídas com os dados fluviométricos separados nos períodos de antes de depois da construção da UHE Dona Francisca.

Figura 13 – Curva de permanência do posto Dona Francisca



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 14 – Curva de permanência do posto Rio Pardo



(fonte: elaborado pelo autor)

Comparando-se as curvas de permanência de vazões dos postos nota-se que no posto Rio Pardo existe uma ocorrência de vazões máximas maiores das que acontecem no posto Dona Francisca. As vazões máximas para o posto Rio Pardo são maiores devido, em primeiro lugar, à área de contribuição da bacia hidrográfica desse posto ser maior em comparação ao posto Dona Francisca, e por existir inúmeras contribuições de outros cursos de água até o posto Rio Pardo.

Verifica-se em ambos os casos uma diminuição das vazões máximas devido ao fato da UHE Dona Francisca estar controlando a vazão a jusante para a geração de energia, e um aumento das menores vazões. Esse aumento pode ser atribuído, também a construção da UHE Dona Francisca, ao fato de ser obrigatória a manutenção de uma vazão mínima de operação para a produção de energia. De acordo com um estudo do Ministério do Meio Ambiente sobre a bacia do Atlântico Sul, a bacia do Alto Jacuí possui uma vazão mínima de restrição, que é cerca de 212 m³/s, sendo obrigatória a manutenção desse valor a jusante da barragem (BRASIL, 2006).

7.3.2 Estimativa do Deflúvio Sólido Médio Anual

A estimativa do deflúvio sólido médio anual foi feita com base nos dados de vazões obtidos a partir da curva de permanência de vazões e da descarga sólida calculada de acordo com as CCS ajustadas no capítulo 7.2, estimando, desta forma, a geração de sedimentos na bacia hidrográfica contribuinte a cada posto de medição. Aplicando-se os procedimentos sugeridos no capítulo 4.3, foram testados dois cenários de cálculo para o deflúvio, empregando-se as CCS estabelecidas antes e após a construção da UHE Dona Francisca. As estimativas de deflúvios para cada posto são mostradas na tabela 1.

Tabela 1 – Resultado do deflúvio sólido médio anual

	Dona Francisca		Rio Pardo	
	Antes da Barragem	Depois da Barragem	Antes da Barragem	Depois da Barragem
Área da bacia de Contribuição (km ²)	14.014,00	14.014,00	38.753,00	38.753,00
Deflúvio Sólido Médio Anual Estimado (t/ano)	272.481,49	152.664,58	1.797.270,38	423.510,97
Produção Específica(t/ano.km ²)	19,44	10,89	46,38	10,93

(fonte: elaborado pelo autor)

O deflúvio sólido médio anual no posto Dona Francisca (tabela 1) sofreu uma redução de cerca de 50% no período que segue a entrada em operação da UHE Dona Francisca. O posto Rio Pardo não possui a mesma redução que o posto Dona Francisca porque está muito distante da UHE Dona Francisca e conta com uma área de contribuição da bacia hidrográfica muito maior que a do posto Dona Francisca, o qual se localiza muito próximo da UHE Dona Francisca, sofrendo assim com o controle da vazão, e por consequência dos sedimentos, e possuindo uma área de contribuição da bacia hidrográfica muito menor se comparado com o posto Rio Pardo.

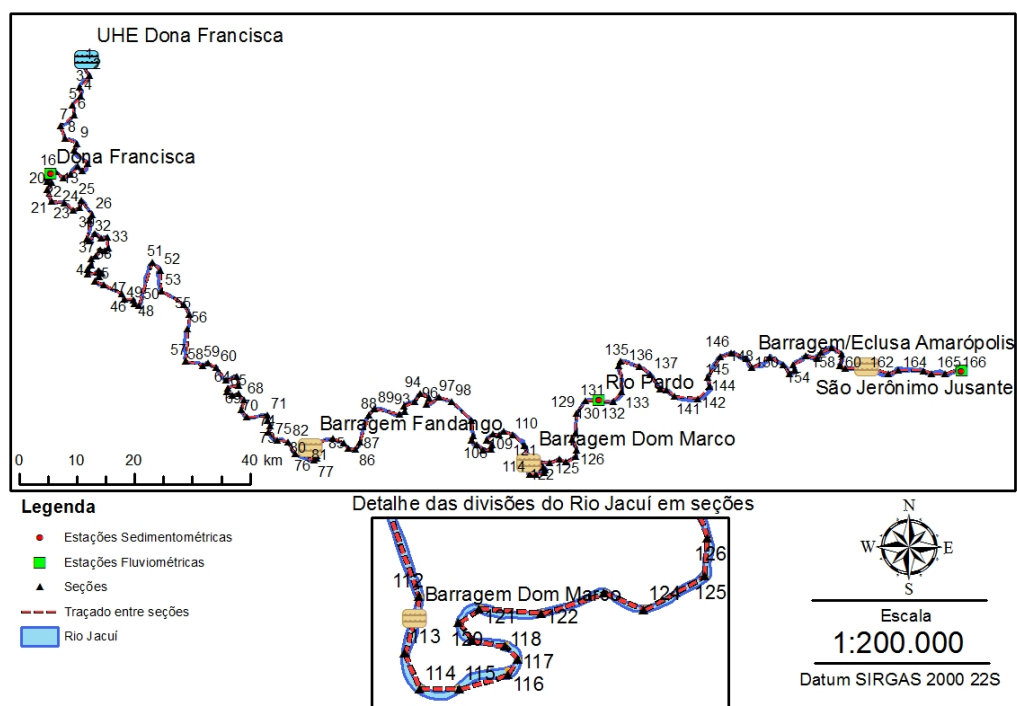
7.4 ESTIMATIVA DOS DADOS MORFOLÓGICOS E MORFOMÉTRICOS

Conforme já mencionado no capítulo 6.1, os dados de declividade e de largura média do rio foram obtidos em diferentes seções a partir de imagens de satélite e de cartas topográficas digitalizadas da região.

7.4.1 Largura Média do Rio Jacuí

Para a estimativa da largura média do rio foram criadas 166 seções, as quais podem ser vistas na figura 15. Sobre cada seção traçou-se uma linha que era perpendicular a uma das margens até a outra margem, medindo-se essa distância que foram medidas utilizando-se um *software* de desenho assistido por computador. Tal procedimento só é possível porque as imagens estão georreferenciadas, ou seja, as distâncias medidas sobre a imagem refletem medidas verdadeiras pelo fato de que cada pixel da imagem está associado a sua coordenada geográfica. Após serem obtidos todos esses valores, fez-se a média geométrica, obtendo-se a largura média do Rio Jacuí de 184 metros.

Figura 15 – Desenho esquemático da divisão do Rio Jacuí em seções



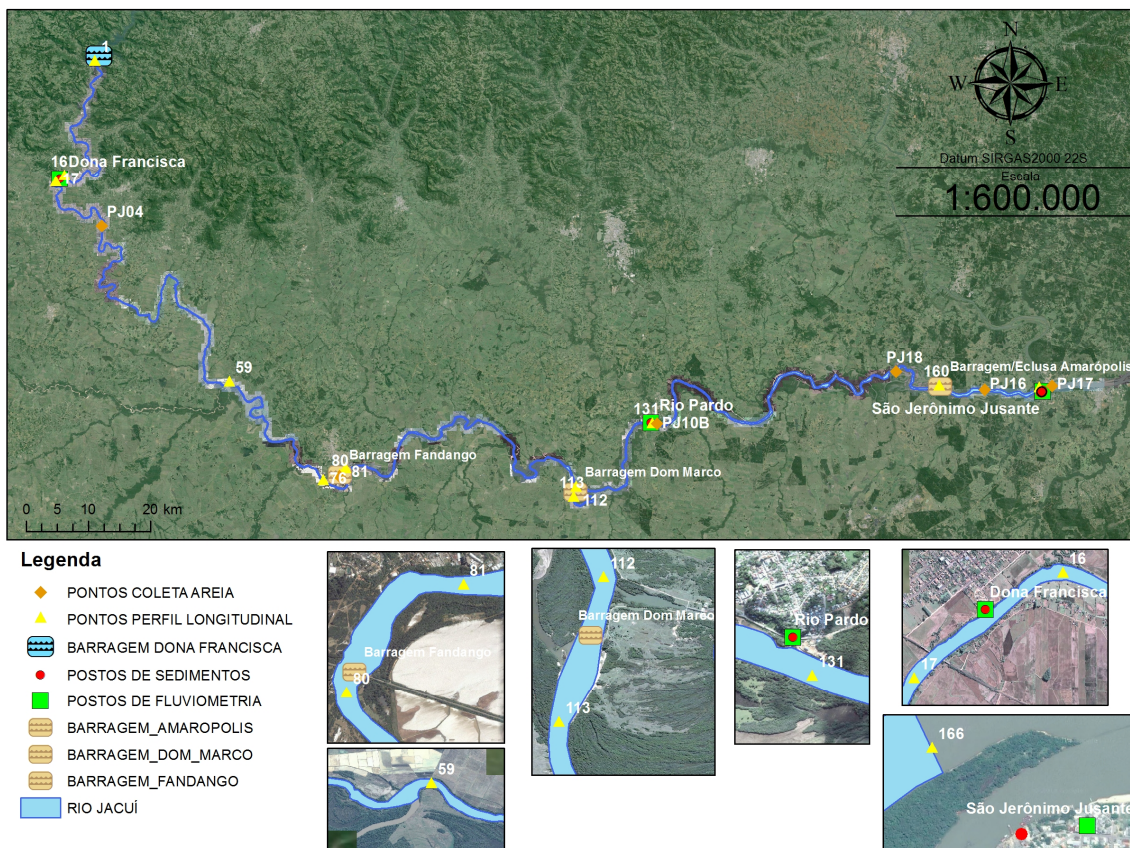
(fonte: elaborado pelo autor)

7.4.2 Perfil Longitudinal e Declividade dos Trechos do Rio Jacuí

Conforme mencionado no capítulo 6.1, alguns parâmetros foram obtidos de forma indireta. Um dos parâmetros que tiveram que ser obtidos de forma indireta foi a declividade e, por consequência, o perfil longitudinal do Rio Jacuí.

O perfil longitudinal foi obtido utilizando a divisão do Rio Jacuí em seções, conforme exposto no capítulo 7.4.1. A partir das seções levantadas foram determinadas as distâncias entre cada seção. Para o cálculo da distância foi utilizado um *software* de sistema de informações geográficas, que a partir das coordenadas de cada seção calcula a distância entre os pontos. Na figura 16 é possível visualizar as seções escolhidas, dentre as 166 seções, para o cálculo das declividades em cada trecho.

Figura 16 – Detalhe da divisão do Rio Jacuí em seções

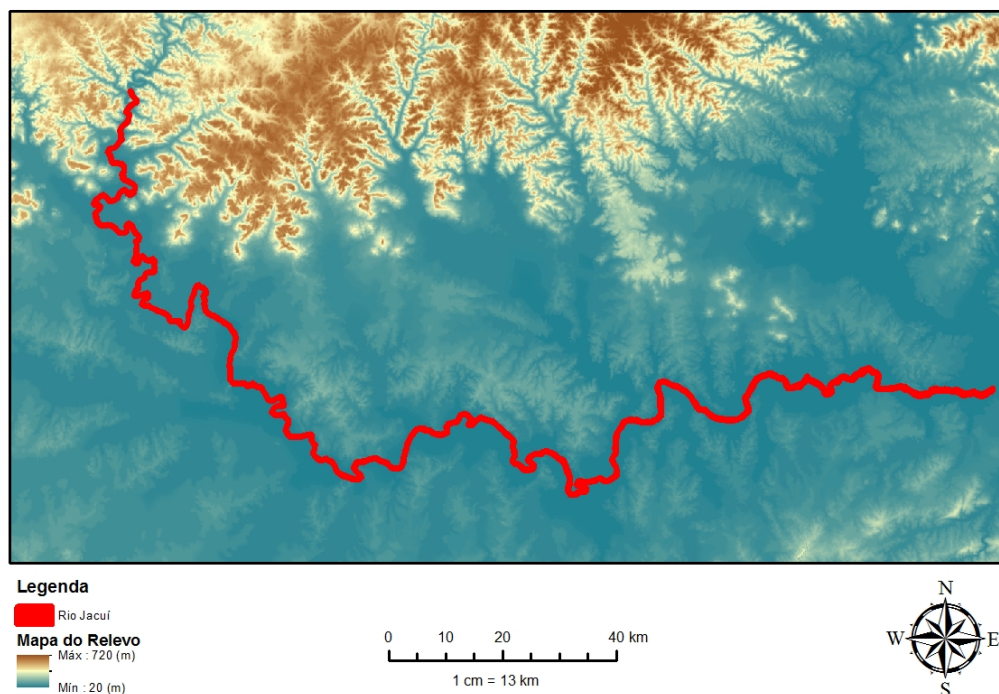


(fonte: elaborado pelo autor)

A determinação da declividade do rio entre as seções foi feita com base em um modelo digital de terreno (MDE). O MDE foi gerado a partir das curvas de níveis digitalizadas, já mencionadas, no capítulo 6.2.2. Tais curvas sofreram um tratamento digital em um *software* de sistema informações geográficas (SIG), sendo que as curvas de níveis foram interpoladas de modo a se obter um modelo contínuo de terreno. De posse do modelo do terreno e das coordenadas de cada seção levantada foram obtidos os valores das altitudes de cada seção. E, por fim, com a altitude e a distância entre cada seção, medida sobre a imagem

georreferenciada, pode-se calcular a declividade entre cada seção. Na figura 17 é mostrado o resultado do MDE.

Figura 17 – MDE gerado a partir das curvas de níveis



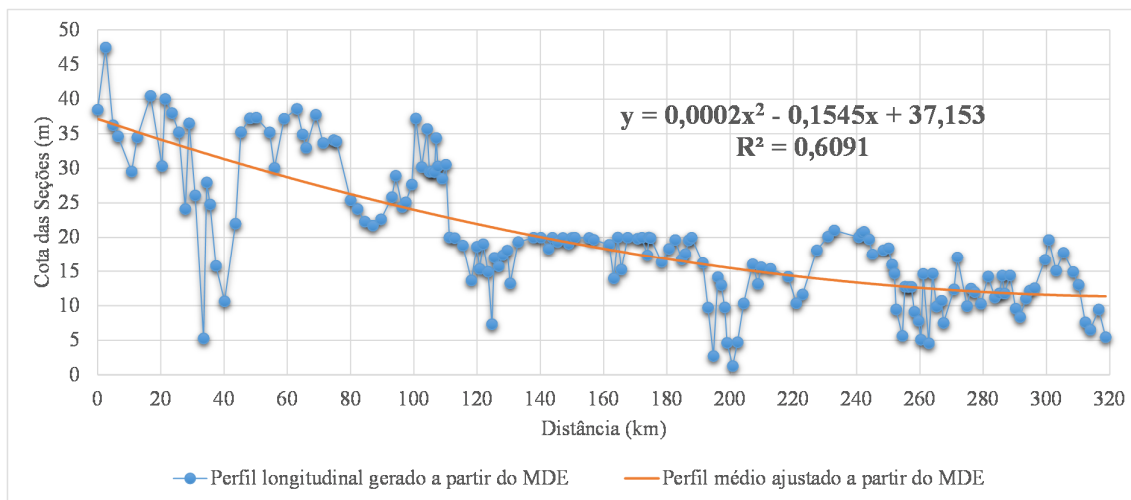
(fonte: elaborado pelo autor)

Com base no modelo numérico do terreno, foram estabelecidas as cotas (elevações) ao longo do curso de água, com vistas à determinação de seu perfil longitudinal. A figura 18 ilustra a variação das cotas em função da distância acumulada, desde a UHE Dona Francisca até o Posto São Jerônimo Jusante. Notam-se algumas anomalias nos dados obtidos do MDE: existem trechos do rio que apresentam grandes oscilações de valores, os quais, quando analisados observando-se as imagens de satélite, coincidem com partes do rio onde existem barragens de navegação, onde a sinuosidade do curso de água é acentuada e onde o leito apresenta ilhas, as quais podem ser verificadas comparando-se a figura 18 com a tabela 2.

Em vista disto, o perfil longitudinal será estabelecido a partir das cotas de seções definidas ao longo do rio, filtrando-se as oscilações, de forma a se estabelecer uma tendência mais clara. Foram adotadas as seções: UHE Dona Francisca, posto Dona Francisca, entrada do Rio Vacacaí, Fandango, Dom Marco, posto Rio Pardo, Amarópolis e posto São Jerônimo, ficando

o Rio Jacuí dividido em trechos limitados por estas seções, conforme é visto na figura 16. A expressão ajustada para o perfil longitudinal é mostrada na figura 18.

Figura 18 – Perfil esquemático do Rio Jacuí



(fonte: elaborado pelo autor)

A tabela 2 indica a declividade estimada para os trechos do Rio Jacuí, tomando como base a expressão ajustada para seu perfil longitudinal médio a partir do MDE, o qual foi expresso pela equação mostrada na figura 19.

Tabela 2 – Declividades adotadas para o Rio Jacuí

Localização	Distância (km)	Cota (m)	Declividade (m/km)
UHE Dona Francisca	0	37,15	0
Posto Dona Francisca	35,56	33,00	0,117
Rio Vacacaí	120,79	22,80	0,120
Barragem Fandango	163,23	18,81	0,094
Barragem Dom Marco	222,91	14,41	0,074
Posto Rio Pardo	258,22	12,48	0,055
Barragem Amarópolis	308,42	10,68	0,036
Posto São Jerônimo Jusante	318,68	10,33	0,034

(fonte: elaborado pelo autor)

Cabe salientar que a coluna da distância foi calculada considerando-se como ponto de partida a UHE Dona Francisca.

Considerando o trecho entre os postos Dona Francisca e Rio Pardo, a declividade média é de 0,0921 m/km. Para o trecho entre os postos Rio Pardo e São Jerônimo Jusante, a declividade média é de 0,0355 m/km. Já, em termos médios, a declividade do trecho de rio entre os postos Dona Francisca e São Jerônimo é de 0,08 m/km.

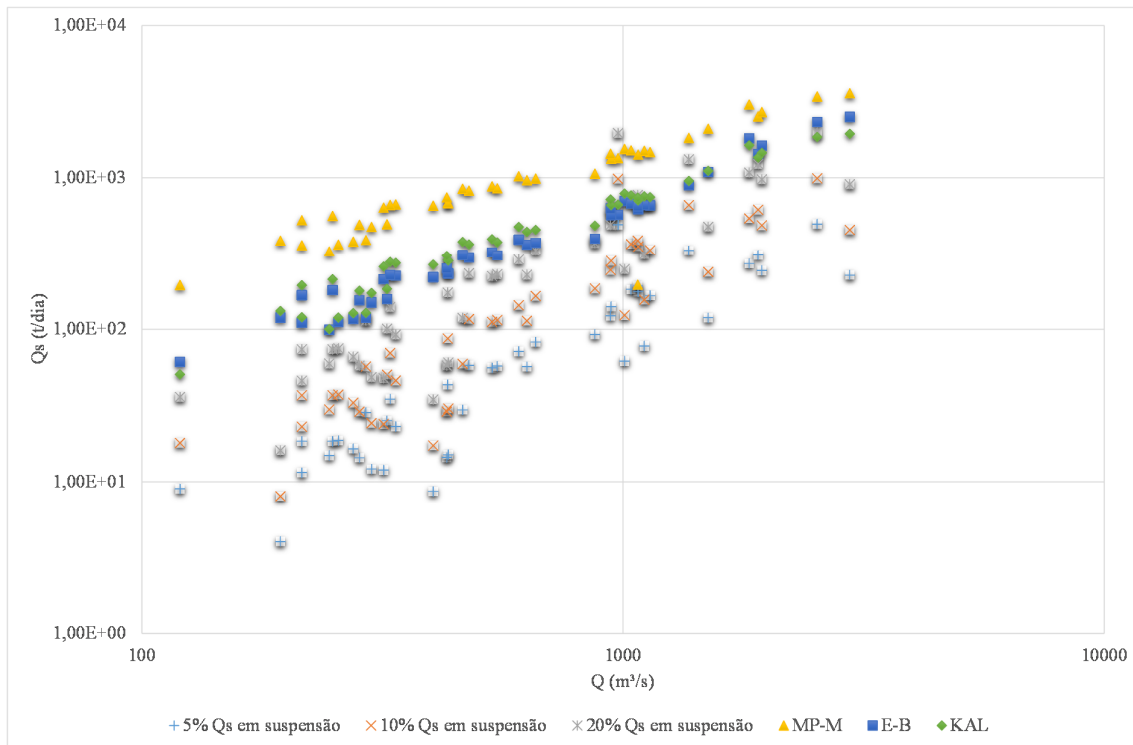
7.5 CÁLCULO DA CAPACIDADE DE TRANSPORTE

Dentre os diversos métodos apresentados na revisão bibliográfica para a estimativa da descarga sólida transportada por arraste, foi escolhido um método que fornecesse valores mais próximos das estimativas da carga de fundo em função da carga transportada em suspensão.

O estudo da capacidade de transporte por arraste foi feito para o Posto Rio Pardo adotando-se a declividade de 0,0355 m/km e a granulometria de 0,75 mm. Para os dados medidos, foram calculadas as capacidades de transporte, as quais foram comparadas com uma estimativa da descarga sólida por arraste, considerando-a como sendo uma parcela da descarga sólida em suspensão medida. A literatura considera que a descarga por arraste representa uma parcela da descarga sólida em suspensão, portanto estimou-se a carga de fundo como sendo 5%, 10% e 20% da descarga sólida em suspensão.

O método que apresentasse como resultado os valores mais próximos dessas estimativas da carga de fundo em função da carga em suspensão seria o método a ser adotado para calcular a capacidade de transporte. Os métodos de Einstein-Brown e Kalinske foram os que mais se aproximaram da estimativa de 20%. Sendo escolhido o método de Kalinske para o cálculo da capacidade de transporte por arraste. A justificativa para a escolha do método de Kalinske em detrimento do método de Einstein-Brown foi de que método de Kalinske se aplica melhor aos sedimentos de granulometria uniforme, ou seja, as areias. De acordo com Carvalho (2008), a descarga de fundo, normalmente, é de 5% a 10% da descarga medida em suspensão. Porém o autor cita que essa carga de fundo não possui um valor fixo e pode, até mesmo, atingir o valor da carga sólida em suspensão. Sendo assim a adoção da estimativa da carga de fundo em 20% pode ser aceita como sendo representativa da capacidade de transporte por arraste. A figura 19 mostra os valores das estimativas da carga de fundo em função da carga em suspensão e de que os métodos de Einstein-Brown e Kalinske eram os que mais se aproximavam da estimativa de 20%.

Figura 19 – Escolha do método de capacidade de transporte



(fonte: elaborado pelo autor)

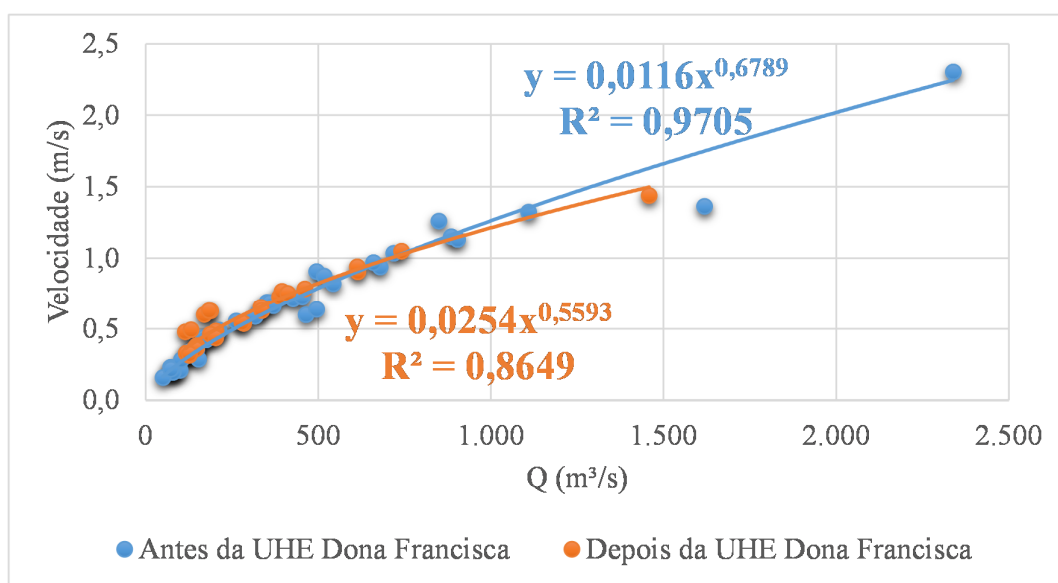
Cabe salientar que estudo semelhante não foi realizado com o posto de Dona Francisca, porque os dados de descarga sólida em suspensão do período anterior a construção da UHE Dona Francisca nele medidos apresentam uma dispersão bastante elevada. Uma vez que esta seção de medições se encontra à jusante da sequência de barragens para geração de energia existente no Alto Jacuí (Itaúba, Jacuí, Passo Real e Ernestina), as vazões escoadas pelo rio dependem do sistema de operação destas barragens e as descargas sólidas são afetadas pela retenção de sedimentos em seus reservatórios.

Os métodos de capacidade de transporte fornecem/calculam valores da quantidade de sedimentos que pode ser transportada com determinada vazão. Esses métodos não levam em consideração a probabilidade de ocorrência das vazões na calha do rio. As vazões que passam por uma seção de um rio estão relacionadas com a pluviometria que ocorre na bacia hidrográfica, a qual também age como agente erosivo, desagregando o solo e gerando uma quantidade de sedimentos a ser transportada pelo curso de água. Assim, da mesma forma que se analisam a probabilidade da ocorrência das vazões, torna-se importante associar à quantidade de sedimentos em transporte por arraste (capacidade de transporte) uma

probabilidade de ocorrência, gerando-se uma capacidade de transporte média anual por arraste. Esta capacidade de transporte média anual representa a totalidade de sedimentos, em toneladas por ano, que se pode esperar que tenha sido transportado por arraste pelo curso de água.

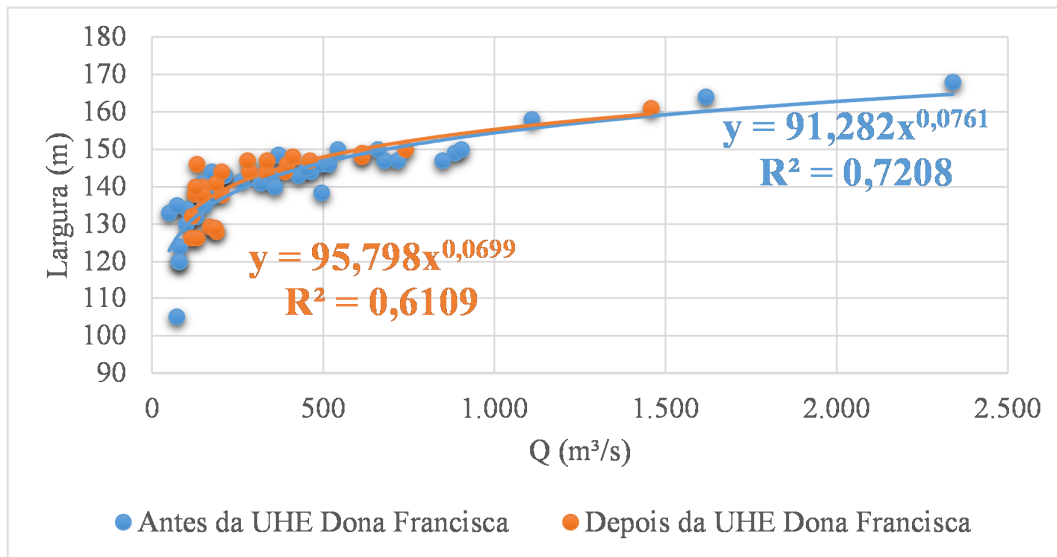
Adotou-se metodologia similar à adotada para o cálculo do deflúvio sólido médio anual, o qual representa a contribuição da suspensão. Ao invés de se utilizar a vazão que é fornecida no boletim sedimentométrico, obtido junto a ANA, foram empregadas as vazões da curva de permanência como dado de entrada no modelo de cálculo da capacidade de transporte. Os demais parâmetros necessários, como velocidade, largura e área molhada, foram estimados com bases em relações construídas entre essas grandezas e as vazões da curva de permanência, uma vez que esses parâmetros são necessários para o cálculo da capacidade de transporte por Kalinske. Aplicando-se o método de Kalinske, foram então calculadas as capacidades de transporte destes escoamentos. Em suma tentou-se, desta forma, fazer com que as vazões que permanecem/ocorrem a maior parte do tempo na calha do rio tenham uma representatividade maior no cálculo da capacidade de transporte e na geração do deflúvio sólido por arraste. As relações estabelecidas entre essas grandezas são mostradas nas figuras 20 a 22.

Figura 20 – Relação ajustada entre velocidade e vazão para o posto Dona Francisca



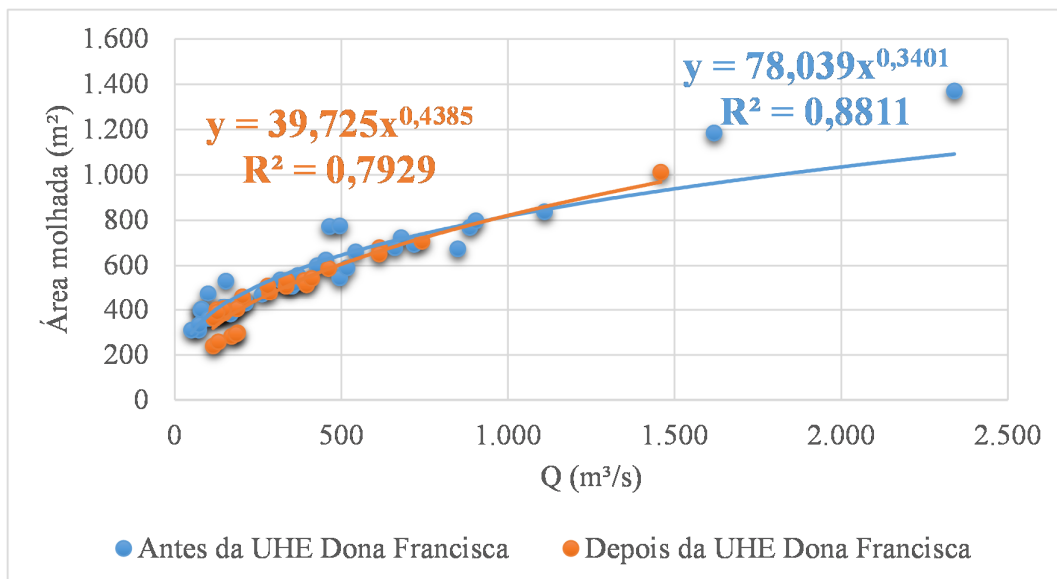
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 21 – Relação ajustada entre largura e vazão para o posto Dona Francisca



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 22 – Relação ajustada entre área molhada e vazão para o posto Dona Francisca

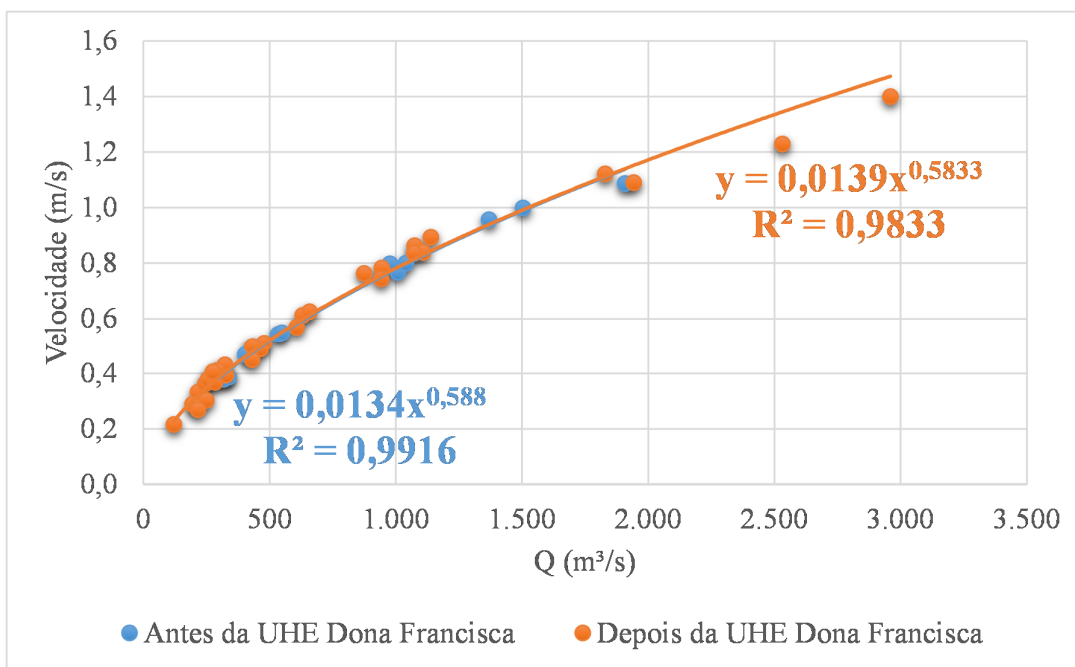


(fonte: elaborado pelo autor)

Pode-se notar que os ajustes feitos as grandezas possuem uma dispersão (R^2) próxima da unidade, o que evidência um bom ajuste na estimativa desses parâmetros para o cálculo da capacidade de transporte média anual por arrasto.

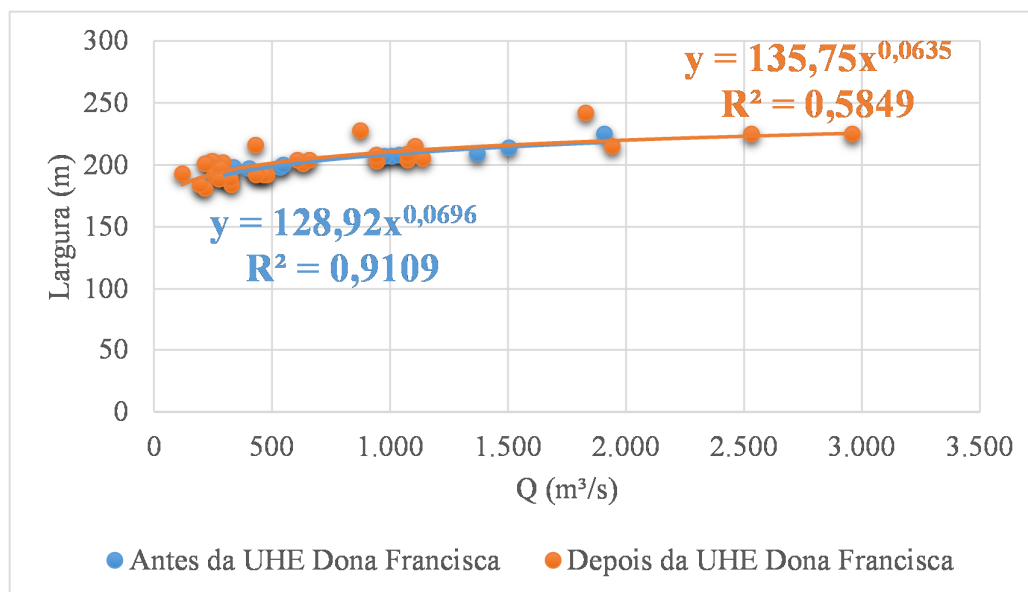
As relações determinadas para o posto Rio Pardo podem ser vistas nas figuras 23 a 25.

Figura 23 – Relação ajustada entre velocidade e vazão para o posto Rio Pardo



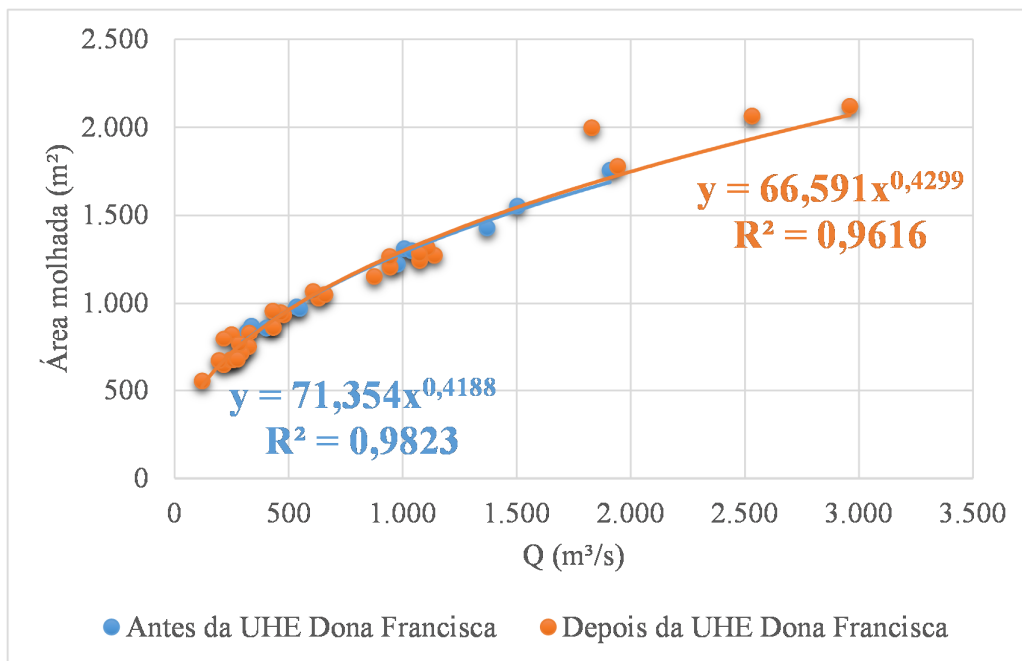
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 24 – Relação ajustada entre largura e vazão para o posto Rio Pardo



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 25 – Relação ajustada entre área molhada e vazão para o posto Rio Pardo



(fonte: elaborado pelo autor)

As mesmas considerações sobre a precisão dos ajustes, feitas para o posto Dona Francisca, aplicam-se ao posto Rio Pardo, sendo que os ajustes apresentam pequena dispersão entre as variáveis, validando assim a utilização delas como parâmetros do método de Kalinske para estimativa da carga de fundo.

O deflúvio sólido médio anual por arraste foi gerado para o trecho compreendido entre os postos de Dona Francisca e Rio Pardo, adotando-se a curva de permanência de vazões do posto Rio Pardo determinada para o período após a implantação da barragem. Como neste trecho se encontra tanto areia média como areia grossa, foram testados dois cenários de tamanho de grão: 0,375 mm (areia média) e 0,75 mm (areia grossa). Os resultados estão sintetizados na tabela 3.

Tabela 3 – Estimativa da capacidade de transporte média anual por arraste no trecho entre os postos Dona Francisca e Rio Pardo

Estimativa	Areia Média	Areia Grossa
Descarga sólida média por arraste (t/dia)	760,43	509,61
Capacidade de transporte média anual por arraste (t/ano)	277.557,87	186.008,15

(fonte: elaborado pelo autor)

Os resultados do cálculo da capacidade de transporte média anual por arraste mostram que com granulometrias maiores a quantidade de material que transita na calha do rio é menor do que com granulometria menor, como era de se esperar.

7.6 DADOS DE EXTRAÇÃO DE AREIA

A estimativa da quantidade de areia retirada da calha do Rio Jacuí foi feita admitindo-se como base os dados do Anuário Mineral Brasileiro 2010 publicado pelo Ministério de Minas e Energia, (BRASIL, 2011), que lista a quantidade de areia bruta comercializada no Brasil nos anos de 2004 a 2012. Na mesma publicação é informado que o RS produz cerca de 5% da areia comercializada no Brasil. Já dados da Sociedade dos Mineradores de Areia do Rio Jacuí (2009), apontam que do Rio Jacuí são extraídas cerca de 70% da areia produzida no RS. A tabela 4 mostra a estimativa da produção de areia no Brasil. Nota-se um aumento da produção de areia de cerca de 20% entre os anos 2009 e 2010, com uma tendência a aumentos anuais de cerca de 6% nos anos seguintes.

Tabela 4 – Produção anual de areia no Brasil e estimativa da produção do Rio Jacuí

Ano	Produção total de areia no Brasil (t/ano)	$P_{\text{anual}}/P_{2010}$
2004	201.000.000,0	0,79
2005	238.000.000,0	0,93
2006	202.600.000,0	0,79
2007	229.400.000,0	0,90
2008	272.400.000,0	1,07
2009	265.384.606,0	1,04
2010	255.007.957,0	1,00
2011	346.722.000,0	1,36
2012	368.957.000,0	1,45

(fonte: elaborado pelo autor)

No que tange ao Rio Jacuí, observa-se na tabela 4, entre os anos 2004 e 2012, uma extração total de 12.913.495 toneladas de areia, representando cerca de 9.525.517 toneladas por ano. A extração de areia ocorre, sobretudo, no trecho do Baixo Jacuí compreendido entre a sua foz e Dona Francisca, com comprimento de cerca de 361Km. Supondo que a extração seja homogeneamente distribuída ao longo do rio, tem-se uma taxa de extração de

aproximadamente 26.490 t/ano/km, sendo mais intensa da foz do Jacuí até a barragem de Amarópolis.

Considerando que no trecho em estudo, entre os postos Dona Francisca e Rio Pardo, teríamos cerca de 35 km de rio suscetível à extração de areia (da barragem Dom Marco até Rio Pardo), a estimativa anual de extração de areia seria de 934.294 t/ano.

De acordo com o anuário mineral brasileiro 2010, publicado pelo Ministério de Minas e Energia, indica que no Brasil foram extraídas 255.007.957 toneladas de areia, das quais 12.753.238 toneladas foram extraídas no RS. Aplicando o percentual de 70% para o rio Jacuí, temos 8.927.267, das quais estima-se 867.929 t/ano no trecho em estudo (BRASIL, 2011). Para gerar os valores estimados para a extração de areia no período antes de 2001 e após 2001, foi adotada a mesma proporção entre a produção de areia do Brasil em cada ano relacionada com a produção de areia do ano 2010. Assim, para antes da operação da UHE Dona Francisca, foi adotada uma taxa de 0,70, uma vez que a produção de areia no ano de 2004 representou cerca de 79% da produção do ano 2010. Após a construção da UHE Dona Francisca, foi considerada uma produção de 1,40 da produção anual estimada para o trecho em 2010, sendo essas taxas conservadoras em relação às taxas calculadas na tabela 4. O ano de 2010 foi escolhido como ano de referência pois era o ano que permitia realizar uma correlação entre os dados do anuário mineral brasileiro 2010 e a porcentagem estimada de contribuição de areia do Rio Jacuí de acordo com a Sociedade Mineradora de Areia do Rio Jacuí (2009).

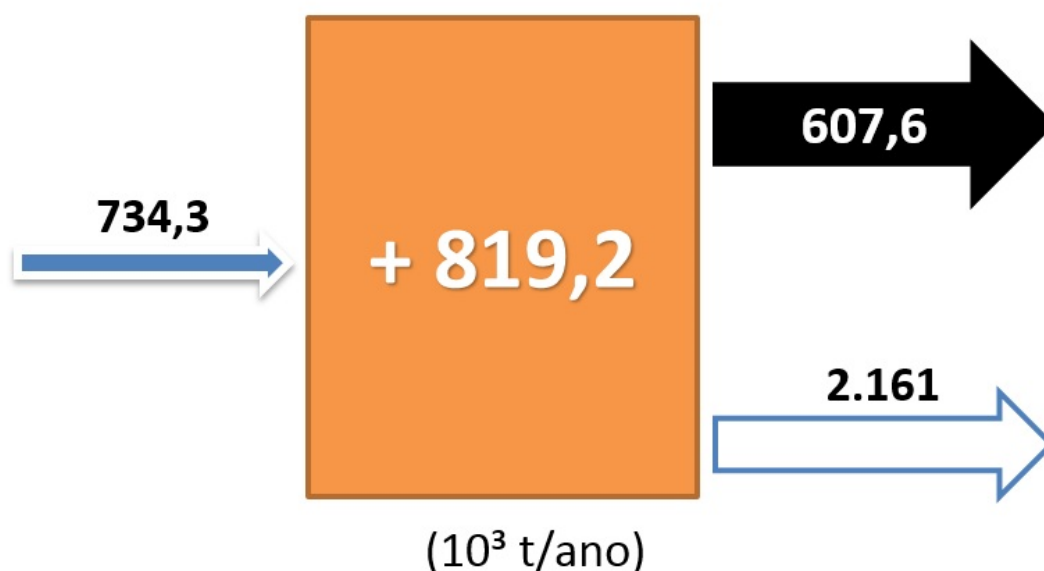
7.7 BALANÇO SEDIMENTOLÓGICO

Para o cálculo do balanço sedimentológico foi considerado o deflúvio calculado para o posto Dona Francisca como sendo a quantidade de sedimento que entra na seção do trecho do Rio Jacuí compreendido entre Dona Francisca e Rio Pardo, e o deflúvio sólido médio anual calculado para o posto de Rio Pardo como sendo a quantidade de sedimentos que é exportada do trecho em estudo, ou seja, essa quantidade de sedimentos calculada pelo deflúvio do posto Rio Pardo considera a quantidade de entrada (posto Dona Francisca) mais a quantidade que é gerada no trecho. Essa quantidade de sedimentos gerada em percurso é proveniente do aporte sólido gerado pela bacia hidrográfica compreendida pelo posto Rio Pardo e por quantidades de sedimentos provenientes dos rios afluentes no trecho em estudo.

Para o cálculo da capacidade de transporte foi considerado, como sendo representativo deste trecho, os dados morfométricos gerados com os dados registrados no posto Rio Pardo, uma vez que estamos interessados em estabelecer o balanço neste trecho de rio. O motivo de tal escolha reside no fato de que a mudança de declividade entre o trecho anterior ao trecho em estudo e o trecho em estudo possuía uma ordem de grandeza superior se comparado com o entre os postos Rio Pardo e São Jerônimo Jusante e o trecho em estudo.

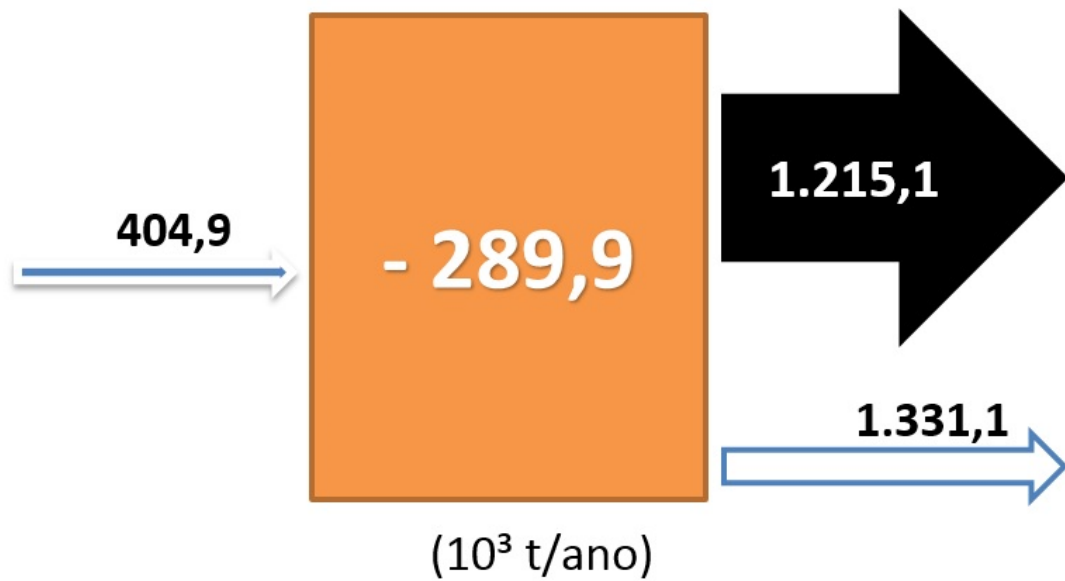
Para o estudo do balanço sedimentométrico foram criados dois cenários. O primeiro considerando como material de fundo a areia média e adotando uma taxa de extração de areia correspondente a cerca de 70% do total produzido no Rio Jacuí antes da construção da UHE Dona Francisca e de 140% de extração de areia após a construção da barragem, tomando como referência os dados do ano 2010. O segundo cenário leva em consideração a areia grossa com as mesmas porcentagens de extração. Nas figuras 26 a 29 é possível visualizar o resultado dos balanços sedimentométricos para os dois cenários criados. A seta azul anterior ao quadrado laranja representa a entrada de sedimentos no trecho em estudo. A seta preta representa extração de areia e a última seta representa a quantidade de sedimento que sai do trecho analisado. Por fim o retângulo laranja representa o resultado do balanço sedimentométrico para o trecho estudado.

Figura 26 – Balanço sedimentométrico para o cenário 1 anterior a construção da UHE Dona Francisca



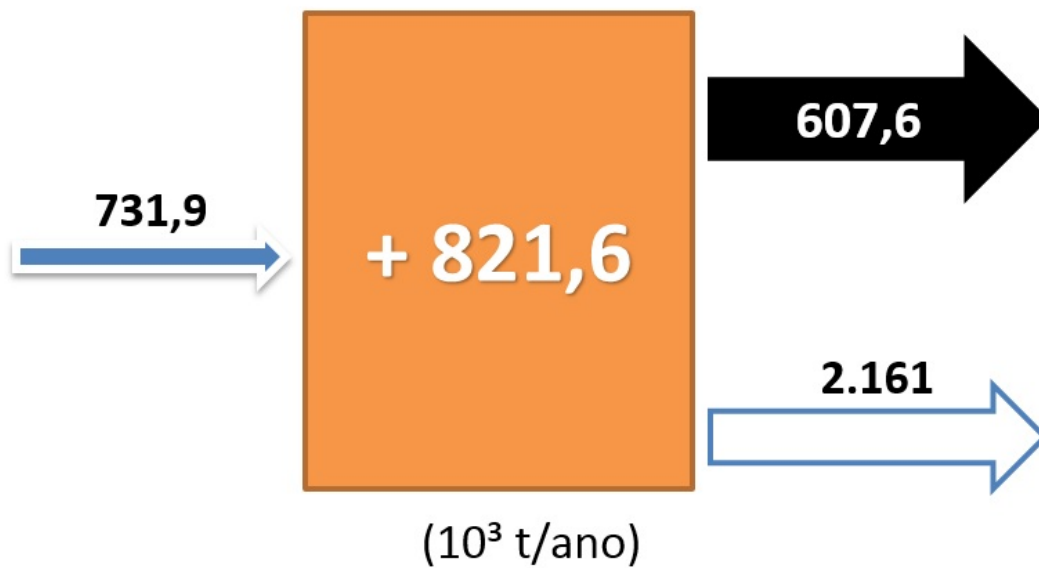
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 27 – Balanço sedimentométrico para o cenário 1 posterior a construção da UHE Dona Francisca



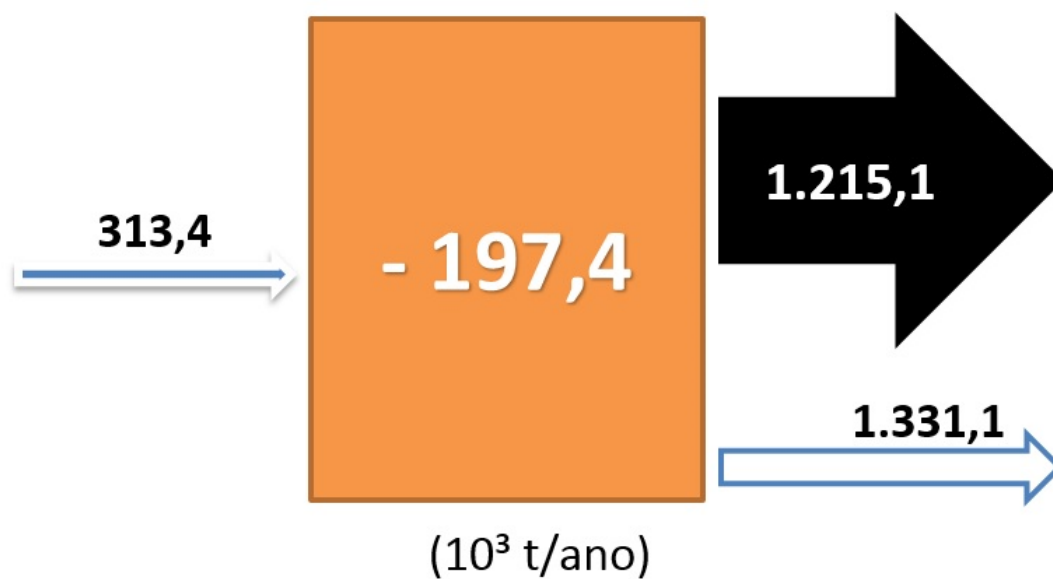
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 28 – Balanço sedimentométrico para o cenário 2 anterior a construção da UHE Dona Francisca



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 29 – Balanço sedimentométrico para o cenário 2 posterior a construção da UHE Dona Francisca



(fonte: elaborado pelo autor)

Nota-se que em ambos os cenários, para o período posterior à construção da UHE Dona Francisca, o déficit de suprimento de sedimentos pelo trecho em estudo é negativo. Verifica-se uma diminuição tanto nas quantidades aportadas como nas exportadas do trecho em estudo após a instalação dessa usina.

No apêndice C podem ser verificadas as tabelas que detalham sobre o balanço sedimentológico realizado considerando os cenários mencionados.

8 CONCLUSÕES

A partir dos cálculos desenvolvidos neste trabalho, que culminaram no balanço sedimentométrico apresentado no item 7.7, é possível inferir que o trecho do Rio Jacuí compreendido entre os postos de medições fluvio-sedimentométricos Dona Francisca e Rio Pardo apresenta um balanço sedimentológico positivo para um período anterior a construção da UHE Dona Francisca e um balanço negativo para o período posterior a sua construção. Verificou-se também que, independentemente da granulometria analisada, os resultados do balanço permaneceram inalterados. Entretanto verificou-se que independente do diâmetro do grão têm-se uma redução de cerca de 38% no déficit de sedimentos no trecho em estudo. Esse déficit foi calculado com base em todas as estimativas e suposições feitas nesse trabalho. Cabe ressaltar que estes valores devem ser confirmados, à medida que novos dados vão sendo incorporados à base de dados da ANA, uma vez que a série utilizada compreende poucos anos de observação e medição. Os déficits representam quantidades de sedimento que o rio estaria tentando retirar dos seus depósitos (fundo ou margens), caso eles estejam disponíveis, para atingir o seu estado de equilíbrio. Assim, embora a remoção de areia do trecho em estudo do Rio Jacuí possa representar alguns problemas importantes relacionado à erosão ou ambientais, estes não foram analisados e tão pouco discutidos e, por esse motivo, estão fora do escopo deste trabalho.

Um fator que pode estar relacionado com essa diminuição na quantidade de sedimentos é a existência da UHE Dona Francisca à montante do trecho em estudo. Conforme visto na figura 14 existe uma diminuição das vazões médias que ocorrem no trecho em estudo. Essa diminuição deve-se ao fato de que a usina controla a vazão a jusante da barragem, formando assim o seu reservatório de água para a geração de energia, pois a mesma necessita de uma quantidade mínima de água (altura de água) no reservatório para a geração de eletricidade. Visto neste trabalho que o caudal líquido possui uma relação com a quantidade de sedimentos que circulam em um rio pode-se afirmar que o controle feito pela UHE Dona Francisca possui influência na quantidade de sedimentos que circulam no interior do Rio Jacuí. Desta forma alterando a condição fluvio-sedimentológica natural em que o trecho em estudo encontrava-se antes da sua instalação.

Conforme mencionado anteriormente o presente trabalho não avaliou, calculou ou fez qualquer estudo sobre a existência de depósitos de sedimentos no trecho em estudo. Contudo com os resultados apresentados por esse trabalho pode-se verificar que, em média, o trecho em estudo do Rio Jacuí apresenta um déficit médio anual de sedimentos considerando a relação entre aporte sólido e retirada/extração de areia. Os resultados apresentados pelo balanço sedimentométrico são uma estimativa do déficit médio anual que o trecho do Rio Jacuí estaria perdendo, porém, em se tratando de uma média, não significa que anualmente o trecho de rio em estudo esteja perdendo a quantidade de sedimentos que foi calculada pelo balanço sedimentométrico.

Considerando-se a escassez de dados, optou-se por trabalhar com dados médios ao invés de dados diários. Na medida em que esse estudo foi desenvolvido baseando-se em dados médios anuais, os déficits aqui calculados para o trecho em estudo são estimativos e não podem ser considerados como sendo representativos da realidade do trecho em estudo, pois a escassez de dados limitou os resultados desse estudo. Entretanto para a melhor acurácia dos resultados as seguintes considerações fazem-se pertinentes:

a) sobre os resultados deste trabalho:

- coletar dados de campo como: amostras de sedimentos em suspensão e de fundo; para a construção de uma curva granulométrica que represente a realidade dos sedimentos que circulam no interior do Rio Jacuí;
- melhorar a estimativa da declividade do leito do rio, pois como visto neste trabalho, a utilização de um MDE para a determinação da declividade de fundo fornece muitas distorções na sua estimativa;
- melhorar os dados de entrada para que os dados de estimativa da descarga sólida por arrasto sejam mais precisos;
- dividir em mais seções o trecho em estudo, a fim de obter melhores estimativas desses dados;

b) sobre os dados, que serviram de base para os cálculos:

- aumentar a quantidade e a qualidade dos dados fornecidos pela ANA;
- criação de mais postos de medições de sedimentos por parte das administradoras da rede hidrológica da bacia do Atlântico Sul.

Em suma pode-se constatar que existem muitas variáveis envolvidas que podem alterar a qualidade da estimativa do equilíbrio de um trecho de rio. Como já foi dito a qualidade dos resultados dependem dos dados obtidos e da sua quantidade. Na figura 4 fica evidente a

diferença na quantidade de estações fluviométricas em relação as sedimentométricas. No entanto não é só a quantidade de estações que é importante, mas sim a qualidade de dados que à elas estão vinculados, pois eles influenciam diretamente nos resultados fornecidos pelos métodos de capacidade de transporte.

O método de determinação do estado de equilíbrio de um trecho de rio também depende da qualidade e da quantidade de dados disponíveis para esse trecho. O que torna o estudo sobre o transporte de sedimento um desafio, pois os resultados não estão limitados apenas ao conhecimento teórico sobre o tema, mas também sobre quais dados estão disponíveis, em que quantidade e, principalmente, a sua qualidade.

Contudo os resultados apresentados neste trabalho são apenas estimativos, visto que a escassez e a qualidade dos dados não permitiram uma melhor precisão nos resultados.

REFERÊNCIAS

- BORDAS, M. P.; SEMMELMANN, F. R. Elementos de Engenharia de Sedimentos. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed (4. reimp). Porto Alegre. UFRGS/ABRH, 2012. p. 915-940.
- BORGES, A. L de O. **Determinação da capacidade máxima de transporte por arraste de um Escoamento Sobre Fundo Móvel**. 1987. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1987.
- BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente**. Secretaria de Recursos Hídricos. Caderno da Região Hidrográfica do Atlântico Sul. Brasília. 2006. 128 p.
- _____. **Ministério de Minas e Energia**. Departamento Nacional de Produção Mineral. Anuário Mineral Brasileiro 2010. Brasília. 2011. 871 p.
- CARDOSO, A. H. **Hidráulica fluvial**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1998.
- CARVALHO, N de. O. **Hidrossedimentologia prática**. 2. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.
- CARVALHO, N de. O.; FILIZOLA JR, N. P.; LIMA, J. E. F. W.; SANTOS, P. M. C dos. **Guia de Práticas Sedimentológicas**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de estudos e Informações Hidrológicas, 2000.
- MACHADO, T. F. **Proveniência das areias inconsolidadas do Rio Jacuí – RS**. 2011. 73 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- RIO GRANDE DO SUL. **Secretaria Estadual do Meio Ambiente**. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler. Qualidade Ambiental. Disponível em: www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade_jacui/jacui.asp. Acessado em: 11/05/2014.
- SANTOS, D. N dos. **Extração de areia e a dinâmica sedimentar no alto curso do rio Paraná na região de Porto Rico, PR**. 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado em Análise Geoambiental) – Centro de Pós-Graduação, Pesquisa e Extensão, Universidade de Guarulhos, Guarulhos, 2008.
- SOCIEDADE DOS MINERADORES DE AREIA DO RIO JACUÍ. Informativo SMARJA Ano I Número I. Disponível em: <http://www.smarja.com.br/informativos/Informativo1.pdf>. Acessado em: 04/06/2014.
- TUCCI, C. E. M. Regionalização de Vazões. In: _____. (Org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4. ed.(4. reimp.). Porto Alegre. UFRGS/ABRH, 2012. p. 573-619.

**APÊNDICE A – Boletins Fluvio-sedimentométricos dos postos
Dona Francisca e Rio Pardo**

Dona Francisca

Coordenadas:

 Posto: 85400000 Área = 14.014,00 Km² Lat= -29,62750000
 Long= -53,35333333

Data	Cota (Cm)	Largura (m)	Área molhada (m²)	h (m)	Vm (m/s)	Concentração (ppm)	Descargas			
							Líquida (m³/s)	Sólida em suspensão (t/dia)	Sólidas de arrasto (t/dia)	Sólida total (t/dia)
07/07/1978	112,00	135,00	531,00	3,93	0,288	138,66	153,00	1.832,97	366,59	2.199,57
11/09/1978	88,00	130,00	476,00	3,66	0,210	32,38	100,00	279,76	55,95	335,72
07/12/1978	264,00	144,00	773,00	5,37	0,600	94,79	464,00	3.800,09	760,02	4.560,11
27/09/1979	69,00	120,00	399,00	3,33	0,196	177,98	78,40	1.205,59	241,12	1.446,71
06/02/1981	279,00	146,00	776,00	5,32	0,638	101,30	495,00	4.332,40	866,48	5.198,88
05/06/1981	60,00	124,00	404,00	3,26	0,201	22,63	81,00	158,37	31,67	190,05
09/09/1981	62,00	105,00	310,00	2,95	0,232	16,28	72,10	101,42	20,28	121,70
02/12/1981	63,00	120,00	403,00	3,36	0,197	19,41	79,50	133,32	26,66	159,99
11/07/1985	342,00	149,00	769,00	5,16	1,151	24,53	885,00	1.875,66	375,13	2.250,79
16/10/1985	240,00	143,00	600,00	4,20	0,712	10,08	427,00	371,88	74,38	446,26
07/04/1986	323,00	147,00	724,00	4,93	0,938	35,20	679,00	2.065,03	413,01	2.478,03
31/07/1986	187,81	142,62	530,68	3,72	0,615	43,87	326,60	1.237,93	247,59	1.485,52
09/10/1986	190,00	141,00	537,00	3,81	0,590	3,60	317,00	98,60	19,72	118,32
23/04/1987	224,00	143,00	509,00	3,56	0,690	13,57	351,00	411,53	82,31	493,84
14/07/1987	434,00	158,00	838,00	5,30	1,324	2,92	1.109,00	279,79	55,96	335,74
11/11/1987	261,00	145,00	625,00	4,31	0,724	45,59	453,00	1.784,36	356,87	2.141,23
09/03/1989	77,00	134,00	363,00	2,71	0,284	5,32	103,00	47,34	9,47	56,81
14/06/1989	126,00	138,00	401,00	2,91	0,449	2,85	180,00	44,32	8,86	53,19
28/09/1989	629,00	164,00	1.186,00	7,23	1,364	42,73	1.618,00	5.973,45	1.194,69	7.168,14
02/04/1993	160,00	141,50	471,00	3,33	0,556	8,41	262,00	190,38	38,08	228,45
28/07/1993	217,00	138,40	546,00	3,95	0,907	19,56	495,00	836,54	167,31	1.003,85
21/10/1993	216,00	140,00	521,00	3,72	0,689	21,95	359,00	680,84	136,17	817,00
19/05/1997	45,00	133,00	310,00	2,33	0,160	16,79	50,20	72,82	14,56	87,39
14/08/1997	72,00	135,00	334,00	2,47	0,218	0,93	72,90	5,86	1,17	7,03
25/11/1997	314,00	147,00	694,00	4,72	1,035	30,03	718,00	1.862,92	372,58	2.235,50
27/02/1998	710,00	168,00	1.371,00	8,16	2,304	16,78	2.339,00	3.391,06	678,21	4.069,28
19/05/1998	386,00	150,00	798,00	5,32	1,132	16,78	903,00	1.309,16	261,83	1.570,99
24/08/1998	336,00	147,00	674,00	4,59	1,260	8,37	849,00	613,97	122,79	736,76
17/11/1998	138,00	143,00	430,00	3,01	0,493	11,62	212,00	212,84	42,57	255,41
17/02/1999	96,00	132,00	374,00	2,83	0,340	7,85	127,00	86,14	17,23	103,36
18/05/1999	111,00	139,00	382,00	2,75	0,437	8,35	167,00	120,48	24,10	144,58
23/08/1999	112,00	144,00	414,00	2,88	0,423	14,02	175,00	211,98	42,40	254,38
12/11/1999	215,00	148,50	556,90	3,75	0,663	6,93	369,00	220,94	44,19	265,13
14/02/2000	110,00	141,00	416,00	2,95	0,356	13,80	148,00	176,46	35,29	211,76
11/06/2000	288,00	150,00	661,00	4,41	0,821	6,43	543,00	301,66	60,33	362,00
22/08/2000	140,00	143,00	445,40	3,11	0,483	23,23	210,30	422,09	84,42	506,50
20/11/2000	241,00	146,00	589,69	4,04	0,876	5,38	516,50	240,09	48,02	288,10
09/05/2001	294,00	150,00	680,00	4,53	0,970	11,57	660,00	659,77	131,95	791,72
14/08/2001	202,00	144,00	534,00	3,71	0,727	6,97	388,00	233,66	46,73	280,39
12/11/2001	188,00	144,00	509,00	3,53	0,655	6,03	334,00	174,01	34,80	208,81
28/01/2002	99,00	138,00	386,00	2,80	0,383	10,93	148,00	139,76	27,95	167,72
20/05/2002	302,00	149,00	679,00	4,56	0,904	5,62	614,00	298,14	59,63	357,77
15/08/2002	314,00	150,00	707,00	4,71	1,050	13,89	741,00	889,27	177,85	1.067,13
12/11/2002	503,00	161,00	1.013,00	6,29	1,440	14,19	1.458,00	1.787,53	357,51	2.145,04
26/02/2003	284,00	148,00	652,00	4,41	0,940	16,04	613,00	849,53	169,91	1.019,44
01/07/2003	210,00	146,00	516,00	3,53	0,767	11,57	395,00	394,86	78,97	473,83
30/09/2003	165,00	144,00	480,00	3,33	0,539	5,42	284,00	132,99	26,60	159,59
09/07/2004	214,00	148,00	544,00	3,68	0,754	2,95	411,00	104,76	20,95	125,71
05/10/2004	136,00	137,86	447,80	3,25	0,485	3,06	204,00	53,93	10,79	64,72
16/08/2005	126,00	141,00	405,00	2,87	0,462	5,58	187,00	90,15	18,03	108,19
12/10/2006	111,00	146,00	388,70	2,66	0,336	4,91	130,84	55,51	11,10	66,61
21/03/2007	104,00	139,00	387,00	2,78	0,369	3,54	143,00	43,74	8,75	52,48
09/08/2007	236,00	147,00	588,00	4,00	0,784	3,93	461,00	156,53	31,31	187,84
29/11/2007	160,00	144,00	463,00	3,22	0,438	6,84	203,00	119,97	23,99	143,96
14/06/2008	113,00	138,00	401,00	2,91	0,316	7,81	126,00	85,02	17,00	102,03
04/10/2008	108,00	140,00	406,00	2,90	0,366	7,34	148,00	93,86	18,77	112,63
28/06/2009	90,72	132,11	361,86	2,74	0,330	2,68	116,89	27,07	5,41	32,48
29/04/2010	175,00	147,00	511,00	3,48	0,545	4,02	279,00	96,81	19,36	116,17
11/11/2010	183,00	147,00	534,00	3,63	0,630	4,82	336,00	139,84	27,97	167,81
20/03/2011	104,00	138,00	402,00	2,91	0,359	5,38	144,00	66,96	13,39	80,35
09/11/2011	122,00	128,00	299,00	2,34	0,628	6,25	188,00	101,52	20,30	121,82
21/02/2012	94,00	140,00	390,00	2,79	0,325	4,82	127,00	52,89	10,58	63,47
21/08/2012	92,00	126,36	240,00	1,90	0,479	2,60	115,00	25,83	5,17	31,00
28/11/2012	128,00	129,29	282,00	2,18	0,602	9,80	170,00	143,94	28,79	172,73
22/04/2013	138,00	128,96	293,00	2,27	0,629	6,50	184,00	103,33	20,67	124,00
31/07/2013	103,00	126,33	258,00	2,04	0,495	5,20	131,00	58,86	11,77	70,63

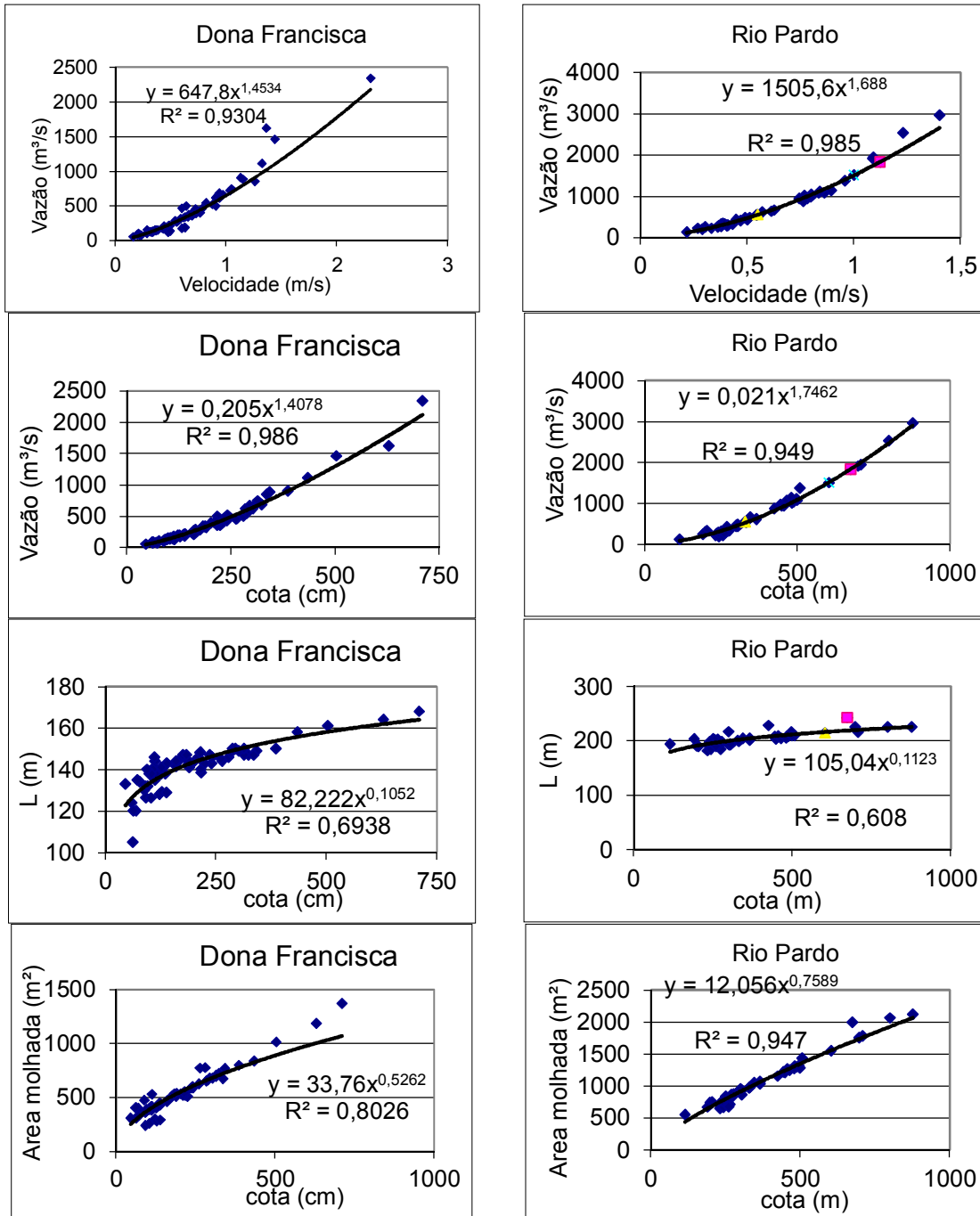
Rio Pardo

Coordenadas:

Posto: 85900000 Área = 38.753,00 Km² Lat= -29,99472222
 Long= -52,37722222

Data	Cota (m)	Largura (m)	Área molhada (m ²)	h m (m)	Vm (m/s)	Concentração (ppm)	Descargas			
							Líquida (m ³ /s)	Sólida em suspensão (t/dia)	Sólidas de arrasto (t/dia)	Sólida total (t/dia)
03/06/1998	482,00	207,00	1.311,00	6,33	0,768	14,23	1.007,00	1.238,08	247,62	1.485,69
18/08/1998	698,00	225,00	1.756,00	7,80	1,087	37,32	1.908,00	6.152,25	1.230,45	7.382,70
12/11/1998	250,00	192,00	838,00	4,36	0,379	8,72	318,00	239,58	47,92	287,50
09/02/1999	270,00	197,00	861,00	4,37	0,468	4,98	403,00	173,40	34,68	208,08
12/05/1999	198,00	190,00	740,00	3,89	0,405	9,38	300,00	243,13	48,63	291,76
17/08/1999	331,00	198,00	981,00	4,95	0,544	24,22	534,00	1.117,45	223,49	1.340,94
09/11/1999	488,00	208,00	1.299,00	6,25	0,800	40,65	1.039,00	3.649,13	729,83	4.378,96
11/02/2000	277,00	198,00	871,00	4,40	0,387	15,87	337,00	462,08	92,42	554,50
08/06/2000	507,00	209,00	1.430,00	6,84	0,957	55,88	1.369,00	6.609,58	1.321,92	7.931,49
17/08/2000	328,00	200,00	972,10	4,86	0,549	24,26	547,80	1.148,22	229,64	1.377,87
03/10/2000	602,36	213,86	1.551,67	7,26	0,999	18,32	1.503,00	2.379,02	475,80	2.854,82
14/11/2000	444,00	207,00	1.223,82	5,91	0,798	116,40	976,00	9.815,59	1.963,12	11.778,71
23/05/2001	448,00	203,00	1.206,00	5,94	0,783	34,55	944,00	2.817,95	563,59	3.381,54
08/08/2001	365,00	201,00	1.031,00	5,13	0,612	20,87	631,00	1.137,80	227,56	1.365,36
07/11/2001	274,00	184,00	832,00	4,52	0,394	24,64	328,00	698,28	139,66	837,93
23/01/2002	204,00	189,00	750,00	3,97	0,431	18,04	323,00	503,45	100,69	604,14
15/05/2002	304,00	192,00	936,00	4,88	0,511	28,20	478,00	1.164,64	232,93	1.397,56
28/08/2002	877,00	225,00	2.119,00	9,42	1,400	17,72	2.959,00	4.530,25	906,05	5.436,30
06/11/2002	800,00	225,00	2.065,00	9,18	1,230	45,31	2.531,00	9.908,32	1.981,66	11.889,98
26/06/2003	708,00	215,00	1.779,00	8,27	1,090	29,00	1.942,00	4.865,88	973,18	5.839,05
25/09/2003	301,00	192,00	948,00	4,94	0,489	14,80	464,00	593,33	118,67	711,99
02/07/2004	345,00	204,00	1.051,00	5,15	0,626	29,04	658,00	1.650,96	330,19	1.981,15
30/09/2004	456,00	208,00	1.267,00	6,09	0,744	30,12	942,00	2.451,43	490,29	2.941,72
20/11/2004	365,00	204,00	1.068,00	5,24	0,569	27,35	607,00	1.434,37	286,87	1.721,24
12/08/2005	304,00	193,00	865,00	4,48	0,500	8,08	433,00	302,28	60,46	362,74
07/10/2006	269,00	192,00	863,90	4,50	0,499	23,29	431,83	868,95	173,79	1.042,74
17/03/2007	464,00	204,00	1.245,00	6,10	0,863	37,91	1.074,00	3.517,81	703,56	4.221,37
11/08/2007	480,00	205,00	1.274,00	6,21	0,894	33,81	1.138,00	3.324,31	664,86	3.989,17
30/09/2008	264,00	202,00	714,00	3,53	0,410	22,58	292,00	569,67	113,93	683,60
06/07/2009	232,00	181,00	647,00	3,57	0,332	12,39	215,00	230,16	46,03	276,19
06/10/2009	673,92	242,00	1.997,00	8,25	1,122	34,19	1.828,51	5.401,45	1.080,29	6.481,74
10/08/2010	424,00	227,69	1.154,00	5,07	0,763	24,49	874,00	1.849,33	369,87	2.219,19
08/11/2010	190,00	202,93	674,00	3,32	0,363	14,10	245,00	298,47	59,69	358,16
21/03/2011	234,00	192,00	675,00	3,52	0,379	16,92	256,00	374,24	74,85	449,09
01/06/2011	299,00	216,00	957,00	4,43	0,449	7,78	430,00	289,12	57,82	346,94
24/08/2011	496,00	215,00	1.317,00	6,13	0,840	16,27	1.107,00	1.556,14	311,23	1.867,37
15/11/2011	250,00	203,00	823,00	4,05	0,303	17,19	249,00	369,82	73,96	443,78
24/02/2012	242,00	184,00	671,00	3,65	0,289	4,80	194,00	80,46	16,09	96,55
22/05/2012	114,00	193,00	555,00	2,88	0,216	17,40	120,00	180,40	36,08	216,48
29/08/2012	256,00	201,10	797,00	3,96	0,269	19,90	215,00	369,66	73,93	443,59
12/11/2012	240,00	197,39	768,00	3,89	0,368	11,80	283,00	288,52	57,70	346,23
26/04/2013	260,00	188,55	678,00	3,60	0,406	13,90	275,00	330,26	66,05	396,32
15/08/2013	499,00	208,67	1.284,00	6,15	0,836	41,50	1.073,00	3.847,35	769,47	4.616,82

**APÊNDICE B – Gráficos das funções utilizadas na consistência dos dados
dos postos Dona Francisca e Rio Pardo**



**APÊNDICE C – Tabelas dos balanços sedimentológicos realizados no
trecho em estudo**

Balço sedimentométrico para o cenário 1

Período	Entra (t/ano)	Sai (t/ano)	Contribuição Percurso (t/ano)	Extração (t/ano)	Déficit Suprimento (t/ano)
1939-2000 (Antes UHE DF)	734.284,98	2.161.043,52	1.426.758,54	607.550,09	819.208,45
2001-2013 (Depois UHE DF)	404.936,55	1.331.122,13	926.185,58	1.215.100,18	-288.914,60

(fonte: elaborado pelo autor)

Balço sedimentométrico para o cenário 2

Período	Entra (t/ano)	Sai (t/ano)	Contribuição Percurso (t/ano)	Extração (t/ano)	Déficit Suprimento (t/ano)
1939-2000 (Antes UHE DF)	731.872,59	2.161.043,52	1.429.170,93	607.550,09	821.620,84
2001-2013 (Depois UHE DF)	313.386,83	1.331.122,13	1.017.735,30	1.215.100,18	-197.364,87

(fonte: elaborado pelo autor)