



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE  
ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

---

**MARIANNI DE ARAGÃO NOGARE**

**MODIFICAÇÕES NOS PADRÕES DE COMPORTAMENTO  
DE CURVAS-CHAVE DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO A  
JUSANTE DE BARRAMENTOS**

Porto Alegre

Dezembro 2014

**MARIANNI DE ARAGÃO NOGARE**

**MODIFICAÇÕES NOS PADRÕES DE COMPORTAMENTO DE CURVAS-CHAVE  
DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO A JUSANTE DE BARRAMENTOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO  
APRESENTADO AO CURSO DE  
ENGENHARIA AMBIENTAL DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO  
GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE ENGENHEIRA AMBIENTAL.

Orientadora: Ana Luiza de Oliveira Borges

Co-orientador: Alfonso Risso

Porto Alegre  
Dezembro 2014

MARIANNI DE ARAGÃO NOGARE

MODIFICAÇÕES NOS PADRÕES DE COMPORTAMENTO DE CURVAS-CHAVE  
DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO A JUSANTE DE BARRAMENTOS

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em **05/12/2014** pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....  
Prof. Ms. Alfonso Risso (DOH/UFRGS)

.....  
Eng. Juliana Kaiber da Silva (PPGRHS/IPH/UFRGS)

.....  
Prof. Dr. Rafael Manica (DHH/UFRGS)

Conceito:.....

Dedicatória

Aos meus pais, Carla e Ricardo.

## AGRADECIMENTOS

À professora Ana, pela orientação e paciência e principalmente pelos conselhos, prestados com dedicação.

A todos os professores que fizeram parte da minha formação.

Aos amigos, próximos e distantes, pelos momentos compartilhados e pelo apoio quando necessário.

Aos colegas e amigos, Ayan, Júlia, Lucas, Paula, Patrícia, Pedro, Raíza, Walter e William, os quais tornaram estes seis anos na Engenharia Ambiental inesquecíveis.

Ao Brazilian QG, pelas infindáveis risadas, pelo apoio, mesmo que distante, e por nunca me deixarem desistir dos meus sonhos.

Ao meu amigo-irmão João, pelo carinho e apoio, e pelos abraços nos momentos difíceis.

À Louise, amiga presente em todas as etapas.

À minha família, pelo incentivo e apoio ao longo de todos estes anos.

Aos meus pais, Carla e Ricardo, e irmão, Ricardo, pela compreensão, confiança e amor incondicionais, indispensáveis para conclusão desta etapa.

E a todos aqueles que de alguma maneira participam da minha vida, contribuindo para o meu crescimento.

Gratidão.

Perhaps a lunatic was simply a minority of one.

*George Orwell*



## RESUMO

NOGARE, M.A. **Modificações nos padrões de comportamento de curvas-chave de sedimentos em suspensão a jusante de barramentos.** 2014. 104 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Neste estudo, foram utilizados dados de vazão e concentração de sedimentos em suspensão provenientes de estações de amostragem localizadas a jusante de barramentos em diferentes locais do Brasil. O objetivo principal foi analisar quantitativamente as possíveis modificações ocorridas no comportamento da descarga sólida e da vazão após a implantação de barramentos nos cursos de água. Para isto, foram construídas curvas-chave de sedimentos e curvas de permanência dos rios e calculados os deflúvios sólidos médio anuais para os períodos pré e pós-barragem. As modificações observadas nas curvas-chave de sedimentos dos dez casos em estudo possibilitaram uma classificação em quatro tipos básicos de comportamento. Os valores de eficiência de retenção obtidos foram comparados com aqueles calculados através do método de Brune, tradicional método utilizado para previsão de assoreamento em reservatórios, e demonstraram que, na maioria dos casos, os resultados diferem, sugerindo a necessidade de elaboração de um método de avaliação de retenção sedimentos adaptado às condições dos reservatórios do país.

Palavras-chave: sedimentos em suspensão; curvas-chave de sedimentos; eficiência de retenção.

## ABSTRACT

NOGARE, M.A. **Changes in behavior patterns of sediment rating curves downstream of dams.** 2014. 104 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

In this study, fluviometric and sedimentometric data from gauging stations located downstream of reservoirs in different regions of Brazil were analysed. The main purpose was to analyze possible modifications on the behavior of suspended sediment concentration after the introduction of dams on the chosen watercourses. The changes observed in the sediment rating curves from ten study areas were classified into four basic types of behavior. Sediment rating curves and discharge frequency distributions were obtained and the mean annual sediment flows were calculated for the periods before and after the dams' construction. The sediment trapping efficiency obtained through the sedimentometric data were compared with those estimated by Brune's method: a traditional method used for estimating a reservoirs' trap efficiency. For most of the cases, the results differ when compared. This suggests that it may be possible to establish a new method to estimate sediment trap efficiency adapted to the characteristics of the country's reservoirs.

Key words: suspended sediments; sediment rating curves; trapping efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relação entre os materiais e processos presentes nos sistemas fluviais. (Adaptado de Bridge,.....)	26
Figura 2. Formas de transporte de sedimentos (Adaptado de Carlson et al., 2011). .....	30
Figura 3. Distribuição da velocidade de corrente, concentração de sedimentos e descarga sólida ao longo de uma seção transversal (Adaptado de SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION, 1948; 1963) .....	33
Figura 4. Divisão da bacia hidrográfica de acordo com a ocorrência dos fenômenos de erosão, transporte e deposição de sedimentos fluviais (Adaptado de US Army Corps of Engineers, 1994). .....	34
Figura 5. Amostragem de sedimentos pelo método de igual incremento de largura (IIL) (Adaptado de Edwards e Glysson, 1999 por Carvalho, 2008). .....	37
Figura 6. Amostragem de sedimentos pelo método de igual incremento de descarga (IID) (Adaptado de Edwards e Glysson, 1999 por Carvalho, 2008). .....	37
Figura 7. Curvas de Brune para estimar a eficiência de retenção (ou de liberação) de sedimentos em reservatórios (Adaptado de Morris e Fan, 1998, p.10.27) .....	47
Figura 8. Curva de retenção de sedimentos por Churchill, versão apresentada por Annandale (1987). (Fonte: Carvalho, 2008). .....	48
Figura 9. Localização das áreas de estudo – estações sedimentométricas e barramentos – ao redor do Brasil. ....	50
Figura 10. Localização do Açude Castanhão em relação à estação Peixe Gordo, rio Jaguaribe. ....	51
Figura 11. Localização da UHE Santo Antônio em relação à estação Porto Velho, rio Madeira. ....	51
Figura 12. Localização da UHE Peixe Angical em relação à estação Peixe, rio Tocantins. ....	52

Figura 13. Localização da UHE Luiz Eduardo Magalhães em relação à estação Miracema do Tocantins, rio Tocantins. ....	52
Figura 14. Localização da UHE Guaporé em relação à estação Pontes e Lacerda, rio Guaporé. ....	53
Figura 15. Localização da UHE Aimorés em relação à estação Colatina, rio Doce. ....	53
Figura 16. Localização da UHE Quebra Queixo em relação à estação Porto FAE Novo, rio Chapecó.....	54
Figura 17. Localização da UHE Foz do Chapecó em relação à estação Iraí, rio Uruguai. ....	55
Figura 18. Localização da UHE Dona Francisca em relação à estação de mesmo nome. ....	56
Figura 19. Localização da UHE 14 Julho em relação à estação Muçum, rio Taquari. ..	56

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Curvas-chave de sedimento obtidas para a estação Peixe Gordo.....	69
Gráfico 2. Curvas de permanência obtidas para a estação Peixe Gordo. ....	69
Gráfico 3. Curvas-chave de sedimentos obtidas para a estação Porto Velho.....	71
Gráfico 4. Curvas de permanência obtidas para a estação Porto Velho. ....	71
Gráfico 5. Curvas-chave de sedimentos obtidas para a estação Peixe. ....	73
Gráfico 6. Curvas de permanência obtidas para a estação Peixe.....	74
Gráfico 7. Curvas-chave de sedimentos obtidas para a estação Miracema do Tocantins. .....	75
Gráfico 8. Curvas de permanência obtidas para a estação Miracema do Tocantins. ....	75
Gráfico 9. Curvas-chave de sedimento obtidas para a estação Pontes e Lacerda. ....	77
Gráfico 10. Curvas de permanência obtidas para a estação Pontes e Lacerda. ....	77
Gráfico 11. Curvas-chave de sedimento obtidas para a estação Colatina. ....	78
Gráfico 12. Curvas de permanência obtidas para a estação Colatina.....	79
Gráfico 13. Curvas-chave de sedimentos obtidas para a estação Porto FAE Novo. ....	80
Gráfico 14. Curvas de permanência obtidas para a estação Porto FAE Novo. ....	80
Gráfico 15. Curvas-chave de sedimentos obtidas para a estação Iraí.....	82
Gráfico 16. Curvas de permanência obtidas para a estação Iraí.....	83
Gráfico 17. Curvas-chave de sedimentos obtidas para a estação Dona Francisca. ....	84
Gráfico 18. Curvas de permanência obtidas para a estação Dona Francisca. ....	85
Gráfico 19. Curvas-chave de sedimentos obtidas para a estação Muçum.....	86

Gráfico 20. Curvas de permanência obtidas para a estação Muçum.....	86
Gráfico 21. Comparação da eficiência de retenção obtida através do método de Brune com aquela calculada a partir dos dados sedimentométricos disponíveis para cada estação em estudo.....	99
Gráfico 21. Relação observada entre a eficiência de retenção e a área dos reservatórios em estudo.....	100

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1. Métodos de medição da descarga sólida em suspensão (Carvalho et al. 2000a).....	35
Quadro 2. Resumo das características das estações sedimentométricas em estudo.....	58
Quadro 3. Resumo das características dos reservatórios em estudo.....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características dos dados sedimentométricos e fluviométricos disponíveis para cada estação em estudo.....	63
Tabela 2. Resumo dos resultados obtidos após a análise dos dados sedimentométricos: curvas-chave (concentração), deflúvio sólido médio anual e produção específica de sedimentos. ....	88
Tabela 3. Resumo dos resultados obtidos após a análise dos dados sedimentométricos: curvas-chave (descarga sólida), deflúvio sólido médio anual e produção específica de sedimentos. ....	94
Tabela 4. Comparação da eficiência de retenção obtida através do método de Brune com aquela calculada a partir dos dados sedimentométricos disponíveis para cada estação em estudo.....	97





## SUMÁRIO

1. Introdução .....	20
2. Diretrizes básicas da pesquisa.....	22
2.1. Questão de pesquisa .....	22
2.2. Objetivos.....	22
2.2.1. Objetivos específicos .....	22
2.3. Hipótese .....	23
2.4. Pressuposto .....	23
3. Referencial teórico.....	24
3.1. O sistema fluvial e sua dinâmica .....	24
3.2. Os sedimentos.....	25
3.3. Os processos sedimentológicos .....	27
3.3.1. Origem dos sedimentos .....	27
3.3.2. Transporte de sedimentos.....	28
3.3.3. Deposição dos sedimentos .....	30
3.4. Distribuição dos sedimentos em um curso de água.....	31
3.4.1. Distribuição de sedimentos ao longo da vertical.....	31
3.4.2. Distribuição de sedimentos na seção transversal .....	32
3.4.3. Distribuição de sedimentos ao longo do curso de água .....	33
3.5. Avaliação do transporte de sedimentos em suspensão .....	34
3.5.1. Descarga sólida em suspensão .....	35
3.6. A curva-chave de sedimentos .....	37
3.6.1. Deflúvio sólido médio e descarga sólida específica.....	39
3.7. Modificações fluviais introduzidas por barragens.....	40
3.7.1. Modificações fluviais a jusante de barragens.....	41
3.8. Assoreamento de reservatórios.....	44

3.8.1.	Eficiência de retenção de reservatórios.....	46
4.	Metodologia.....	49
4.1.	Definição e caracterização das áreas de estudo.....	49
4.1.1.	Estação Peixe Gordo.....	49
4.1.2.	Estação Porto Velho.....	51
4.1.3.	Estação Peixe.....	51
4.1.4.	Estação Miracema do Tocantins.....	52
4.1.5.	Estação Pontes e Lacerda.....	53
4.1.6.	Estação Colatina.....	53
4.1.7.	Estação Porto FAE Novo.....	54
4.1.8.	Estação Iraí.....	54
4.1.9.	Estação Dona Francisca.....	55
4.1.10.	Estação Muçum.....	56
4.2.	Descrição dos dados utilizados.....	60
4.2.1.	Tratamento dos dados sedimentométricos.....	61
4.3.	Estabelecimento da curva-chave de sedimentos.....	64
4.4.	Cálculo do deflúvio médio anual de sedimentos.....	64
4.5.	Eficiência de retenção de sedimentos.....	66
5.	Resultados e discussões.....	67
5.1.	Análise dos padrões de descarga sólida em suspensão e descarga líquida.....	67
5.1.1.	Os padrões de comportamento em cada área de estudo.....	67
5.1.2.	Tipificação dos padrões de comportamento encontrados.....	91
5.1.3.	Comparação entre curvas-chave de sedimentos.....	93
5.2.	Eficiência de retenção de sedimentos.....	95
5.3.	Limitações.....	101
6.	Conclusões e recomendações.....	103
6.1.	Conclusões.....	103
6.2.	Recomendações para trabalhos futuros.....	105
	Referências bibliográficas.....	106



## 1. Introdução

Desde a Antiguidade, as barragens vêm sendo utilizadas como forma de gerenciamento dos recursos hídricos no mundo. Segundo a ICOLD (2008), existem evidências arqueológicas da existência de barragens simples de terra e sistemas de canais já em 2000 a.C. As barragens podem apresentar os mais diversos usos, como produção de energia, proteção contra inundações, navegação fluvial e irrigação, sendo que barragens de usos múltiplos também podem ser planejadas.

O crescimento populacional e econômico do planeta trouxe consigo um grande problema: o aumento da demanda pelos recursos hídricos e a consequente necessidade de se realizar o gerenciamento dos mesmos através de diversas formas, incluindo a implantação de barramentos ao longo dos cursos de água. De acordo com Kummu e Varis (2007), atualmente, cerca de 70% dos rios do mundo estão interceptados por reservatórios, sendo que houve um aumento da construção de barragens nas últimas décadas, principalmente em áreas com condições extremas de clima quente: alta precipitação e intensa erosão do solo (BRANDT, 2000). Além do aumento do número de barragens, pode-se considerar que através do crescente conhecimento tecnológico, que possibilita a implantação de empreendimentos com proporções muito maiores, agravaram-se também os impactos ocasionados pelos mesmos.

A construção de barragens ao longo de canais fluviais implica em severas modificações hidrológicas nos mesmos, tanto a jusante quanto à montante (SIQUEIRA et al., 2013). Um dos principais impactos ambientais ocasionados pela presença de barramentos em rios é a mudança da dinâmica fluvial a jusante da barragem, estritamente correlacionada com os sedimentos. A formação de reservatórios ocasiona uma redução no transporte de sedimentos para jusante, causando impactos não só no rio, como também na barragem, incluindo perda de eficiência e problemas relacionados à segurança das estruturas.

No Brasil, existem atualmente 6896 espelhos d'água de reservatórios artificiais catalogados, sendo 6634 construídos para usos múltiplos e 262 destinados à geração de energia hidrelétrica, matriz energética majoritária no país (Agência Nacional de Águas - ANA, 2013). Apesar da importância destes reservatórios, são raros os estudos disponíveis sobre modificações fluviais ocasionadas pela implantação dos mesmos. Para

o monitoramento dos seus recursos hídricos, o país conta com 27259 estações hidrometeorológicas inventariadas pela ANA, no entanto, apenas 767 destas realizam medições sedimentométricas (GUIMARÃES, 2011), evidenciando a grande discrepância existente entre a quantidade de dados sobre a descarga líquida (pluviosidade e vazão) e a descarga sólida e a consequente falta de estudos sobre o tema.

O conhecimento sobre os sedimentos possui fundamental importância para o estudo das modificações ocorridas nas bacias hidrográficas, tanto naturais quanto antrópicas; Peviani (1996) cita, por exemplo, problemas relacionados ao planejamento de barragens, práticas de conservação do solo, estabilidade de canais, assoreamento de lagos e reservatórios, transporte de poluentes, entre outros.

São diversas as referências aos efeitos da presença de barragens no transporte sedimentar, entretanto, os mesmos são extremamente difíceis de quantificar e suas consequências ainda não estão totalmente compreendidas (Ribeiro, 2009). Walling e Fang (2003), analisando séries históricas de descarga de sedimentos em 145 rios ao redor do mundo concluíram que a construção de reservatórios é provavelmente o fator de maior influência no transporte de sedimentos da terra para o oceano. Assim, é notável a importância de estudos capazes de analisar quantitativamente as influências provocadas pela presença de barramentos em sistemas fluviais, estimando as alterações na descarga sólida e seu comportamento.

Neste contexto, este trabalho busca identificar e analisar as modificações no comportamento da descarga sólida fluvial a jusante de barramentos, utilizando dados de estações sedimentométricas disponíveis em diferentes regiões do Brasil.

## **2. Diretrizes básicas da pesquisa**

### **2.1. Questão de pesquisa**

É possível identificar, através dos parâmetros que definem a curva-chave de sedimentos, modificações nos padrões de comportamento dos sedimentos em suspensão a jusante de barramentos?

### **2.2. Objetivos**

O presente trabalho tem como objetivo analisar quantitativamente o comportamento da descarga líquida e da concentração de sedimentos em suspensão em estações de amostragem localizadas a jusante de barramentos em diferentes regiões do Brasil, visando identificar possíveis alterações nos padrões de descarga sólida ocasionadas pela implantação dos mesmos.

#### ***2.2.1. Objetivos específicos***

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, deverão ser atingidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Coletar dados históricos digitais de vazão e sedimentos de estações sedimentométricas localizadas a jusante de barramentos no Brasil;
- b) Avaliar quantitativamente a concentração da descarga sólida em suspensão nestes locais, criando curvas-chave de sedimentos;
- c) Analisar as séries históricas de vazão nestes locais através de curvas de permanência;
- d) Avaliar quantitativamente o deflúvio sólido médio anual e a descarga sólida específica nestes locais, através da aplicação das curvas-chave de sedimentos criadas às séries de vazão disponíveis;
- e) Estimar, a partir do deflúvio sólido médio anual, a retenção de sedimentos ocasionada pelos barramentos;

- f) Comparar os resultados de retenção de sedimentos obtidos com aqueles obtidos através dos métodos tradicionalmente utilizados para a estimativa da eficiência de retenção de barramentos.

### **2.3.Hipótese**

A hipótese do trabalho é que através dos parâmetros que definem a curva-chave de sedimentos é possível analisar a influência da implantação de barramentos na concentração de sedimentos em suspensão de cursos de água.

### **2.4.Pressuposto**

Este trabalho tem por pressupostos que:

- a) existirão dados sedimentométricos e fluviométricos em estações de monitoramento localizadas a jusante de barramentos no Brasil;
- b) a qualidade destes dados permitirá estabelecer os regimes fluviométrico (vazão) e sedimentométrico que representam os trechos de rios em estudo.

### 3. Referencial teórico

#### 3.1.O sistema fluvial e sua dinâmica

O sistema fluvial pode ser definido como um conjunto de canais fluviais conectados no interior de uma bacia hidrográfica, área que é responsável pelo fornecimento de água e sedimentos para os canais, sendo delimitada por um divisor hidrográfico (BRIDGE, 2005). Segundo Schumm (1986), este sistema inclui além da água e dos sedimentos, os componentes morfológicos dos canais, as planícies de inundação, e as encostas.

Conforme afirmado por Morisawa (1968), a bacia hidrográfica e os canais que a constituem, podem ser considerados como um sistema aberto, caracterizado pela troca de materiais e energia com o ambiente circunjacente. Assim, a interação mútua entre as diversas características de um canal, incluindo declividade, forma do perfil transversal, rugosidade e padrão do canal, define o equilíbrio do mesmo. Ao ser modificado por alterações, naturais ou antrópicas, o sistema fluvial buscará uma readaptação ao seu estado de equilíbrio: “Ele é um sistema auto-regulador; qualquer alteração nos fatores controlantes causará um deslocamento em certa direção que tenderá a absorver o efeito da mudança” (Morisawa, 1968, p. 126). Em uma escala de tempo geológico, os canais fluviais respondem às mudanças tais como as climáticas, tectônicas e erosão do relevo; já em uma escala de tempo relativamente menor, variando de 10 a mais de 100 anos, as respostas observadas são resultados de alterações nas descargas sólida e líquida, e pela ação antrópica (SIQUEIRA et al., 2013).

Neste contexto, Maynari (2007, p. 61) apresenta uma definição para os sistemas fluviais, destacando sua complexidade:

“O sistema fluvial é, na verdade, um sistema complexo de processos adaptativos de respostas a interferências, naturais ou humanas, apresentando dois componentes principais, ou subunidades: o sistema morfológico compreendendo canais, planícies aluviais, vertentes, deltas, etc., e o sistema em cascata de transferência de energia e matéria (vazão e carga)”.



Posto isto, compreende-se que o correto entendimento dos sistemas fluviais está subordinado ao conhecimento destes componentes e suas alterações temporais. Como descrito por Schumm (1986), este entendimento, incluindo a análise e a previsão do comportamento dos sistemas fluviais, tende a ser uma tarefa árdua devido à grande variabilidade associada a estes sistemas. Ao se elaborar a análise de uma bacia hidrográfica, não se pode analisar os processos de erosão, transporte e deposição, bem como outros elementos que influenciam na dinâmica fluvial, separadamente, há que se considerar a interdependência destes fenômenos (COELHO, 2008).

### **3.2. Os sedimentos**

Os sedimentos podem ser definidos como os materiais fragmentados que tem origem na desintegração das rochas da superfície terrestre e podem ser transportados ou depositados pela ação de agentes naturais, tais como a água e o vento (COLBY, 1963).

Segundo Bordas e Semmelmann (2007), pode-se considerar a existência de um ciclo hidrossedimentológico vinculado ao ciclo hidrológico. Este ciclo envolve o deslocamento, transporte e deposição de partículas sólidas ao longo da bacia hidrográfica. Considerando-se uma visão de curto prazo, este ciclo é caracterizado como aberto, pois os sedimentos não retornam para o meio em que foram originados. Bridge (2005), por outro lado, ampliando as fronteiras temporais dos diversos processos envolvendo os sedimentos, conseguiu estabelecer um ciclo hidrossedimentológico fechado (Figura 1). Nesta abordagem, considera-se que o contexto climático e tectônico regional é responsável pelas características das bacias hidrográficas, as quais, definindo o fornecimento de água e sedimentos, acabam por determinar as características dos canais fluviais, como consequência dos fenômenos de erosão e deposição, entre outros. A ação dos eventos climáticos, eustáticos e tectônicos irá determinar as redistribuições de massa necessárias (ajustes isostáticos e mudanças de declividade), as quais, por sua vez, modificarão a bacia hidrográfica, fechando o ciclo.

Conforme citado por Vanoni (1977), a incorporação dos sedimentos ao fluxo, bem como o transporte e a deposição dos mesmos dependem tanto das características do fluxo, quanto das características dos sedimentos em si. A dimensão dos grãos é considerada a característica mais importante na descrição do comportamento dos sedimentos na água e uma variedade de termos pode ser utilizada para descrever o tamanho característico de partículas individuais ou amostras compostas (MORRIS e

FAN, 1998). Existem diversas escalas utilizadas para classificar os sedimentos de acordo com o tamanho, no país, a ABNT (1995) define como:

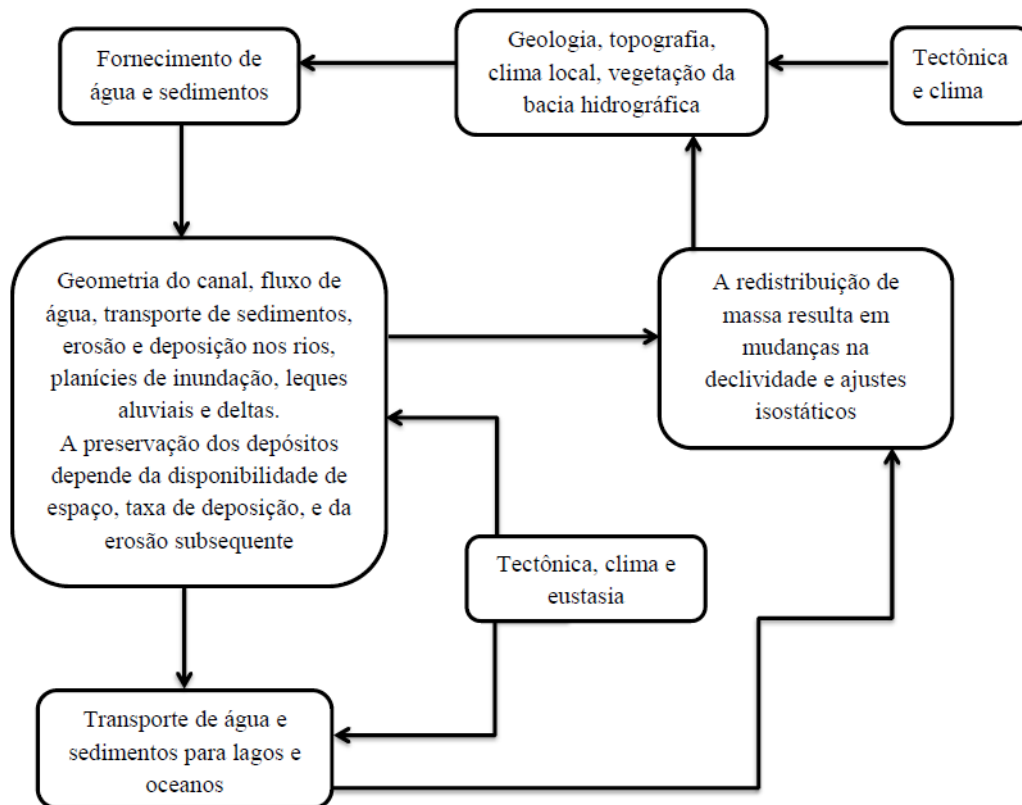


Figura 1. Relação entre os materiais e processos presentes nos sistemas fluviais. (Adaptado de Bridge, 2005, p.14).

Bloco de rocha: fragmento de rocha, transportado ou não, com diâmetro superior a 1 m;

Matacão: fragmento de rocha, transportado ou não, comumente arredondado por intemperismo ou abrasão, com uma dimensão compreendida entre 200 mm e 1 m;

Pedra-de-mão: fragmento de rocha com diâmetro compreendido entre 60 mm e 200 mm;

Pedregulho: solos formados por minerais ou partículas de rocha, com diâmetro compreendido entre 2,0 mm e 60 mm. Quando arredondados ou semi-arredondados, são denominados cascalho ou seixo. Podem ser subdivididos em: pedregulho fino (2 - 6 mm), pedregulho médio (6 - 20 mm) e pedregulho grosso (20 - 60 mm);

Areia: solo não coesivo e não plástico formado por minerais ou partículas de rochas com diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 2 mm. Podem ser subdivididas em: areia fina (0,06 - 0,2 mm), areia média (0,20 - 0,60 mm) e areia grossa (0,60 - 2 mm);

Silte: solo que apresenta baixa ou nenhuma plasticidade, e que exibe baixa resistência quando seco o ar. É formado por partículas com diâmetros compreendidos entre 0,002 mm e 0,06 mm;

Argila: solo de granulação fina constituído por partículas com dimensões menores que 0,002 mm, apresentando coesão e plasticidade.

Segundo Vanoni (1977), informações somente sobre o tamanho dos sedimentos não são suficientes para descrevê-los e diversos outros índices para a caracterização de partículas foram criados, sendo o formato e o arredondamento os de maior importância para as questões do transporte de sedimentos. Estes fatores podem ser avaliados qualitativa e quantitativamente, existindo diversas classificações.

### **3.3. Os processos sedimentológicos**

#### **3.3.1. Origem dos sedimentos**

Colby (1963) aponta que alguns sedimentos podem ser formados a partir de atividades vulcânicas, outros através da fragmentação das rochas em terremotos, no entanto, a principal origem dos fragmentos de rochas que se tornam sedimentos fluviais é a desintegração de rochas da crosta terrestre. Assim, segundo o autor, estes sedimentos podem ser incorporados ao fluxo fluvial quando partículas não consolidadas sofrem erosão devido ao escoamento superficial ou canalizado.

A desagregação corresponde ao primeiro fenômeno do ciclo hidrossedimentológico, a partir dela as partículas são desprendidas do meio do qual fazem parte, devido à ação de diversos agentes, físicos ou químicos (BORDAS E SEMMELMANN, 2007); este material desagregado se encontra suscetível à erosão, ou seja, pode ser deslocado de seu local de origem pela água ou outros agentes físicos. No entanto, os autores destacam que este deslocamento ocorre somente se as forças hidrodinâmicas do escoamento superam as forças resistivas: o peso da partícula, força de maior influência sobre sedimentos grossos, e as forças de coesão, de maior importância para partículas de granulometria fina.

Como descrito por Morris e Fan (1998), a erosão dos sedimentos inconsolidados pela água pode ser causada por diversos processos, incluindo: erosão laminar, erosão em canal, erosão em sulcos, formação de voçorocas e também movimentos de massa.

### 3.3.2. Transporte de sedimentos

Após serem erodidos, os sedimentos estão aptos a serem transportados pelos cursos de água. Morisawa (1968) destaca que a incorporação das partículas desagregadas do leito ao fluxo de água pode ocorrer por diversos motivos: (1) devido às forças de arraste criadas pela diferença de velocidade ou de direção da velocidade entre linhas de fluxo adjacentes; (2) através da ação de componentes ascendentes da velocidade; e (3) pela ação de sucção de vórtices em ascensão.

Segundo Hickin (1995), o transporte de sedimentos é o conjunto de processos que se encontra entre o fluxo de água e os limites do canal, sendo essencial para a compreensão do funcionamento dos rios. O autor destaca que a quantidade e o tamanho dos sedimentos transportados através de um canal fluvial são determinados por três fatores fundamentais: competência, capacidade e oferta de sedimento.

A *competência* pode ser definida como o maior tamanho de sedimento que o fluxo é capaz de transportar, representa, portanto, uma limitação hidráulica do canal (HICKIN, 1995). Morisawa (1968, p.53) salienta que a competência de um curso de água apresenta grande variabilidade temporal “um rio pode movimentar partículas muito maiores durante eventos de cheia quando o volume de água e sua velocidade são maiores”. Além disto, como mencionado por Christofolletti (1980), ocorre uma redução da competência do canal em direção de jusante, isto porque, embora haja um aumento na profundidade do mesmo, também ocorre uma diminuição da declividade reduzindo a granulometria dos sedimentos fluviais.

Hickin (1995) define *capacidade de transporte* como sendo a máxima quantidade de sedimento que o canal aluvial é capaz de transportar como carga sólida de arrasto. Segundo o autor, esta grandeza depende da declividade do canal, da descarga e da própria dimensão dos materiais transportados: a presença de sedimentos muito finos pode aumentar a densidade do fluido e, portanto, aumentar a sua capacidade, já partículas maiores podem obstruir o fluxo e reduzir a mesma em determinadas seções do canal.

Finalmente, a *oferta de sedimentos* pode ser entendida como a quantidade e o tamanho dos sedimentos disponíveis para serem transportados ao longo do canal fluvial (HICKIN, 1995).

Como descrito por Colby (1963), de um modo geral, a concentração de sedimentos em suspensão, de todas as granulometrias, tende a aumentar com o aumento da vazão

líquida. A concentração de sedimentos finos geralmente aumenta proporcionalmente com a vazão, visto que a maioria dos fluxos tem origem a partir de eventos de precipitação ou derretimento de geleiras, que provocam a erosão sedimentos finos da superfície terrestre; contudo, não necessariamente os picos de descarga líquida e sólida coincidem, já que nem sempre os maiores escoamentos produzem as maiores descargas sólidas. Quanto aos sedimentos de maior granulometria, o autor indica que a concentração de partículas normalmente aumenta com a vazão, pois as velocidades e a turbulência do fluxo tendem a ser superiores em descargas líquidas maiores.

### 3.3.2.1. *Formas de transporte de sedimentos*

Segundo Carvalho (2008), o processo de transporte dos sedimentos que chegam ao curso de água será determinado segundo as condições do local e do tipo de escoamento visto que as partículas sólidas apresentam diferentes características.

Não há uma separação precisa das partículas de diferentes tamanhos para o transporte ao longo do canal fluvial, no entanto, costuma-se dividir as formas de transporte de acordo com a seguinte definição (HICKIN, 1995):

- Carga sólida dissolvida: composta por materiais que integram o fluido que se move no canal e cujas características dependem basicamente da formação geológica local. Por estar dissolvida, esta carga não depende das forças que movimentam o fluxo para se manter na coluna de água nem apresenta grande importância para os processos que ocorrem nos canais fluviais;
- Carga sólida em suspensão: inclui as partículas que são mantidas em suspensão pelas forças verticais componentes do fluxo turbulento, sendo constituída principalmente por siltes, argilas e areias finas; Carvalho (2008) destaca que a descarga sólida em suspensão normalmente representa entre 80 e 95% da descarga sólida total de um curso de água, variando de acordo com o local, velocidade, tipo de escoamento, profundidade, granulometria e outros fatores;
- Carga sólida de lavagem: é considerada como uma componente da carga em suspensão, no entanto, suas partículas não dependem das forças do fluxo para se manter na coluna de água, estando sempre em suspensão. Formada por partículas de granulometria mais fina que o material do canal aluvial, é

considerada como uma carga que somente é transportada ao longo do sistema fluvial;

- Carga sólida saltante: inclui partículas que se movimentam através de saltos ao longo do curso de água, sendo em parte sustentadas pelas forças verticais do fluxo e parte pelo próprio leito, podendo então ser medidas tanto como carga sólida em suspensão como carga sólida de arrasto, dependendo da sua localização instantânea;
- Carga sólida de arrasto: são as partículas que permanecem constantemente em contato com o leito e são movimentadas, rolando ou deslizando, através da tensão de cisalhamento que age sobre o mesmo. A carga sólida de arrasto tende a apresentar limitação em relação à capacidade de transporte, ou seja, depende das características hidráulicas do canal e não da oferta de sedimentos; o contrário ocorre com a carga sólida em suspensão;

A Figura 2 apresenta um resumo das formas de transporte de sedimentos encontradas nos canais fluviais.



Figura 2. Formas de transporte de sedimentos (Adaptado de Carlson et al., 2011).

### 3.3.3. Deposição dos sedimentos

Segundo Colby (1963), por apresentarem densidade maior que a do fluido, as partículas de sedimento tendem a sofrer sedimentação, a taxas que dependem da densidade da partícula, da viscosidade da água e do tamanho, formato e floculação das mesmas. Assim, apesar da existência de correntes de fluxo que tendem a mover as

partículas para superfície, as mesmas apresentam, de maneira geral, um movimento em direção ao leito do canal fluvial.

Bordas e Semmelmann (2007) fazem uma distinção entre três termos relacionados a esta fase final do ciclo sedimentológico: decantação, deposição e consolidação. Decantação (ou sedimentação) refere-se à ação da gravidade sobre as partículas levando-as a reestabelecer contato com o leito, mas ao mesmo tempo sofrendo resistência do meio fluido durante a queda. A deposição ocorre quando uma partícula recém-decantada ou uma partícula transportada por arraste encontra-se totalmente parada sobre o leito. Finalmente, a consolidação designa o acúmulo e a compactação dos depósitos devido ao próprio peso dos sedimentos, à ação da pressão hidrostática ou ainda outros fenômenos que provoquem o aumento da densidade.

### **3.4. Distribuição dos sedimentos em um curso de água**

#### ***3.4.1. Distribuição de sedimentos ao longo da vertical***

Como descrito pelo Subcommittee on Sedimentation (1948), em um fluxo turbulento, as direções de corrente mudam rápida e aleatoriamente, deste modo, apesar de o fluxo apresentar uma direção principal, ocorrem flutuações tanto verticais quanto horizontais movimentando a carga sólida em suspensão para cima e para baixo ao longo das seções verticais. Além das forças de corrente, a gravidade também atua sobre as partículas em suspensão. Assim, sob a ação combinada das forças do escoamento e da gravidade, se uma partícula sofre a ação de uma corrente que se move para cima no fluido com uma velocidade maior do que a sua velocidade de queda, a mesma tenderá a subir, permanecendo em suspensão; entretanto, se a partícula está sob influência de uma corrente que apresenta sentido para baixo ao longo da seção vertical ou a velocidade da corrente que se move para cima é inferior à sua velocidade de queda, a mesma sofrerá deposição. Observa-se então que a distribuição das partículas ao longo de uma vertical é função do grau de turbulência do fluxo e da velocidade de queda das partículas (granulometria). A velocidade de queda das partículas tende a elevar-se com o aumento do tamanho das mesmas, no entanto, esta variação não é uniforme. Para partículas com diâmetros inferiores a 0,062 mm (aproximadamente o diâmetro que divide as classes silte e argila), a velocidade de queda varia de maneira diretamente proporcional ao quadrado do diâmetro da partícula; para partículas de areia grossa, a variação é

proporcional à raiz quadrada do diâmetro; já para partículas com diâmetros intermediários, a variação ocorre proporcionalmente dentro desta faixa de valores (SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION, 1948).

Para as partículas mais finas, que apresentam peso pequeno e, portanto, pouca ação da força da gravidade, a distribuição ao longo da vertical é praticamente uniforme. Já para as partículas maiores, a concentração aumenta da superfície para o fundo do canal (caso a distribuição da velocidade seja igual a apresentada na Figura 3) pois estas tendem a sedimentar mais rapidamente. Ainda, segundo o Subcommittee on Sedimentation (1948), este padrão de distribuição da concentração de sedimentos tem sido encontrado em praticamente todas as observações de sedimento conhecidas.

### ***3.4.2. Distribuição de sedimentos na seção transversal***

A distribuição de sedimentos ao longo de uma seção transversal é variável tanto da direção vertical quanto na direção horizontal, sendo dependente da velocidade da corrente e da disponibilidade e granulometria dos sedimentos (CARVALHO, 2008). Por conseguinte, para analisar a descarga sólida que atravessa uma seção transversal qualquer, é necessário o entendimento sobre a distribuição da velocidade da corrente ao longo desta seção. Como descrito pelo Subcommittee on Sedimentation (1948; 1963), a velocidade de fluxo em um canal cresce das margens para o centro e do leito para a superfície, sendo a maior velocidade encontrada ao longo do talvegue e logo abaixo da superfície. Quanto à concentração de sedimentos, a mesma apresenta-se mais elevada próxima do leito do canal, o que pode ser explicado pelo fato de que, com o decréscimo da velocidade, a força peso das partículas se sobressai, ocasionando a queda das partículas ao longo da vertical.

Como resultado, a descarga sólida na seção transversal apresenta uma distribuição convexa, crescendo da superfície para o leito do canal. A Figura 3 apresenta a distribuição destes três elementos ao longo de uma seção transversal de um canal. A magnitude dos mesmos em diversos pontos é indicada pelas setas normais à seção transversal ABCDEF.



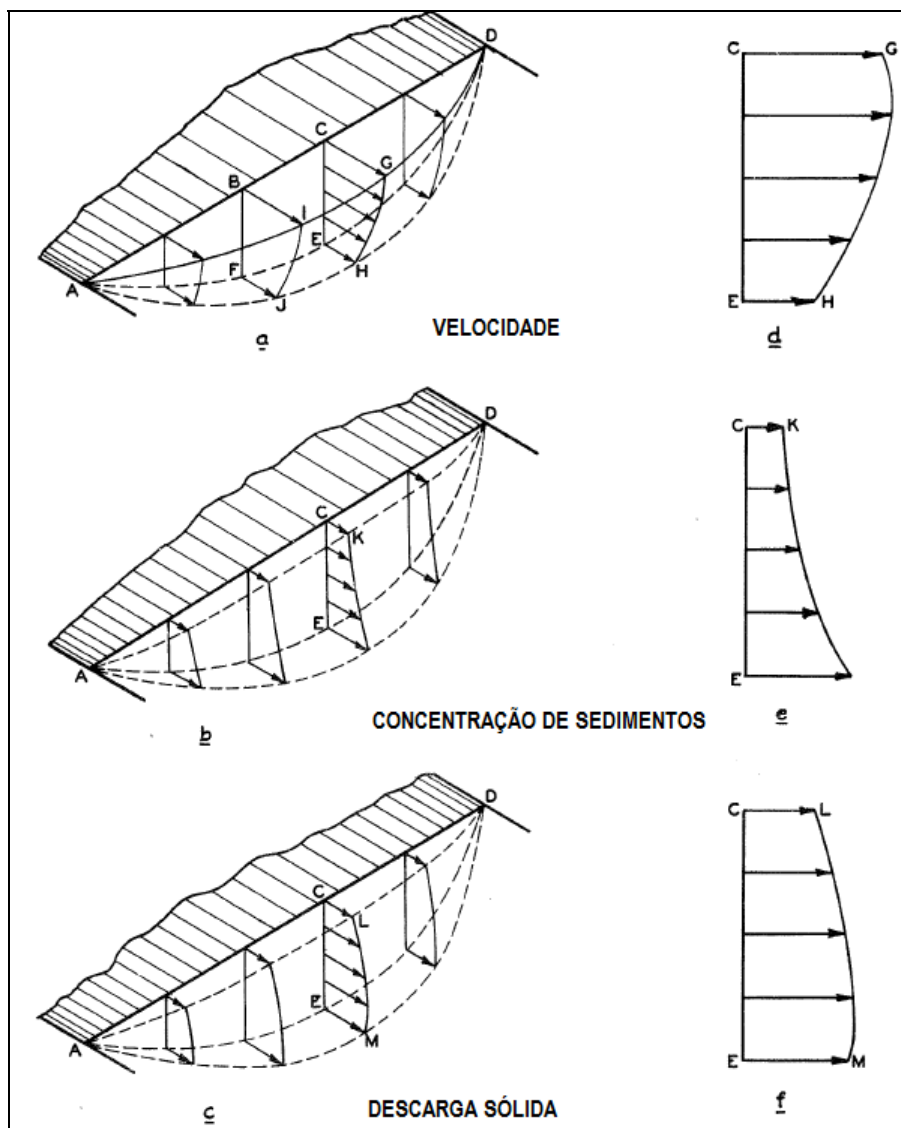


Figura 3. Distribuição da velocidade de corrente, concentração de sedimentos e descarga sólida ao longo de uma seção transversal (Adaptado de SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION, 1948; 1963)

### 3.4.3. Distribuição de sedimentos ao longo do curso de água

De maneira geral, uma bacia hidrográfica pode ser dividida em três zonas principais segundo a ocorrência de processos modificadores dos sedimentos: zona superior, onde ocorrem principalmente erosão e produção de sedimentos; zona intermediária, caracterizada pelo transporte de sedimentos, com erosão e deposição simultâneas; e zona terminal, marcada pela ocorrência de deposição (Figura 4). Ressalta-se que, na realidade, a forma de ocorrência destes processos é muito mais complexa visto que condições geológicas locais ou outros fatores podem produzir pontos de deposição na zona superior e/ou pontos de erosão na zona inferior (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1994). O comportamento de uma bacia hidrográfica em relação aos

sedimentos é dependente de diversos fatores, incluindo as características das rochas e dos solos, a cobertura vegetal, as declividades e o regime de chuvas da região (CARVALHO, 2008).

Como consequência desta divisão, observa-se que as nascentes dos rios são constituídas por sedimentos de maior dimensão, como pedras, pedregulhos e seixos; à medida que são transportados ao longo do curso de água, estes materiais sofrem fragmentação sendo transformados em sedimentos de menor granulometria (CARVALHO, 2008).

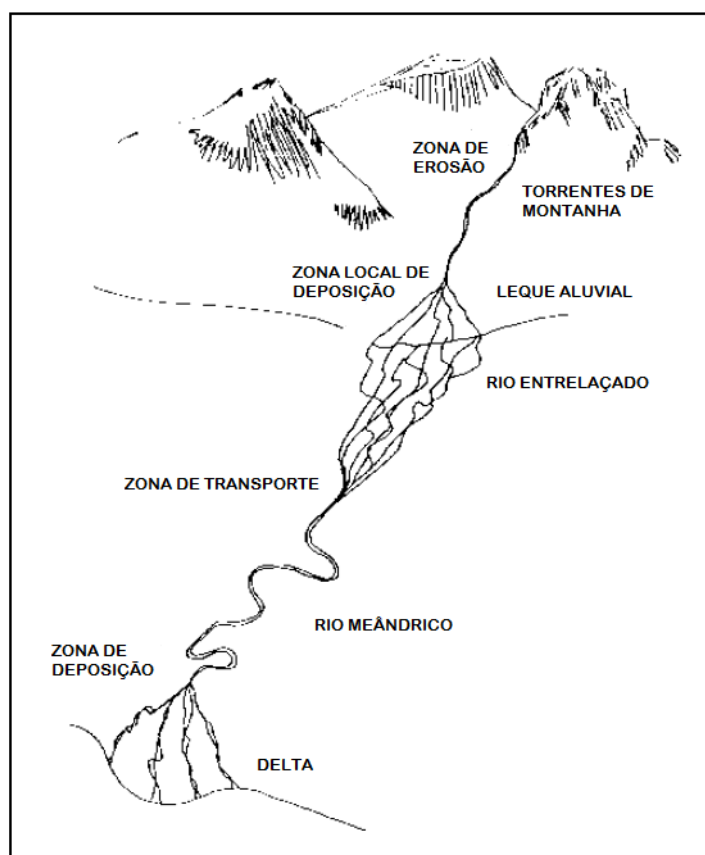


Figura 4. Divisão da bacia hidrográfica de acordo com a ocorrência dos fenômenos de erosão, transporte e deposição de sedimentos fluviais (Adaptado de US Army Corps of Engineers, 1994).

### 3.5. Avaliação do transporte de sedimentos em suspensão

A medição do transporte de sedimentos pode ser realizada basicamente de duas maneiras: medição direta (*in situ*) e medição indireta. Em uma medição indireta, realiza-se a coleta de uma ou mais amostras da mistura de água e sedimentos e a concentração de sedimentos é determinada posteriormente através de análise laboratorial; no caso de

medições diretas, a concentração de sedimentos pode ser determinada instantaneamente através da utilização de equipamentos nucleares, ultrassônicos, e *a laser*, quando não é necessária a coleta de uma amostra física, ou com a utilização da Garrafa Delft, para amostragem do sedimento grosso do leito em suspensão (CARVALHO, 2008).

A seguir serão descritos brevemente os métodos para amostragem da descarga sólida em suspensão, objeto de estudo do presente trabalho.

### 3.5.1. Descarga sólida em suspensão

A medição da descarga sólida em suspensão é utilizada para determinar a quantidade de material transportado ao longo da seção transversal e sua respectiva granulometria, sendo considerada a principal etapa da medição do transporte de sedimentos em uma investigação (SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION, 1948).

Como visto anteriormente, a distribuição de sedimentos em uma seção não é uniforme, portanto, deve-se considerar a variação da concentração para realização de amostragens. A amostra recolhida deve ser representativa da concentração de sedimentos e sua distribuição granulométrica (CARVALHO, 2008).

As principais metodologias para a amostragem da descarga sólida em suspensão estão resumidas a seguir no Quadro 1, de acordo com Carvalho et al. (2000a):

Quadro 1. Métodos de medição da descarga sólida em suspensão (Carvalho et al. 2000a).

<b>Medição</b>	<b>Descrição</b>	<b>Equipamentos ou metodologia</b>
<b>Direta</b>	Equipamentos que medem diretamente no curso de água a concentração ou outra grandeza, como turbidez ou ultrassom.	Medidor nuclear, ultrassônico ótico, ultrassônico Doppler de dispersão, turbidímetro e perfilador acústico de correntes por efeito Doppler.
	Acumulação do sedimento em um medidor.	Garrafa Delft.
<b>Indireta</b>	Coleta de sedimento por amostragem da mistura água-sedimento, análise de concentração e granulometria e cálculos posteriores da descarga sólida.	Equipamentos de bombeamento e equipamentos que utilizam garrafas ou sacas.

	Uso de fotos de satélite e comparação com medidas simultâneas de campo para calibração, em grandes rios.	São estabelecidas equações que correlacionam as grandezas observadas com as concentrações medidas.
--	--	--

Os métodos de medição de sedimentos em suspensão em uma vertical estão intimamente relacionados com o tipo de amostrador utilizado (YANG, 2003), sendo que a amostragem pode ser pontual ou ser realizada por integração na vertical. No caso de medição indireta, podem ser utilizados o método pontual ou integração na vertical, no caso de medição direta, apenas amostragens pontuais são realizadas (CARVALHO, 2008). Ainda segundo o autor, a amostragem pontual é realizada visando definir a distribuição vertical da concentração de sedimentos na posição de coleta, podendo ser realizada de maneira instantânea (em poucos segundos) ou por integração, quando a amostragem leva mais de 10 segundos. A amostragem por integração na vertical é geralmente realizada nos dois sentidos (subida e descida), com uma velocidade constante.

No Brasil, as amostragens realizadas pela ANA utilizam dois métodos, ambos por integração na vertical: coleta por igual incremento de largura (IIL) e coleta por igual incremento de descarga (IID), representados nas Figuras 5 e 6, respectivamente.

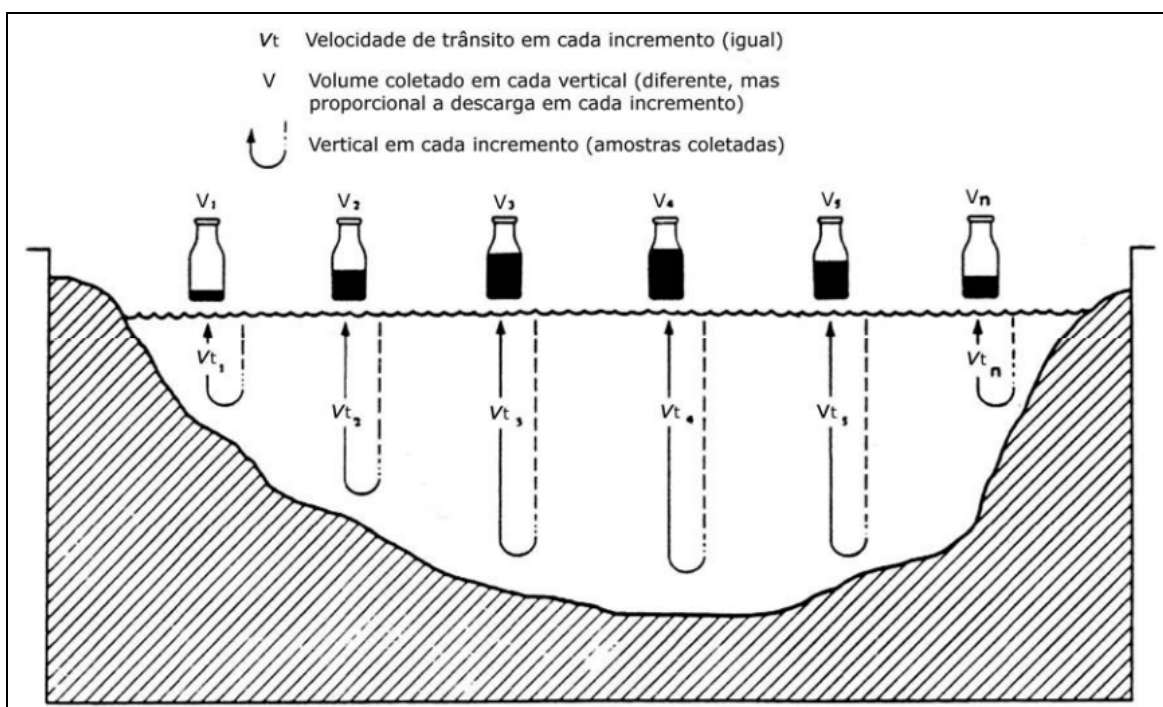


Figura 5. Amostragem de sedimentos pelo método de igual incremento de largura (IIL) (Adaptado de Edwards e Glysson, 1999 por Carvalho, 2008).

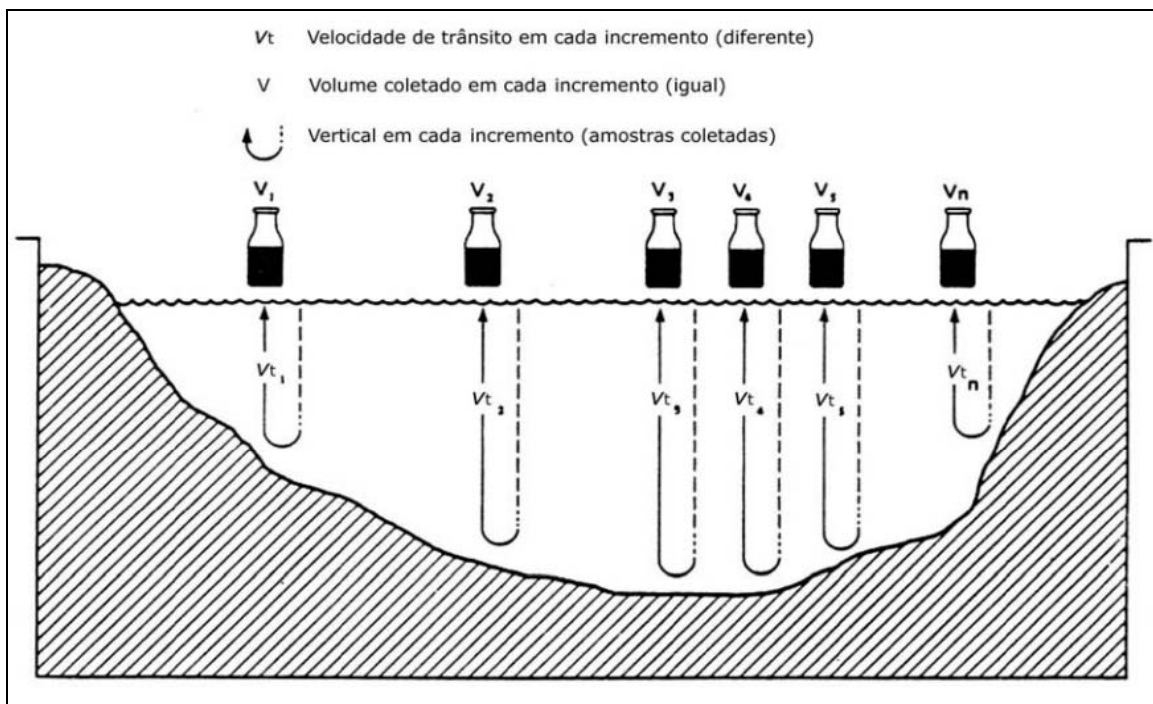


Figura 6. Amostragem de sedimentos pelo método de igual incremento de descarga (IID) (Adaptado de Edwards e Glysson, 1999 por Carvalho, 2008).

No primeiro método, a seção transversal é dividida em um número ímpar de verticais em iguais distâncias, já no segundo, a partir do conhecimento prévio da distribuição de velocidade na vertical e da vazão na seção transversal, a mesma é dividida em subseções de igual vazão e a amostra é obtida na posição do centroide do segmento (CARVALHO, 2008). Em ambos os casos, as diversas subamostras podem ser reunidas em uma amostra única, facilitando as análises de concentração e granulometria a serem realizadas em laboratório.

Uma das principais fontes de erro entre os métodos de amostragem da descarga sólida em suspensão está na existência de uma zona não amostrada, próxima do leito, devido às limitações dos equipamentos (CARVALHO, 2008).

### 3.6.A curva-chave de sedimentos

Segundo Asselman (2000), uma curva-chave de sedimentos é uma equação empírica que descreve a relação entre a vazão e a concentração de sedimentos em suspensão ou a descarga sólida em suspensão. Sua forma mais usual é uma função

potência conforme mostra a Equação 1 (ASSELMAN, 2000; MORRIS et al., 2008; WARRICK, 2014). Esta relação pode ser obtida através de um traçado visual ou via regressão linear.

$$C_{ss} = aQ^b \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde,

$C_{ss}$  = concentração de sedimentos em suspensão ( $\text{mg.l}^{-1}$ );

$Q$  = vazão ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ );

$a$  e  $b$  coeficientes de regressão específicos para cada seção de monitoramento.

Neste formato, a curva-chave é capaz de abranger tanto o efeito do aumento de capacidade de transporte na ocorrência de altas vazões, quanto as novas fontes de sedimento que se tornam disponíveis na ocorrência de altas vazões (ASSELMAN, 2000).

Uma alternativa muito utilizada para se obter curvas-chave com maiores coeficientes de correlação, consiste no traçado das mesmas entre a vazão e a descarga sólida, no lugar da concentração como mostra a Equação 2 (SYVITSKI et al., 2000; HASSAN, 2014; TRAN, 2014):

$$Q_{ss} = cQ^{b+1} \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde  $Q_{ss}$  é a descarga sólida em suspensão, a qual pode ser calculada através da simples multiplicação entre a vazão e a concentração de sedimentos em suspensão para amostragens realizadas por IIL e IID. Nesta equação, o coeficiente linear é representado pela letra  $c$ ; o coeficiente angular da reta, no entanto, é o valor do coeficiente  $b$ , encontrado através da Equação 1, acrescido de uma unidade, devido à presença do termo da vazão em ambos os lados da equação.

Por ser um produto da vazão e da concentração, no entanto, muitos autores afirmam que a utilização da descarga sólida tende a criar resultados tendenciosos, devido a presença da vazão tanto na variável dependente quanto na variável independente e a consequente qualidade da correlação encontrada.

Glysson (1987) destaca que o traçado da curva-chave de sedimentos pode ser influenciado por diversos fenômenos, tais como, erosão, variação sazonal, tempo entre o pique da concentração de sedimentos e o pique da vazão e eventos extremos de enchentes. Desta maneira, é importante realizar uma análise gráfica anteriormente a realização da regressão linear, verificando se os pontos amostrados permitem o traçado de mais de uma curva-chave, principalmente para os casos de vazões mais altas (CARVALHO, 2008; MORRIS, 2008).

Asselman (2000), analisando diversos estudos sobre as limitações da aplicação de curvas-chave, destacou que a descarga sólida de um rio tende a ser subestimada quando as concentrações são estimadas a partir da descarga líquida utilizando o método de regressão linear. A dispersão ao redor da linha de regressão ocorre devido a diversos fatores que não são considerados pela curva-chave, como por exemplo, efeitos sazonais, condições anteriores da bacia hidrográfica e as diferenças na disponibilidade de sedimentos no início ou no fim de uma cheia. Segundo Morris (2008), a confiabilidade de descargas sólidas calculadas através de curvas-chave depende de diversos fatores: faixa de vazões para as quais as amostragens foram realizadas, a quantidade e a confiabilidade dos dados utilizados para determinar a curva, e a representatividade das descargas sólidas e líquidas para o período em estudo.

O uso de curvas-chave para o cálculo da descarga sólida se faz necessário quando estão disponíveis somente dados diários de vazão e não da concentração de sedimentos, permitindo uma estimativa dos dados diários de sedimento e da descarga sólida média anual (CARVALHO, 2008). A principal motivação para o uso das mesmas em larga escala consiste nos problemas relacionados a lacunas nos dados sedimentométricos e a ausência de tecnologias que permitam a realização de medições contínuas da concentração de sedimentos (KHANCHOUL et al., 2009).

### ***3.6.1. Deflúvio sólido médio e descarga sólida específica***

A partir da utilização das curvas-chave de sedimentos pode-se obter o deflúvio sólido médio de um ano ou de um intervalo de tempo qualquer, para os quais não estão disponíveis amostragens diárias. Segundo Carvalho (2008), este é um dos parâmetros mais importantes na realização de estudos sedimentológicos. Ainda segundo o autor, o método mais utilizado e preciso para a obtenção do deflúvio sólido médio consiste na

utilização da curva de permanência do curso de água, desta maneira, aplica-se a curva-chave de sedimentos para todos os intervalos de vazão.

O valor do deflúvio sólido médio anual pode ser dividido pela área de drenagem de cada estação sedimentométrica em estudo, gerando a descarga sólida específica média anual em  $t.an^{-1}.km^{-2}$ .

### 3.7.Modificações fluviais introduzidas por barragens

“A construção de uma barragem em um canal fluvial no qual um fluxo estável ocorre há um longo período de tempo causa uma alteração no regime de fluxo e uma perturbação da estabilidade” (SENTÜRK, 1994, p.601). Segundo o autor, pode-se considerar como fluxo estável aquele em que a totalidade da carga sólida que passa por uma seção a montante é transferida para a próxima seção a jusante e a topografia do leito não sofre modificações.

Assim, a introdução de barramentos em curso de água altera o regime de fluxo, pois quase sempre provoca a transformação de um sistema lótico, caracterizado por correntezas, em um sistema lêntico, com águas semi-paradas, devido à formação de um reservatório (COELHO, 2008).

Segundo Siqueira et al. (2013) as modificações no regime de fluxo e no transporte de sedimentos ocasionadas pela implantação de barramentos nos canais fluviais incluem alterações na descarga líquida e na descarga sólida, modificações nos padrões de erosão e deposição existentes nos canais e o desencadeamento de um ajuste do rio, buscando estabelecer um novo equilíbrio entre o canal e as descargas sólidas, como resposta às mudanças introduzidas.

Lane (1955) desenvolveu uma relação que permite analisar qualitativamente as mudanças que ocorrem nos canais fluviais, a qual expressa o equilíbrio entre os principais parâmetros que modificam um curso de água (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1994) e pode ser escrita como segue (Equação 3):

$$Q \times I = Q_{ss} \times D_{50} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde,

$Q$  = descarga líquida ( $m^3.s^{-1}$ );

$I$  = declividade do canal ( $m.m^{-1}$ );



$Q_{ss}$  = descarga sólida (toneladas.dia<sup>-1</sup>);

$D_{50}$  = diâmetro médio das partículas (m).

Seguindo a formulação de Lane, a inserção de uma barragem em um canal fluvial pode alterar estes parâmetros, causando um desequilíbrio. Em alguns casos, como sugerido por Morris e Fan (1998), a redução da descarga sólida e/ou da granulometria dos sedimentos ocasionada pela presença do barramento, pode ser compensada até certo ponto se houver uma redução da descarga líquida (MORRIS; FAN, 1998).

De acordo com Brandt (2000, p.376),

“A relação entre a capacidade de transporte do fluxo e a carga de sedimentos liberada pelo reservatório, juntamente com a relação entre a erosividade do fluxo e erodibilidade das margens do canal, irão determinar as mudanças que, em longo prazo, conduziram às novas condições de estabilidade”.

### **3.7.1. Modificações fluviais a jusante de barragens**

#### **3.7.1.1. Descarga líquida**

Os padrões de descarga líquida de um curso de água podem ser substancialmente afetados pela implantação de um barramento (WILLIAMS E WOLMAN, 1984; BRANDT, 2000; CHILDS, 2010). A vazão média diária pode aumentar, permanecer igual ou reduzir dependendo da finalidade do barramento, a distribuição de vazões, no entanto, será diferente daquela original (WILLIAMS E WOLMAN, 1984).

Geralmente, as alterações nos fluxos resultam em uma redução dos picos de cheia e uma elevação das vazões baixas (WILLIAMS E WOLMAN, 1984; BRANDT, 2000; GRAF, 2006; MCCARTNEY, 2009). Uma exceção ocorre para eventos de cheia, os quais somente grandes barragens desenvolvidas para regularização do fluxo são capazes de amortecer (BRANDT, 2000). Maggilian e Nislow (2005), afirmam que é difícil estabelecer generalizações para estas alterações, devido à grande diversidade de tipos de barragens, à existência de características específicas para cada local e à escassa quantidade de dados existentes para os períodos pré-barragem.

### 3.7.1.2. Descarga sólida

Além das modificações ocasionadas no padrão de descarga líquida dos rios, as barragens ocasionam uma redução no aporte de sedimentos para jusante, podendo ocasionar modificações significativas no canal (WILLIAMS E WOLMAN, 1984). Devido à redução das velocidades de escoamento, partículas com maiores velocidades de queda acabam depositando ao longo do reservatório, além disto, a própria barragem atua como uma barreira física, impedindo a passagem dos sedimentos presentes no fluxo. A severa redução do aporte de sedimentos a jusante do reservatório pode ocasionar degradação do leito, acelerar os processos de desestabilização dos taludes marginais e aumentar as taxas de abrasão em estruturas como pontes (MORRIS e FAN, 1997).

Williams e Wolman (1984) apresentaram diversos casos que retratam as modificações no aporte de sedimentos a jusante após a implantação de barragens nos Estados Unidos, os quais serão descritos brevemente a seguir. Para a barragem Glen Canyon no rio Colorado, foram realizadas medições em uma estação de monitoramento 150 km a jusante do barramento; no período anterior a implantação do mesmo (1926 - 1962) a média da concentração de sedimentos encontrada foi de 126 milhões de toneladas, logo após, esta concentração cai para aproximadamente 17 milhões de toneladas. No caso da barragem Garrison no rio Missouri, as medições foram realizadas a 121 km a jusante da mesma: no período anterior a implantação do barramento (1949 - 1952), a concentração encontrada foi em média 48,6 milhões de toneladas, em 1953 ocorreu o enchimento do reservatório. Já em 1955 a concentração de sedimentos era em média 9,8 milhões de toneladas e em 1959 caiu para 5,3 milhões de toneladas. A barragem de Gavins Point, também no rio Missouri, iniciou suas atividades em 1955, anteriormente a esta data, a concentração de sedimentos a 7 km do local da sua instalação era cerca de 121 milhões de toneladas. Ainda durante 1955, esta concentração foi reduzida para 8,1 milhões de toneladas e em 1960 chegou a apenas 1,5 milhões de toneladas. No entanto, ressalta-se que estas medições podem não representar a eficiência real de retenção dos reservatórios, já que foram realizadas em estações localizadas a uma certa distância dos mesmos. A concentração pode então ser influenciada pela entrada de tributários, erosão do leito e das margens e vários outros fatores (Howard e Dolan, 1981 apud Williams e Wolman, 1984).

Segundo Siqueira et al. (2013), a retenção de sedimentos no reservatório faz com que a água que escoar para jusante apresente concentrações de sedimentos extremamente reduzidas. Como consequência disto, esta água apresenta elevada capacidade de erosão, sendo chamada de “água faminta” (*hungry water*). A ação desta água sobre o canal origina uma zona onde ocorre a erosão das margens e aprofundamento do canal visando à reposição dos sedimentos retidos; esta área é chamada de zona degradada e pode se estender por centenas de quilômetros ao longo do canal. Existem dois principais fatores que influem na extensão da área degradada à jusante da barragem, são eles: a presença de sedimentos no leito e nas margens do canal e a chegada de tributários ao canal (WILLIAMS E WOLMAN, 1994). Os autores observaram que, na região de Oklahoma nos Estados Unidos, amostragens, realizadas antes e após a implantação da barragem Canton em 1948, fornecem uma estimativa da extensão da zona degradada. A montante do barramento, as concentrações permaneceram as mesmas; mas a 5 e 140 km a jusante, a redução das concentrações é extremamente visível; a 182 km pode-se observar sinais de recuperação do equilíbrio do canal, com as concentrações voltando a se aproximar das originais. Somente a 499 km a jusante da barragem, as concentrações observadas foram iguais e/ou superiores às condições encontradas antes da implantação da mesma. Assim, conclui-se que a extensão da área degradada ao longo do curso de água poderia ser estimada como estando entre 182 e 499 km a jusante do barramento.

### 3.7.1.3. Extensão e duração das modificações a jusante

Segundo Brandt (2000), as alterações nos padrões de descarga líquida e sólida podem ser observadas já no estágio inicial da construção de um barramento. Williams e Wolman (1984), no entanto, destacam que os efeitos completos não serão atingidos até o fechamento total do mesmo.

Análises sugerem que modificações e ajustes dos canais ocorrem rapidamente após o fechamento da barragem. Williams e Wolman (1984) analisaram o grau de degradação de 111 seções transversais de diversos rios dos Estados Unidos. Para a maioria dos rios, a degradação (modificação da profundidade do canal) atingiu metade do seu valor total em sete anos, variando entre 0,4 e 340 anos. Brandt (2000) destaca que a degradação não é constante ao longo do tempo, podendo ser intercalada com eventos de agradação ou bruscamente interrompida caso o leito rochoso seja atingido ou caso haja o desenvolvimento do efeito de formação de carapaça (“*armouring*”).

De acordo com Williams e Wolman (1984), podem ser necessários centenas de quilômetros de distância a jusante do barramento para que o rio recupere o deflúvio anual de sedimentos através da contribuição de afluentes e erosão do seu leito. A extensão da zona de ajuste do canal a jusante do barramento é definida pela interação entre os fatores definidos por Lane (1955): as descargas líquida e sólida, granulometria do material do leito e declividade do canal, aliados a outras influências, como encouraçamento do canal, entrada de tributários, presença de vegetação, entre outros (MORRIS; FAN, 1998). Segundo Brandt (2000), nos casos em que a implantação do barramento ocasiona erosão do canal a jusante do mesmo, pelo menos em uma fase inicial, ocorre uma maior recuperação de sedimentos pelo fluxo logo a jusante do barramento com um deslocamento progressivo ao longo do canal em direção de jusante.

### **3.8. Assoreamento de reservatórios**

Como citado por Di Silvio (1994), em um reservatório, do ponto de vista sedimentológico, o processo dominante é a sedimentação, visto que as pequenas velocidades de corrente impedem a ocorrência das forças de arrasto e a ressuspensão das partículas para o fluxo d'água. Assim que um fluxo transportando sedimentos, em sua capacidade de transporte completa, se aproxima de um lago ou reservatório e sua velocidade começa a reduzir, mesmo que ligeiramente, os sedimentos de maior granulometria sofrem deposição; a redução da velocidade do fluxo continua à medida que o mesmo adentra o lago ou reservatório, mesmo as partículas mais finas passam a serem depositadas (COLBY, 1963). Segundo o autor, pode-se determinar a região do canal onde o fluxo começa a perder a sua capacidade de transporte (devido à redução das velocidades) através do cálculo da extremidade de montante da curva de remanso.

A deposição e a disposição dos sedimentos ao longo de um reservatório são influenciadas por diversos fatores, incluindo, entre outros, geometria do lago, topografia da área, sinuosidade do curso de água, drenagem, presença de tributários, formas de operação do reservatório, granulometria dos sedimentos, vazão afluente e sua velocidade no interior do lago (CARVALHO, 2008).

Os sedimentos depositados devido à presença do reservatório e as alterações provocadas pelo mesmo não se distribuem uniformemente no seu interior, formando diferentes tipos de depósito (CARVALHO et al., 2000b):

- Depósitos de remanso: são formados pela deposição de sedimentos na área a montante do reservatório. De acordo com Sentürk (1994), este tipo de depósito pode ser responsável por diversos efeitos: (1) efeitos locais, aqueles que ocorrem no exterior do reservatório e incluem a agradação do leito do canal, redução do canal de navegação e aumento das vazões de cheia; (2) efeitos a montante, como mudanças nos níveis de base de canais tributários e ocorrência de deposição nas áreas de confluência dos mesmos, além de agradação, que pode alterar o alinhamento do canal principal; e (3) efeitos no reservatório, como o enchimento gradual do mesmo e o crescimento de plantas nos sedimentos depositados.
- Depósitos no interior do reservatório: são divididos em delta, depósito de margem e depósito de fundo. Estes depósitos são responsáveis pela redução da capacidade de armazenamento do reservatório, sendo que os depósitos de delta reduzem a capacidade útil e os depósitos de fundo são responsáveis pela redução do volume morto (CARVALHO, 2008).
- Depósitos de várzea: também chamados de depósitos de planície de inundação, são ocasionados pela ocorrência de enchentes e são formados por sedimentos finos e grossos (CARVALHO et al. 2000b, CARVALHO, 2008).

Carvalho et al. (2000b, p.11) destacam que,

“À medida que o assoreamento cresce, a capacidade de armazenamento do reservatório diminui, a influência do remanso aumenta para montante, as velocidades no lago aumentam e maior quantidade de sedimentos passa a escoar para jusante, diminuindo a eficiência de retenção das partículas.”

Além destes efeitos, pode-se citar como malefícios do assoreamento a abrasão provocada às estruturas pelos sedimentos que alcançam a barragem e passam pelo vertedouros e estruturas; possíveis efeitos danosos à estrutura da barragem causados pelos depósitos que alcançam alturas significativas próximo da mesma, e reflexos nas condições ecológicas locais causados por modificações da flora e da fauna.

De acordo com Kummu e Varis (2007), 1% do volume de armazenamento dos reservatórios do mundo é perdido anualmente devido ao assoreamento.

### 3.8.1. Eficiência de retenção de reservatórios

A eficiência de liberação de um reservatório pode ser definida como a razão entre a quantidade de sedimento liberada e o fluxo total de sedimento afluente no reservatório em um determinado período de tempo (Equação 4), ou seja, é o complemento da eficiência de retenção (MORRIS e FAN, 1998):

$$\text{Eficiência de liberação} = 1 - \text{Eficiência de retenção} \quad (\text{Equação 4})$$

São dois os métodos mais utilizados para a estimativa da retenção de sedimentos em reservatórios: o método de Brune (1953) e o método de Churchill (1948) (MORRIS e FAN, 1998; CARVALHO, 2008; MORRIS, 2008). Ambos utilizam a razão entre a quantidade de sedimento e o volume afluente ao reservatório.

#### 3.8.1.1. Método de Brune

Baseado em dados observados em reservatórios do sudoeste dos Estados Unidos, Brune (1953) desenvolveu uma relação empírica entre a capacidade de afluência (Equação 5) e a eficiência de retenção a longo prazo (MORRIS e FAN, 1998; MORRIS, 2008).

$$C_{afl} = \frac{V_{res}}{V_{afl}}$$

(Equação 5)

Onde,

$C_{afl}$  = capacidade de afluência (adimensional);

$V_{res}$  = volume do reservatório (m<sup>3</sup>);

$V_{alf}$  = volume médio anual afluente ao reservatório (m<sup>3</sup>).

Como explicado por Carvalho (2008), o método é apresentado por um gráfico de curvas (Figura 7), sendo que no eixo das abscissas temos a capacidade de afluência e no eixo das ordenadas a eficiência de retenção.

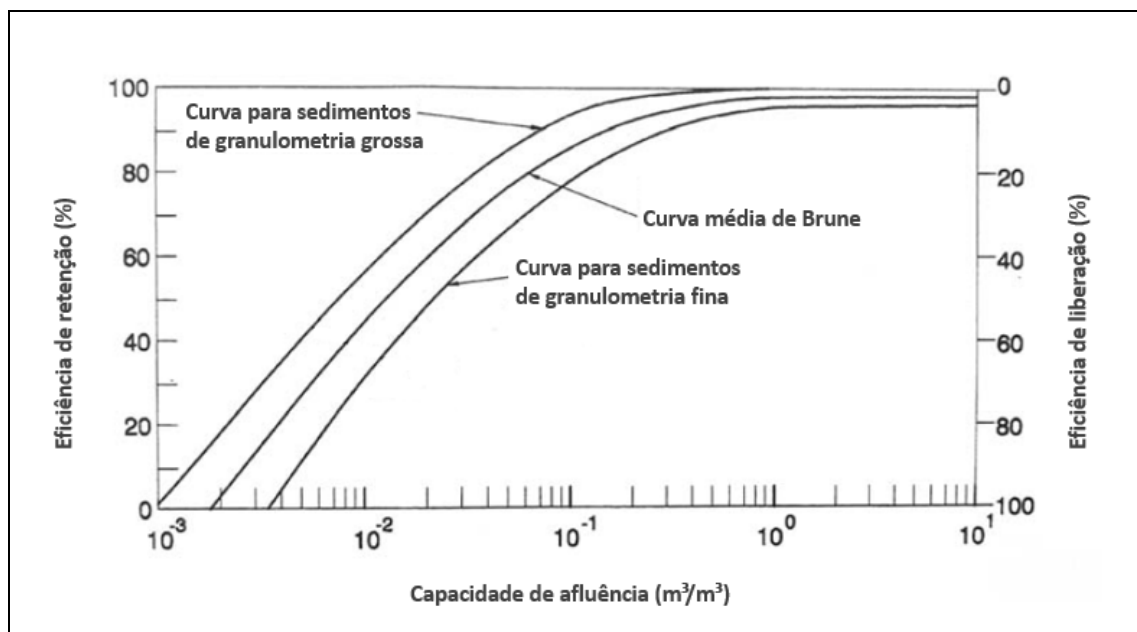


Figura 7. Curvas de Brune para estimar a eficiência de retenção (ou de liberação) de sedimentos em reservatórios (Adaptado de Morris e Fan, 1998, p.10.27)

Conforme apresentado por Morris e Fan (1998), são três as curvas de Brune: uma superior, utilizada para partículas floculadas e sedimentos grossos; uma inferior, utilizada para sedimentos finos, e uma curva média, aplicada aos casos em que não se tem informação sobre a granulometria dos sedimentos.

Segundo Carvalho (2008), o método de Brune é o mais utilizado no país para estimar a eficiência de retenção de médios e grandes reservatórios.

#### 3.8.1.2. Método de Churchill

Churchill (1948) por sua vez, desenvolveu um método que utiliza o volume do reservatório, o comprimento do mesmo e o volume afluente durante o intervalo de tempo em estudo para estimar a quantidade de sedimento que passa para jusante do reservatório; este método é mais indicado para a análise de eventos específicos (MORRIS, 2008).

Para aplicação do método de Churchill, calcula-se o Índice de Sedimentação do reservatório (Equação 6), e partir do mesmo obtém-se o valor da quantidade de sedimento que passa pelo reservatório na curva de Churchill (Figura 8).

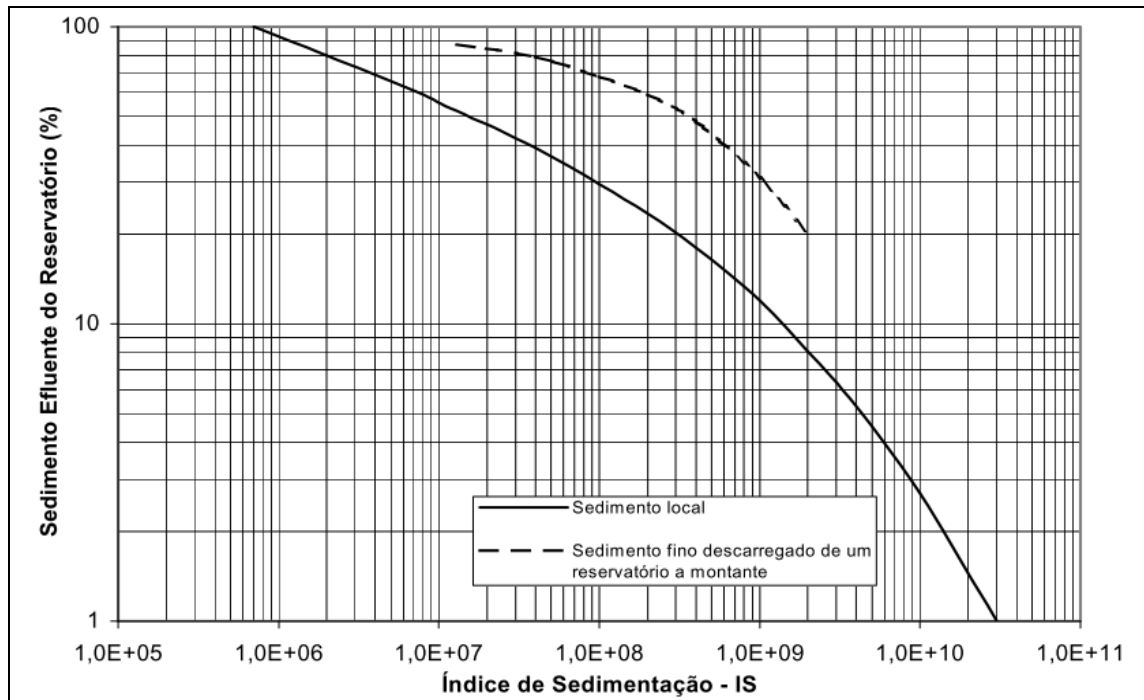


Figura 8. Curva de retenção de sedimentos por Churchill, versão apresentada por Annandale (1987).  
(Fonte: Carvalho, 2008).

$$IS = \frac{V_{res}^2}{Q^2 L}$$

(Equação 6)

Onde,

IS = índice de sedimentação do reservatório ( $s^2.m^{-1}$ );

$V_{res}$  = volume do reservatório operando em seu nível médio ( $m^3$ );

Q = vazão afluente média diária ( $m^3.s^{-1}$ );

L = comprimento do reservatório (m).



## 4. Metodologia

### 4.1. Definição e caracterização das áreas de estudo

Para o estudo das possíveis modificações no aporte de sedimentos em suspensão a jusante de barramentos no Brasil, realizou-se uma análise da localização das estações sedimentométricas disponíveis utilizando-se a base de dados e mapas do Sistema Nacional de Informações sobre os Recursos Hídricos (SNIRH). Buscou-se por estações sedimentométricas que estivessem localizadas a jusante de barramentos e que apresentassem dados (fluviométricos e sedimentométricos) disponíveis nos períodos anterior e posterior à implantação dos mesmos.

Após esta análise, foram selecionadas 10 estações que atendiam aos requisitos anteriores, são elas: Peixe Gordo, Porto Velho, Peixe, Miracema do Tocantins, Pontes e Lacerda, Colatina, Porto FAE Novo, Iraí, Dona Francisca e Muçum. Por conseguinte, a área de estudo pode ser subdividida de acordo com a localização de cada associação estação - barramento em estudo. As áreas estão localizadas nos estados Ceará, Rondônia, Tocantins, Mato Grosso, Espírito Santo, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, contemplando as cinco regiões do país (Figura 9) e serão apresentadas individualmente a seguir.

#### 4.1.1. Estação Peixe Gordo

A estação Peixe Gordo localiza-se no município de Tabuleiro do Norte – CE (5°13'39'' S e 38°11'52'' O). A estação possui uma área de drenagem de 39600 km<sup>2</sup>, contemplando grande parte da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe. Nesta área de estudo, região hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental, há predominância de um clima semiárido quente, com chuvas escassas e irregulares; características que levam à predominância de solos rasos (rochas cristalinas com afloramentos) e uma vegetação majoritariamente identificada como caatinga, mas onde também verificam-se carnaubais ao longo das várzeas dos rios (BRASIL, 2006a).

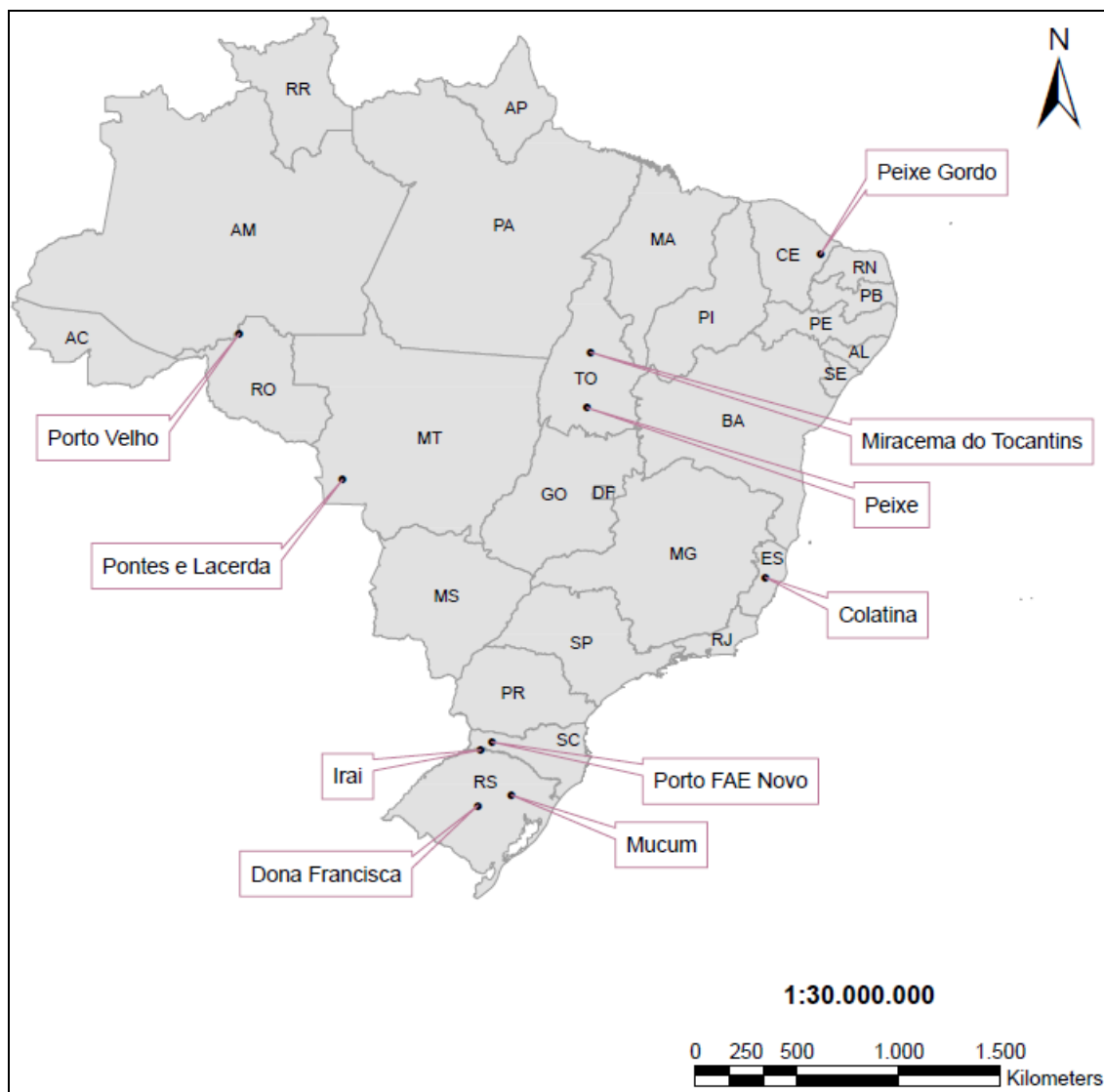


Figura 9. Localização das áreas de estudo – estações sedimentométricas e barramentos – ao redor do Brasil.

A aproximadamente 55 km de distância à montante da estação, está localizado o Açude Castanhão (Figura 10), um reservatório construído em 2002 visando permitir a irrigação e o abastecimento de água para a população local, mesmo em anos de precipitação reduzida, além de proteger contra inundações (CÂMARA E FROTA, s.d.). Além deste, existem mais de 70 mil açudes e represas de todos os portes na região hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental, os quais não possuem nenhum programa de gerenciamento (BRASIL, 2006a). Destaca-se o Açude Orós, localizado também no rio Jaguaribe, a cerca de 100 km a montante do Açude Castanhão.

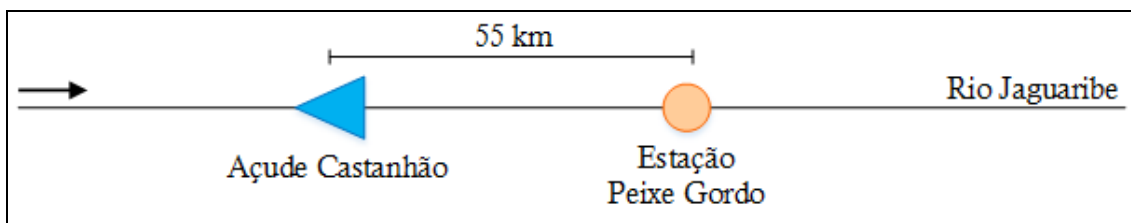


Figura 10. Localização do Açude Castanhão em relação à estação Peixe Gordo, rio Jaguaribe.

#### 4.1.2. Estação Porto Velho

A estação Porto Velho está instalada no rio Madeira em Rondônia, região norte do Brasil, nas seguintes coordenadas geográficas  $8^{\circ}44'54''\text{S}$  e  $63^{\circ}55'1''\text{O}$ . Esta área está inserida na sub-região hidrográfica Madeira, caracterizada por apresentar altitudes entre 300 m e 500 m, clima úmido, para o qual os máximos pluviométricos ocorrem entre os meses de dezembro e março, solos lateríticos (solos rasos ricos em oxi-hidróxidos de ferro e alumínio), e vegetação composta por florestas úmidas, com grande biodiversidade (BRASIL, 2006b).

A usina hidrelétrica (UHE) Santo Antônio situa-se 7 km à montante da estação Porto Velho (Figura 11). O reservatório da usina, inaugurada em 2011, apresenta  $271\text{ km}^2$  de área alagada e apenas  $2,1\text{ hm}^3$  de volume total, sendo o menor dos reservatórios em estudo neste quesito. Ademais, deve-se notar a presença da UHE Jirau, localizada a 120 km a montante da estação Porto Velho, cuja operação teve início em 2013.

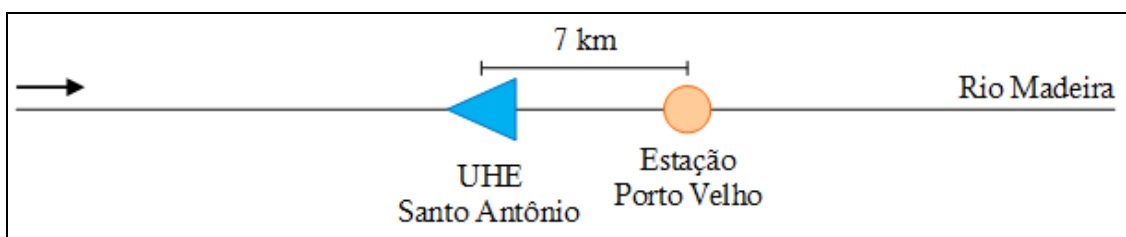


Figura 11. Localização da UHE Santo Antônio em relação à estação Porto Velho, rio Madeira.

#### 4.1.3. Estação Peixe

A estação Peixe localiza-se no rio Tocantins, nas coordenadas geográficas  $12^{\circ}1'23''\text{S}$  e  $48^{\circ}31'58''\text{O}$ , interior do município de Peixe – TO. Esta área está inserida na sub-região hidrográfica do Tocantins Alto, onde predominam as características determinadas pelo clima tropical: com dois períodos bem definidos, um seco de maio a

setembro, e outro chuvoso, entre outubro e abril; solos profundos e bem drenados (latossolos e neossolos); e uma vegetação com predominância do cerrado.

A cerca de 30 km a montante, está instalada, desde 2006, a UHE Peixe Angical (Figura 12), com um volume total de 952 hm<sup>3</sup> e 104 km<sup>2</sup> de área alagada. Ainda, a montante da UHE Peixe Angical, encontram-se outras três usinas hidrelétricas: a 100 km de distância, a UHE São Salvador, inaugurada em 2009; a 177 km, a UHE Cana Brava, iniciada em 2002; e finalmente, a UHE Serra da Mesa, a 262 km, cuja operação teve início em 1998.

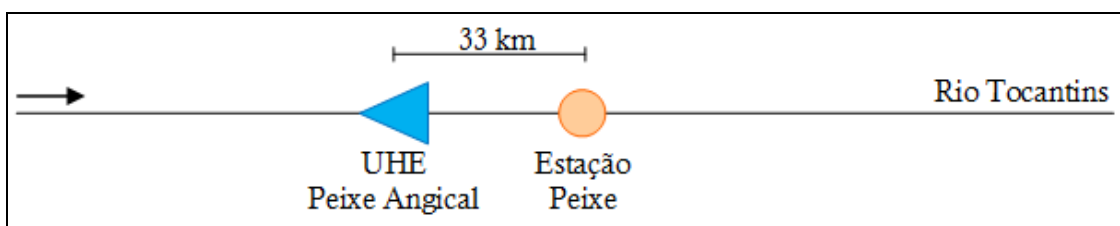


Figura 12. Localização da UHE Peixe Angical em relação à estação Peixe, rio Tocantins.

#### 4.1.4. Estação Miracema do Tocantins

A estação Miracema do Tocantins está localizada no rio Tocantins, cerca de 280 km a jusante da estação Peixe e da UHE São Salvador, nas coordenadas geográficas 9°34'3'' S e 48°22'43'' O. Desta maneira, esta área de estudo é caracterizada por apresentar características muito semelhantes à anterior.

A UHE Luiz Eduardo Magalhães, localizada a 23 km de distância à montante da estação Miracema do Tocantins (Figura 13), entrou em operação em 2002, gerando energia através de um reservatório de 5900 hm<sup>3</sup>, o maior em estudo, e uma área inundada de 630 km<sup>2</sup>.

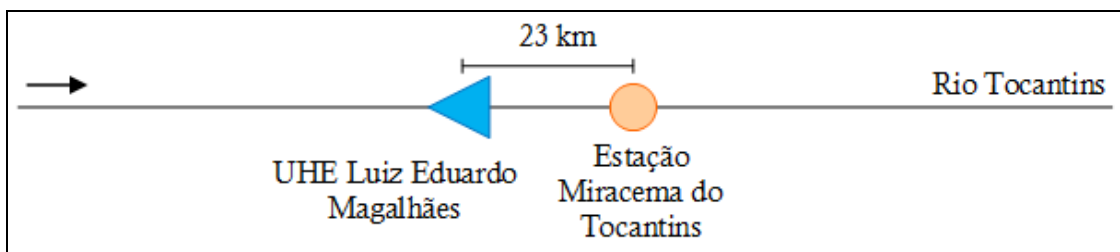


Figura 13. Localização da UHE Luiz Eduardo Magalhães em relação à estação Miracema do Tocantins, rio Tocantins.

#### 4.1.5. Estação Pontes e Lacerda

A estação Pontes e Lacerda localiza-se no rio Guaporé, estado do Mato Grosso, região Centro-Oeste do Brasil, nas coordenadas  $15^{\circ}12'55''$  S e  $59^{\circ}21'14''$  O. Esta área de estudo está inserida na sub-região hidrográfica do Madeira, assim como a estação Porto Velho, apresentando características muito semelhantes à área de estudo da mesma.

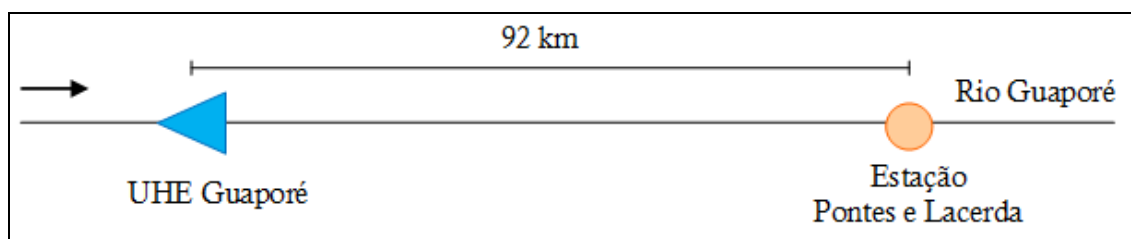


Figura 14. Localização da UHE Guaporé em relação à estação Pontes e Lacerda, rio Guaporé.

A montante da estação, aproximadamente 90 km, está instalada a UHE Guaporé, uma usina inaugurada em 2003, a qual possui uma área alagada de apenas  $4,2 \text{ km}^2$  e um volume total de aproximadamente  $22 \text{ hm}^3$  (Figura 14).

#### 4.1.6. Estação Colatina

A estação Colatina localiza-se no rio Doce, região central do estado Espírito Santo ( $19^{\circ}32'0''$  S e  $40^{\circ}37'47''$  O). Esta área de estudo está incluída na região hidrográfica do Atlântico Sudeste, a qual distingue-se por possuir um clima quente úmido, onde ocorrem de 4 a 5 meses secos ao longo do ano; e a presença de florestas remanescentes fragmentadas e regiões com solo fortemente exposto, caracterizando um processo de degradação que ocorre há anos na sub-região hidrográfica do rio Doce (BRASIL, 2006d).

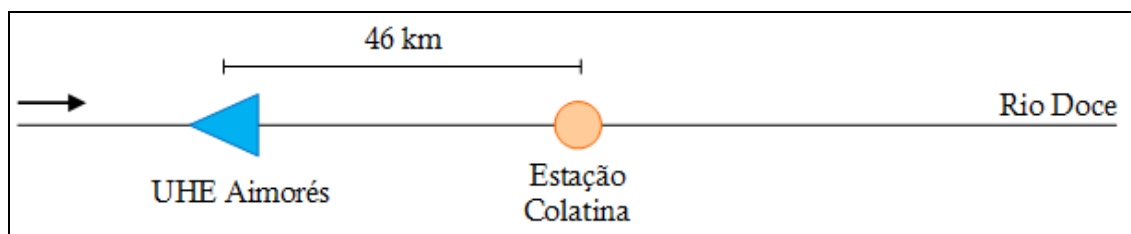


Figura 15. Localização da UHE Aimorés em relação à estação Colatina, rio Doce.

A UHE Aimorés localiza-se a 46 km de distância a montante de estação Colatina (Figura 15); inaugurada no ano de 2005, a usina possui uma área alagada de

aproximadamente 30 km<sup>2</sup> e um volume total de 285 hm<sup>3</sup>. Localizada entre a estação Colatina e a UHE Aimorés, está a UHE Mascarenhas, cuja implantação ocorreu em 1974.

#### 4.1.7. Estação Porto FAE Novo

A estação Porto FAE Novo está localizada no rio Chapecó, oeste do estado de Santa Catarina, nas coordenadas geográficas 26°49'5'' S e 52°44'5'' O. Esta área de estudo constitui parte do Trecho Alto da Região Hidrográfica do Rio Uruguai, região que possui grandes declividades, com cotas variando entre 1600 m e 160 m, fazendo com que a bacia apresente um grande potencial hidrelétrico neste trecho (BRASIL, 2006e). Além disto, observa-se na região um clima temperado, com elevação dos níveis pluviométricos entre os meses de maio e setembro, ocorrência dos biomas Mata Atlântica e Pampa e um relevo caracterizado como vales encaixados e planaltos e solos majoritariamente rasos, refletindo em uma baixa capacidade de armazenamento da bacia (BRASIL, 2006e).

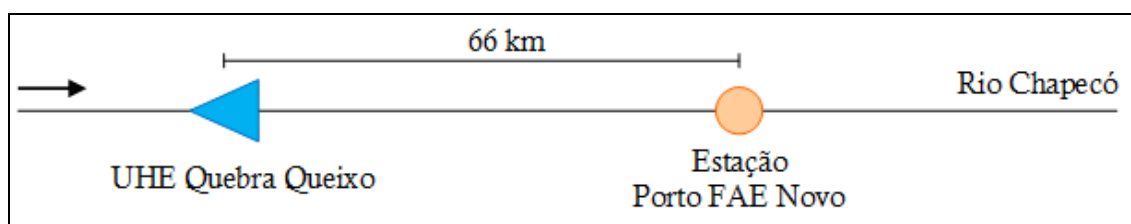


Figura 16. Localização da UHE Quebra Queixo em relação à estação Porto FAE Novo, rio Chapecó.

Como mostra a Figura 16, a cerca de 60 km a montante desta estação, localiza-se a UHE Quebra Queixo, empreendimento hidrelétrico inaugurado em 2003. Esta usina apresenta uma área alagada de 5,6 km<sup>2</sup>, entretanto, não foram encontradas informações sobre o volume ocupado pelo reservatório da mesma.

#### 4.1.8. Estação Iraí

A estação Iraí localiza-se no município de Iraí – RS (27°10'25'' S e 53°13'45'' O), a 200 m de altitude. Sua área de drenagem contempla cerca de 80% da área total da sub-bacia (61900 km<sup>2</sup>). Assim como a estação Porto FAE Novo, a área de

estudo da estação Iraí também está inserida na região do Alto Uruguai, apresentando características semelhantes.

Esta estação está instalada em um local de extremo interesse no rio Uruguai, a cerca de 40 km da UHE Foz do Chapecó, inaugurada em 2009 (Figura 17). A montante da UHE Foz do Chapecó, a bacia hidrográfica do rio Uruguai apresenta diversos barramentos, com destaque para as usinas Itá e Machadinho, também no rio Uruguai; e Barra Grande, no rio Pelotas, que juntamente com o rio Canoas forma o rio Uruguai. Além disto, destaca-se que os principais afluentes do rio Uruguai, rios Santana, Bernardo José, Lava-tudo, Pelotinhas e Vacas Gordas estão todos localizados a montante da UHE Itá.

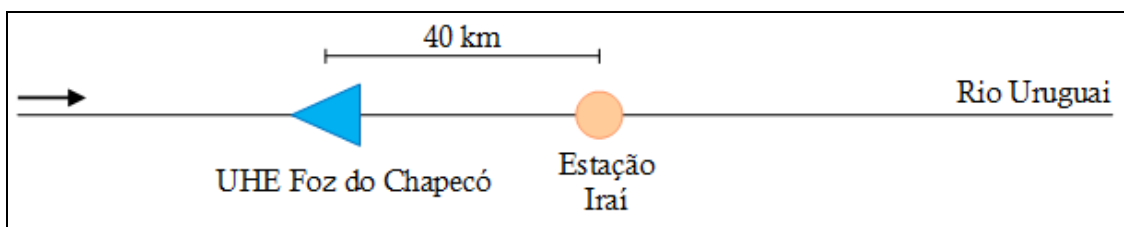


Figura 17. Localização da UHE Foz do Chapecó em relação à estação Iraí, rio Uruguai.

#### ***4.1.9. Estação Dona Francisca***

A estação Dona Francisca situa-se no rio Jacuí, município de Dona Francisca, região central do estado do Rio Grande do Sul ( $29^{\circ}37'39''$  S e  $53^{\circ}21'12''$  O). Esta área de estudo, inserida na região hidrográfica do Atlântico Sul, apresenta clima definido como temperado chuvoso, com precipitações razoavelmente bem distribuídas ao longo de todos os meses, entretanto, com variações locais; os biomas predominantes são a Mata Atlântica e o Pampa, assim como na região hidrográfica do Uruguai (BRASIL, 2006f). Quanto ao relevo, esta região encontra-se na transição entre a Depressão Periférica sul-rio-grandense e o Planalto da Bacia do Paraná, apresentando inicialmente solos rasos que se desenvolvem em solos mais profundos e pouco drenados em direção de jusante (BRASIL, 2006f).

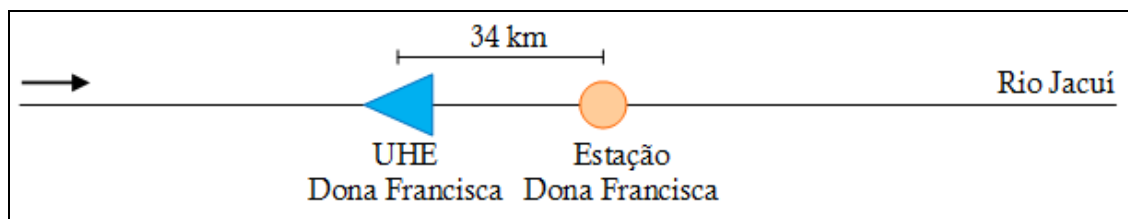


Figura 18. Localização da UHE Dona Francisca em relação à estação de mesmo nome.

Nesta posição, a estação Dona Francisca está a cerca de 30 km da UHE de mesmo nome, inaugurada em 2001 (Figura 18). Esta usina apresenta um reservatório com volume total de mais de 30 hm<sup>3</sup> e uma área de 20 km<sup>2</sup> alagada.

#### 4.1.10. Estação Muçum

A estação Muçum está localizada no município de Muçum – RS (29°10'2'' S e 51°52'7'' O). Esta área de estudo também está inserida na região hidrográfica do Atlântico Sul, apresentando características semelhantes, quanto ao clima e bioma, à região da estação Dona Francisca. Em relação à topografia, a estação Muçum encontra-se na transição entre uma região de vales encaixados e corredeiras, com uma declividade média de 1,6 m.km<sup>-1</sup>, e uma planície, com raras corredeiras e uma declividade média de 0,2 m.km<sup>-1</sup> (FUNDAÇÃO DE PROTEÇÃO AO MEIO AMBIENTE - FEPAM/ SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - SEMA, 2001).

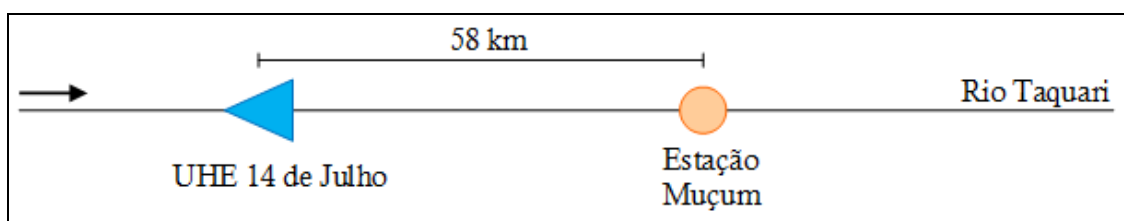


Figura 19. Localização da UHE 14 Julho em relação à estação Muçum, rio Taquari.

Como pode ser visto na Figura 19, logo a montante da estação Muçum, está instalada, desde 2008, a UHE 14 de Julho; uma usina que utiliza um reservatório de aproximadamente 50 hm<sup>3</sup> em uma área de 6,6 km<sup>2</sup>. Além desta, destaca-se a presença de outras duas usinas a montante da estação, a UHE Monte Claro, inaugurada em 2004, e a UHE Castro Alves, também de 2008.



Os Quadros 2 e 3 apresentam, respectivamente, o resumo das características das estações sedimentométricas e dos reservatórios em estudo.

Quadro 2. Resumo das características das estações sedimentométricas em estudo.

Estação	Código	Localização	Rio	Coordenadas		Área de drenagem (km <sup>2</sup> )	Altitude (m)
				Latitude	Longitude		
<b>Peixe Gordo</b>	36390000	Ceará	Jaguaribe	5°13'39'' S	38°11'52'' O	47800	50
<b>Porto Velho</b>	15400000	Rondônia	Madeira	8°44'54'' S	63°55'1'' O	976000	42
<b>Peixe</b>	22050001	Tocantins	Tocantins	12°1'23'' S	48°31'58'' O	128000	235
<b>Miracema do Tocantins</b>	22500000	Tocantins	Tocantins	9°34'3'' S	48°22'43'' O	185000	129
<b>Pontes e Lacerda</b>	15050000	Mato Grosso	Guaporé	15°12'55'' S	59°21'14'' O	2990	230
<b>Colatina</b>	56994500	Espírito Santo	Doce	19°32'0'' S	40°37'47'' O	76400	62
<b>Porto FAE Novo</b>	73770000	Santa Catarina	Chapecó	26°49'5'' S	52°44'5'' O	5550	360
<b>Iraí</b>	74100000	Santa Catarina	Uruguai	27°10'25'' S	53°13'45'' O	61900	200
<b>Dona Francisca</b>	85400000	Rio Grande do Sul	Jacuí	29°37'39'' S	53°21'12'' O	14000	32
<b>Muçum</b>	86510000	Rio Grande do Sul	Taquari	29°10'2'' S	51°52'7'' O	16000	40

Quadro 3. Resumo das características dos reservatórios em estudo.

<b>Reservatório</b>	<b>Estação à jusante</b>	<b>Distância da estação (km)</b>	<b>Ano de entrada em operação</b>	<b>Tipo de operação<sup>1</sup></b>	<b>Área inundada (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Volume total (hm<sup>3</sup>)</b>
<b>Açude Castanhão<sup>2</sup></b>	Peixe Gordo	55	2002	-	600	4400
<b>UHE Santo Antônio<sup>3</sup></b>	Porto Velho	7	2011	Fio d'água	271	2,1
<b>UHE Peixe Angical<sup>4</sup></b>	Peixe	33	2006	Reservatório	294.1	2740
<b>UHE Luiz Eduardo Magalhães<sup>5</sup></b>	Miracema do Tocantins	23	2002	Fio d'água	630	5900
<b>UHE Guaporé<sup>6</sup></b>	Pontes e Lacerda	92	2003	Fio d'água	4,2	22,58
<b>UHE Aimorés<sup>7</sup></b>	Colatina	46	2005	Fio d'água	30,9	185,22
<b>UHE Quebra Queixo<sup>8</sup></b>	Porto FAE Novo	66	2003	Reservatório	5,6	-
<b>UHE Foz do Chapecó<sup>9</sup></b>	Iraí	40	2010	Fio d'água	79,9	1502
<b>UHE Dona Francisca<sup>10</sup></b>	Dona Francisca	34	2001	Fio d'água	20	33,5
<b>UHE 14 de Julho<sup>11</sup></b>	Muçum	58	2008	Fio d'água	6,6	51,88

<sup>1</sup> Usinas hidrelétricas que operam a fio d'água apresentam áreas de alagamento reduzidas e não formam reservatórios para armazenamento de água durante o período de estiagem e utilizam a própria velocidade do rio para geração de energia, ao contrário das usinas que operam com reservatório.

<sup>2</sup> Câmara e Frota, s.d.

<sup>3</sup> ANEEL, 2014.

<sup>4</sup> FURNAS, 2009.

<sup>5</sup> EDP, 2009.

<sup>6</sup> ENGENHIDRO ENGENHARIA, s.d.

<sup>7</sup> Cortez et al., 2013.

<sup>8</sup> Companhia Energética Chapecó, 2010.

<sup>9</sup> FURNAS, 2009.

<sup>10</sup> Rodrigues et al., 2012.

<sup>11</sup> CERAN, 2008.

## 4.2. Descrição dos dados utilizados

Para cada área de estudo, foram obtidos os dados fluviométricos e sedimentométricos disponibilizados pela ANA através do portal HIDROWEB. Os dados fluviométricos utilizados consistem na série de vazões diárias estimadas através do método da curva-chave cota *versus* vazão<sup>12</sup>. Os dados sedimentométricos são resultado da coleta de amostras realizadas em campo, com uma frequência aleatória, que variou desde 8 amostragens em um ano até anos sem a realização de amostragens para as estações analisadas; durante as amostragens, são obtidas tanto a concentração de sedimentos em suspensão quanto a descarga líquida no momento da coleta. As informações constantes nos arquivos de dados informam que os dados sedimentométricos não se encontram consistidos pela ANA, ou seja, não passaram por um processo de tratamento após a realização das amostragens; os dados fluviométricos, todavia, apresentam períodos (variáveis para cada estação) nos quais já se encontram consistidos pela ANA. A seguir serão descritos brevemente os dados sedimentométricos e fluviométricos obtidos em cada uma das estações quanto ao seu período de amostragens e consistência.

A estação Peixe Gordo possui uma série não contínua de dados sedimentométricos, sendo o primeiro período compreendido entre 1994 e 1997, com sete amostragens; o segundo período entre 2002 e 2014, apresenta 23 amostragens não consistidas. Quanto aos dados fluviométricos, a estação apresenta dados desde 1961 até 2014, os quais encontram-se consistidos até o ano de 2005.

A estação Porto Velho apresenta 60 amostragens sedimentométricas realizadas entre os anos de 1978 e 2013, não consistidas. A estação também possui dados fluviométricos entre os anos de 1967 e 2013, estando consistidos até 2007.

A estação Peixe possui dados sedimentométricos entre os anos de 1978 e 2014, totalizando 39 amostragens não consistidas. Os dados fluviométricos disponíveis são entre os anos de 1971 e 2013, consistidos até 2006.

A estação Miracema do Tocantins apresenta uma série não contínua de dados sedimentométricos não consistidos, o primeiro período com 11 amostragens,

---

<sup>12</sup> Através de dados de cota e vazão medidos na estação, gera-se uma relação entre estas duas variáveis, a curva-chave cota *versus* vazão; desta maneira, não há a necessidade da realização de medições diárias de vazão e as mesmas são obtidas através da cota, analisada diariamente na estação.

compreendido entre 1985 e 1989, e o segundo com 21 amostragens, entre 2005 e 2014. Quanto aos dados fluviométricos, a estação possui informações desde 1969 até 2013, as quais estão consistidas até 2007.

A estação Pontes e Lacerda possui 74 amostragens sedimentométricas, realizadas entre os anos de 1979 e 2014, todas não consistidas. Já os dados fluviométricos disponíveis estão compreendidos entre os anos de 1971 e 2007, estando consistidos até 2006.

A estação Colatina possui 69 dados sedimentométricos, não consistidos e compreendidos entre os anos de 1976 e 2012. Além disso, a estação possui dados fluviométricos desde 1969 até 2014, os quais estão consistidos até 2005.

A estação Porto FAE Novo apresenta disponível uma série de 72 dados sedimentométricos, coletados entre os anos de 1979 e 2014, não consistidos. Os dados fluviométricos disponíveis compreendem o mesmo período, estando consistidos até o ano de 2005.

A estação Iraí apresenta 55 medições sedimentométricas realizadas no período compreendido entre 1978 e 2013 e ainda não consistidas. Os dados fluviométricos disponíveis são do período entre 1941 e 2014, consistidos até o ano de 2007.

A estação Dona Francisca possui dados sedimentométricos entre os anos de 1978 e 2014, somando 64 medições ainda não consistidas. Quanto aos dados fluviométricos, estão disponíveis informações entre os anos de 1940 e 2014, consistidas até 2007.

Finalmente, a estação Muçum apresenta 58 medições de dados de sedimentos, compreendidas no período entre 1979 e 2014 e não consistidas. Os dados fluviométricos disponíveis compreendem o período entre 1940 e 2014 e encontram-se consistidos até 2006.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos dados obtidos para cada uma das estações sedimentométricas em estudo.

#### ***4.2.1. Tratamento dos dados sedimentométricos***

Inicialmente, os dados sedimentométricos obtidos no portal HIDROWEB foram analisados e tratados através de curvas de tendência entre as principais variáveis disponíveis: cota, largura, vazão, velocidade e concentração de sedimentos em suspensão visando realizar o reconhecimento de dados discrepantes de vazão e concentração de sedimentos através de uma análise visual. Observa-se que, de maneira

geral, as relações entre as variáveis apresentam comportamentos bem definidos, mesmo para períodos com

Tabela 1. Características dos dados sedimentométricos e fluviométricos disponíveis para cada estação em estudo.

<b>Estação</b>	<b>Dados sedimentométricos</b>	<b>Dados de vazão</b>	<b>Consistência dos dados de vazão</b>
<b>Peixe Gordo</b>	1994 - 2014	1961 - 2014	1961 - 2005
<b>Porto Velho</b>	1978 - 2013	1967 - 2013	1967 - 2007
<b>Peixe</b>	1978 - 2014	1971 - 2013	1971 - 2006
<b>Miracema do Tocantins</b>	1985 - 2014	1969 - 2013	1969 - 2007
<b>Pontes e Lacerda</b>	1979 - 2014	1971 - 2007	1971 - 2006
<b>Colatina</b>	1976 - 2014	1939 - 2014	1969 - 2005
<b>Porto FAE Novo</b>	1979 - 2014	1979 - 2014	1979 - 2005
<b>Iraí</b>	1978 - 2013	1941 - 2014	1941 - 2007
<b>Dona Francisca</b>	1978 - 2014	1978 - 2014	1940 - 2007
<b>Muçum</b>	1979 - 2014	1940 - 2014	1940 - 2006

reduzida quantidade de dados. Assim, no caso de dados de vazão discrepantes, ou seja, identificados como estando extremamente afastados das linhas de tendência caracterizadas, buscou-se a confirmação dos mesmos através dos arquivos de resumo da descarga (dados amostrados de vazão) ou então dos arquivos contendo os dados diários de vazão (estimados através do procedimento da curva-chave pela ANA). Estes mesmos arquivos foram utilizados como base para o preenchimento de dados de vazão inexistentes nos arquivos de dados sedimentométricos.

### 4.3. Estabelecimento da curva-chave de sedimentos

Após o tratamento dos dados, realizou-se a divisão dos períodos de dados disponíveis em anterior e posterior à implantação do(s) barramento(s) respectivo(s) à montante, baseada no ano de entrada em operação do(s) mesmo(s). Tendo como base estes períodos, foram estabelecidas curvas-chave do tipo potência, relacionando a concentração de sedimentos em suspensão e a vazão (Equação 1)  $C_{ss} = aQ^b$

(Equação 1), através do método dos mínimos quadrados no *software* Microsoft Excel.

As curvas-chave obtidas foram plotadas em gráficos do tipo log-log, permitindo a análise das modificações nos traçados das mesmas. Para cada período, foram analisados o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre os dados de vazão e concentração de sedimentos e o coeficiente de variação de Pearson ( $p$ ) para os dados de concentração de sedimentos. O coeficiente de determinação indica o grau de correlação entre a concentração de sedimentos em suspensão e a vazão, variando entre 0 e 1, sendo que quanto maior o  $R^2$  maior a correlação entre os dados da amostra. Já o coeficiente de variação de Pearson, traduz o grau de dispersão dos dados em relação ao valor médio da amostra em estudo, sendo determinado pela razão entre o desvio padrão e a média; quanto maior o coeficiente de Pearson, maior o grau de dispersão dos dados.

### 4.4. Cálculo do deflúvio médio anual de sedimentos

Do mesmo modo que as séries de dados sedimentométricas, as séries de dados fluviométricas também foram subdivididas de acordo com o ano de implantação dos barramentos. Desta maneira, as curvas-chave de sedimentos obtidas foram aplicadas às séries de vazões diárias disponíveis, permitindo a obtenção de estimativas dos valores



de concentração de sedimentos para períodos em que não houve medição. Em todas as estações nas quais as séries de vazões diárias apresentavam períodos superiores àqueles utilizados para a obtenção das curvas-chave, assumiu-se que as mesmas eram válidas também para estes intervalos de tempo.

O cálculo do deflúvio sólido médio anual (Ds) seguiu a metodologia descrita em Carvalho (2008), através da utilização da curva de permanência do curso de água. Inicialmente, com o auxílio do programa “Comparador de Hidrogramas”<sup>13</sup>, foram determinadas as curvas de permanência para os diferentes períodos em estudo. As curvas de permanência foram discretizadas em 28 intervalos de acordo com o tempo de permanência da vazão no curso de água, para cada intervalo aplicou-se a curva-chave de sedimentos visando o cálculo da concentração de sedimentos em suspensão. Finalmente, a descarga sólida média de sedimentos em suspensão foi obtida através da Equação 7, conforme apresentado por Asselman (2000), como sendo o somatório da multiplicação da vazão média entre dois intervalos sucessivos pela concentração média de sedimentos em suspensão, também entre dois intervalos sucessivos.

$$Q_{ss} = 0,0864 \cdot \left\{ \sum_{i=1}^n Q_i C_i \right\} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde,

$Q_{ss}$  = descarga sólida em suspensão média (toneladas.dia<sup>-1</sup>);

$Q_i$  = vazão média do intervalo (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>);

$C_i$  = concentração de sedimentos em suspensão média do intervalo (mg.l<sup>-1</sup>);

$n$  = número de intervalos discretizados para a curva de permanência;

0,0864 = fator de conversão de unidades.

O somatório das vazões médias de todos os intervalos fornece a vazão média anual do curso de água, o mesmo aplica-se as concentrações médias. Multiplicando-se o valor da descarga sólida média por 365 dias, obteve-se o deflúvio sólido médio anual de sedimentos da bacia analisada para o período em questão; dividindo-se este valor pela área de drenagem da estação sedimentométrica, obteve-se a descarga sólida específica ( $Q_{esp}$ ).

<sup>13</sup> Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/hge/mgb-iph/downloads/>>.

#### **4.5. Eficiência de retenção de sedimentos**

A eficiência de retenção de sedimentos em suspensão pode ser calculada como sendo a porcentagem de redução no deflúvio sólido médio anual entre o período anterior e o período posterior ao barramento. Estes resultados, obtidos a partir das curvas-chave de sedimento e das séries de vazão históricas, podem ser comparados com aqueles obtidos através métodos tradicionais de estimativa de assoreamento de reservatório apresentados em 3.8.1. Para o cálculo do método de Churchill, no entanto, seria necessário a informação sobre o comprimento do reservatório (também conhecido como “estirão”), dado este que não se encontra disponível para a maior parte dos reservatórios em estudo neste trabalho. Deste modo, apenas o método de Brune foi utilizado para o cálculo da quantidade de sedimento retida por cada reservatório, seguindo a metodologia apresentada anteriormente.

## 5. Resultados e discussões

### 5.1. Análise dos padrões de descarga sólida em suspensão e descarga líquida

#### 5.1.1. Os padrões de comportamento em cada área de estudo

##### 5.1.1.1. Estação Peixe Gordo

Para a estação Peixe Gordo, foram estabelecidas duas curvas-chave de sedimentos, tomando-se como base o ano de início da operação do Açude Castanhão, em 2002. A curva-chave para o período anterior ao reservatório foi elaborada a partir de dados sedimentométricos entre os anos 1994 e 1997, totalizando 7 amostragens. A curva-chave em relação ao período posterior ao barramento, por sua vez, foi construída a partir de 22 amostragens realizadas entre os anos de 2002 e 2014.

Comparando-se o período anterior e o período posterior à implantação do barramento, observa-se um deslocamento vertical da curva-chave, refletindo uma redução na concentração de sedimentos em suspensão média (Gráfico 1). O coeficiente de correlação dos dados apresenta uma redução, indicando uma menor dependência da concentração em relação a vazão no período pós-barramento. Além disto, os dados de concentração apresentam uma elevação no coeficiente de variação de Pearson, refletindo a maior dispersão dos dados em torno do valor médio, que pode ser observada no Gráfico 1. Esta menor variação dos dados percebida no primeiro período em análise, no entanto, pode estar relacionada com o número reduzido de dados disponíveis.

Analisando-se as curvas de permanência do rio Jaguaribe na localização da estação Peixe Gordo (Gráfico 2), nota-se uma atenuação das vazões máximas após a implantação do barramento. Além disto, percebe-se que o barramento cumpre a sua função de disponibilizar água continuamente ao longo do ano, provocando tanto um aumento das vazões mínimas quanto um aumento da permanência das mesmas no curso de água.

O deflúvio sólido médio anual estimado para os anos de 1961 a 2001 foi de  $1,13 \times 10^6 \text{ t.ano}^{-1}$  e para os anos de 2002 a 2014, este valor sofre uma redução de 94%, sendo estimado em  $7,52 \times 10^4 \text{ t.ano}^{-1}$ . A partir do deflúvio sólido, estimou-se também a

descarga sólida específica média anual para os referidos períodos, inicialmente a mesma era aproximadamente  $23,79 \text{ t.ano}^{-1}.\text{km}^{-2}$  e após o barramento, passa a apresentar valores da ordem de  $1,57 \text{ t.ano}^{-1}.\text{km}^{-2}$ .

Embora tenha-se a presença do Açude Orós, a montante do Açude Castanhão, os possíveis efeitos do mesmo na localidade da estação Peixe Gordo não podem ser analisados devido à inexistência de dados sedimentométricos anteriormente à sua implantação no rio Jaguaribe em 1961.

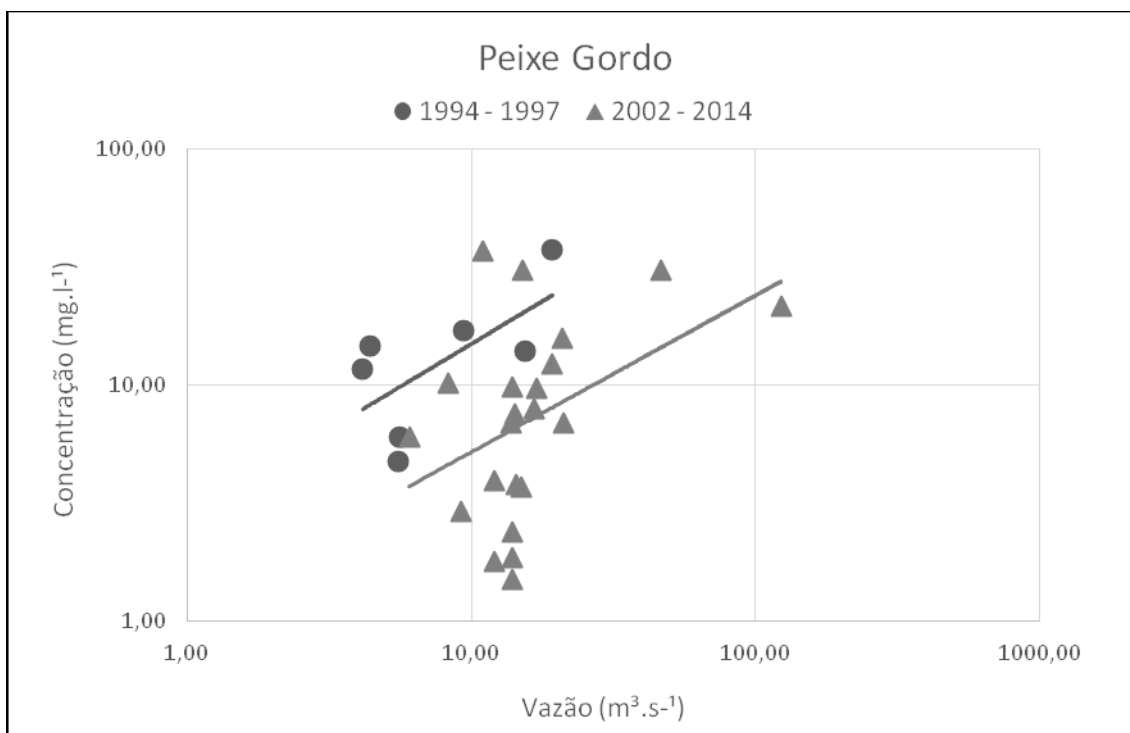


Gráfico 1. Curvas-chave de sedimento obtidas para a estação Peixe Gordo.

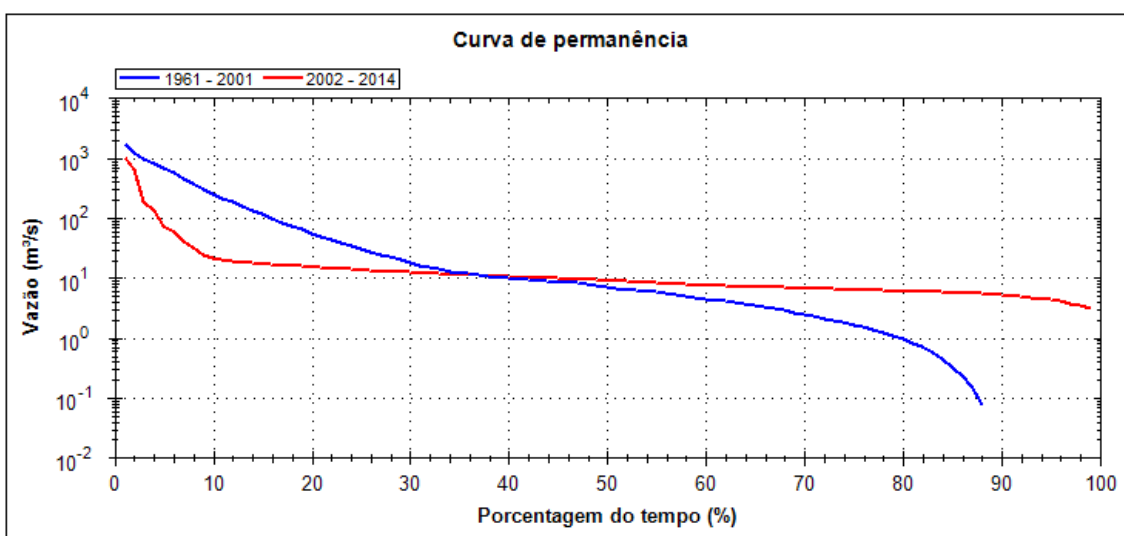


Gráfico 2. Curvas de permanência obtidas para a estação Peixe Gordo.

### 5.1.1.2. Estação Porto Velho

Para a estação Porto Velho, foram construídas duas curvas-chave de concentração de sedimentos em suspensão, relacionando-se à implantação do reservatório da UHE Santo Antônio em 2011. Comparando-se as duas curvas-chaves de sedimento estabelecidas (Gráfico 3), percebe-se que os pontos de ambos períodos encontram-se em

uma mesma nuvem, ainda que tenha ocorrido um aumento das concentrações de sedimento em suspensão para as vazões maiores e uma redução das mesmas para as vazões menores no período após o estabelecimento da usina.

A correlação entre os dados de vazão e concentração de sedimentos em suspensão sofre um aumento, indicado pela variação do coeficiente de correlação de 0,51 para 0,89 do primeiro para o segundo período. A dispersão dos dados em torno do seu valor médio, entretanto, sofre uma redução, indicando menores variações nos valores de concentração de sedimentos. Assim como para a estação Peixe, esta redução na dispersão pode estar relacionada à pouca quantidade de amostras disponíveis para o segundo período em análise, portanto, sugere-se a continuidade desta análise para verificação do fato.

Quanto às curvas de permanência do rio Madeira na localização da estação Porto Velho (Gráfico 4), percebe-se que quase não ocorrem modificações nos padrões de descarga líquida, apesar de um pequeno aumento das vazões que permanecem no rio entre 20 e 70% do tempo após a implantação do reservatório. O deflúvio sólido médio anual entre os anos de 1967 e 2010 foi estimado em aproximadamente  $2,42 \times 10^8 \text{ t.ano}^{-1}$ , subindo para  $3,29 \times 10^8 \text{ t.ano}^{-1}$  após a implantação do barramento, totalizando um aumento de 26%. A descarga sólida específica igualmente sofre esta elevação, variando de 248 para  $337 \text{ t.ano}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ .

Inicialmente, poderia se presumir que este aumento na produção de sedimentos em suspensão estaria relacionado à recentidade do barramento, indicando que o sistema fluvial estaria tentando reestabelecer a sua descarga sólida original, retida pela barragem, através da erosão. A UHE Santo Antônio, entretanto, apresenta um reservatório relativamente pequeno, apenas  $2,1 \text{ hm}^3$ , e o rio Madeira vazões muito elevadas, da ordem de  $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , o que pode indicar que o fluxo é capaz de transportar toda a descarga sólida através do barramento da usina, sem provocar retenção. Além disto, nesta região, o rio Madeira apresenta fortes declividades, devido à origem andina e sub-andina das suas águas, por conseguinte, observa-se intensa erosão e grandes quantidades de material em suspensão nos rios da região (BRASIL, 2006b), o que corrobora os elevados valores de deflúvio sólido encontrados.

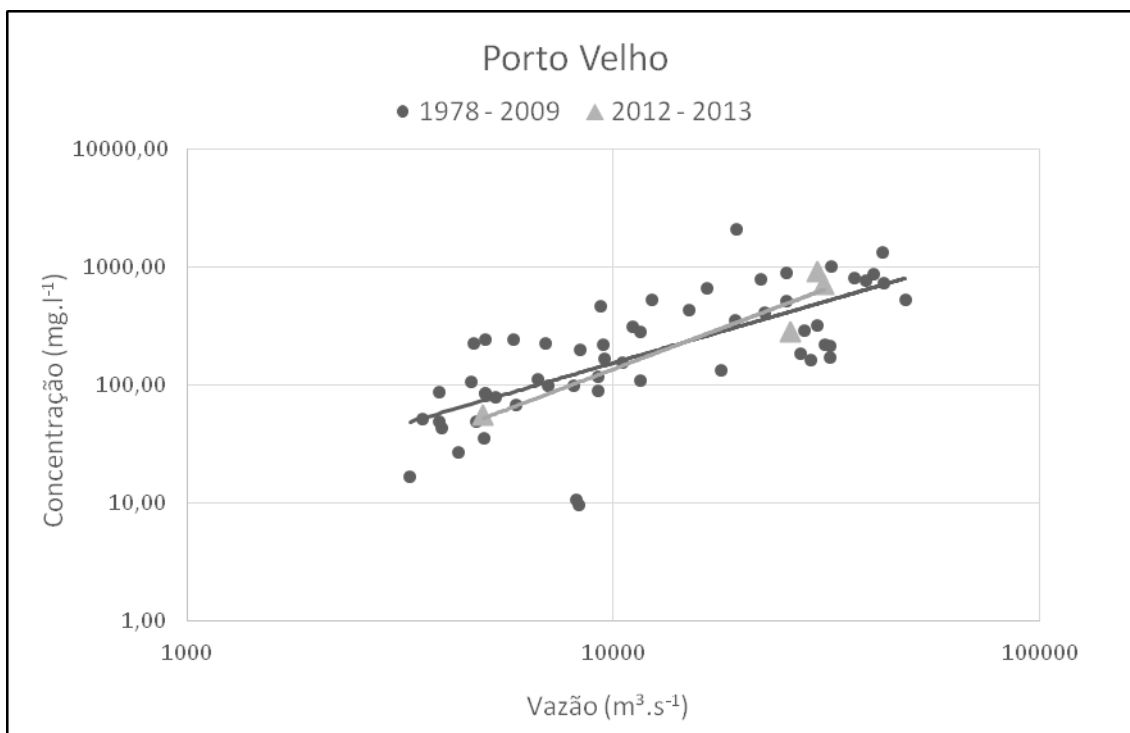


Gráfico 3. Curvas-chave de sedimentos obtidas para a estação Porto Velho.

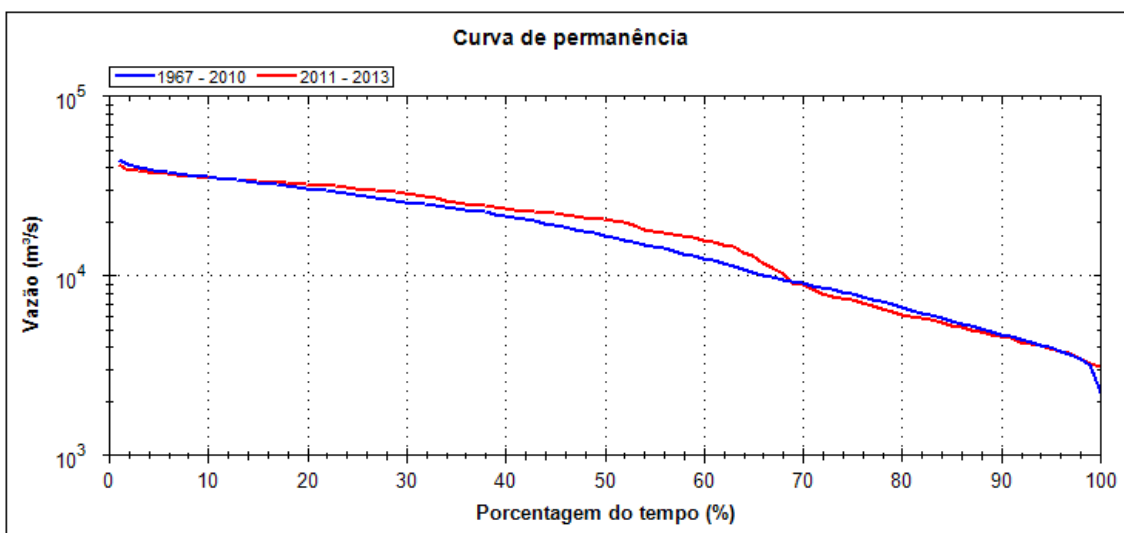


Gráfico 4. Curvas de permanência obtidas para a estação Porto Velho.

Devido a data recente de implantação da UHE Santo Antônio, a estação Porto Velho apresenta um número significativamente maior de amostragens no período anterior à implantação da mesma, 56, em relação ao período posterior, apenas 4 amostras. Desta maneira, ressalta-se que os padrões de comportamento aqui percebidos devem ser melhor estudados ao longo dos próximos anos, de maneira a refletir verdadeiramente o comportamento do sistema fluvial no período pós-barramento.

### 5.1.1.3. Estação Peixe

A partir dos dados sedimentométricos da estação Peixe, foram construídas duas curvas-chave de sedimentos, apresentadas no Gráfico 5. A primeira, obtida a partir de 22 amostragens, realizadas entre 1978 e 2005; e a segunda, com início em 2006, ano de entrada em operação da UHE Peixe Angical, e término em 2014, totalizando 16 amostragens. Durante o período anterior a presença do barramento observa-se um aumento da concentração de sedimentos em suspensão proporcional ao aumento das vazões ocorrentes. No período posterior, entretanto, não é notável esta variação na concentração de sedimentos em suspensão em relação à vazão, fato comprovado pela redução observada no coeficiente de variação de Pearson. Isto pode estar relacionado às modificações na curva de permanência neste local do rio Tocantins que ocorrem após a implantação da usina: uma redução das vazões máximas e um aumento das vazões mínimas, resultando um achatamento geral da curva (Gráfico 6).

Destaca-se que a curva-chave relativa ao período posterior ao barramento, apresenta um coeficiente de correlação extremamente baixo ( $R^2 = 0,002$ ), devido à presença de dois dados de concentração com valores mais elevados que a média: um amostrado em 2006, ano de enchimento do reservatório da UHE Peixe Angical, o qual segue na mesma faixa de valores do ano de 2005, indicando que ainda não havia ocorrido uma redução no aporte de sedimentos em suspensão; e o outro em 2013, sendo o último dado de amostragem disponível para a estação, o qual pode estar sugerindo uma elevação gradual da concentração de sedimentos devido aos ajustes do sistema fluvial. Estes dados, portanto, indicam a necessidade do estudo de um maior período de tempo de dados futuros para validar as conclusões aqui presumidas.

Ao longo dos anos utilizados para a construção das curvas-chave de ambos os períodos em estudo nesta estação, observa-se a implantação de outras usinas a montante do atual local da UHE Peixe Angical, entretanto, devido à ordem de estabelecimento das usinas ao longo do curso de água e às distâncias relativas entre as mesmas e a estação, considera-se que a estação Peixe não é o melhor local para avaliação dos impactos individuais destas usinas. Ao analisar as modificações nos padrões de concentração de sedimentos em locais muito distantes da estrutura responsável pela sua retenção, a informação obtida pode não representar verdadeiramente a eficiência de retenção ocasionada pela mesma, já que o curso de água pode estar criando, através da erosão, ou recebendo, através de seus afluentes, novas fontes de sedimentos. Além



disto, para análise dos efeitos de todas as UHEs na localidade da estação Peixe seria necessária a fragmentação do período disponível de dados em 5 períodos, reduzindo significativamente o número de amostras em cada um deles, e conseqüentemente, confiabilidade dos resultados.

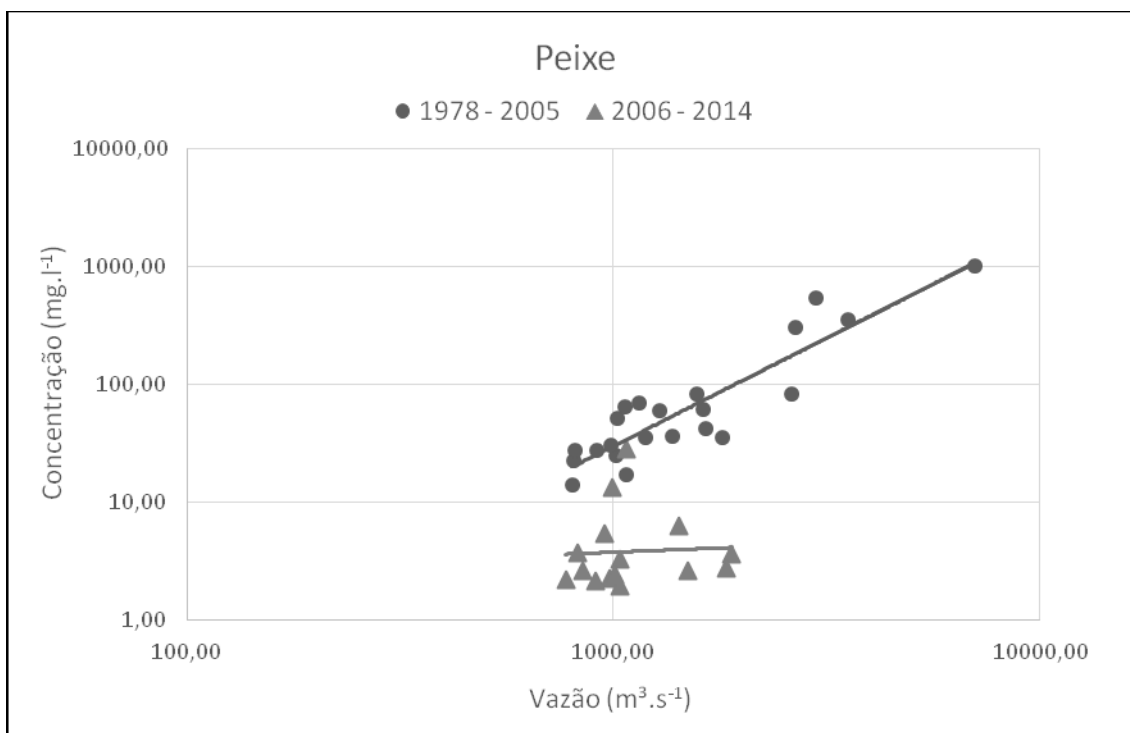


Gráfico 5. Curvas-chave de sedimentos obtidas para a estação Peixe.

O deflúvio sólido médio anual para o período anterior à implantação do barramento foi estimado em  $2,01 \times 10^7 \text{ t.ano}^{-1}$ , decrescendo para  $1,66 \times 10^5 \text{ t.ano}^{-1}$  ao longo do período posterior, o que representa uma redução de 99%. A descarga sólida específica por sua vez, varia de 157 para  $1,30 \text{ t.ano}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ .

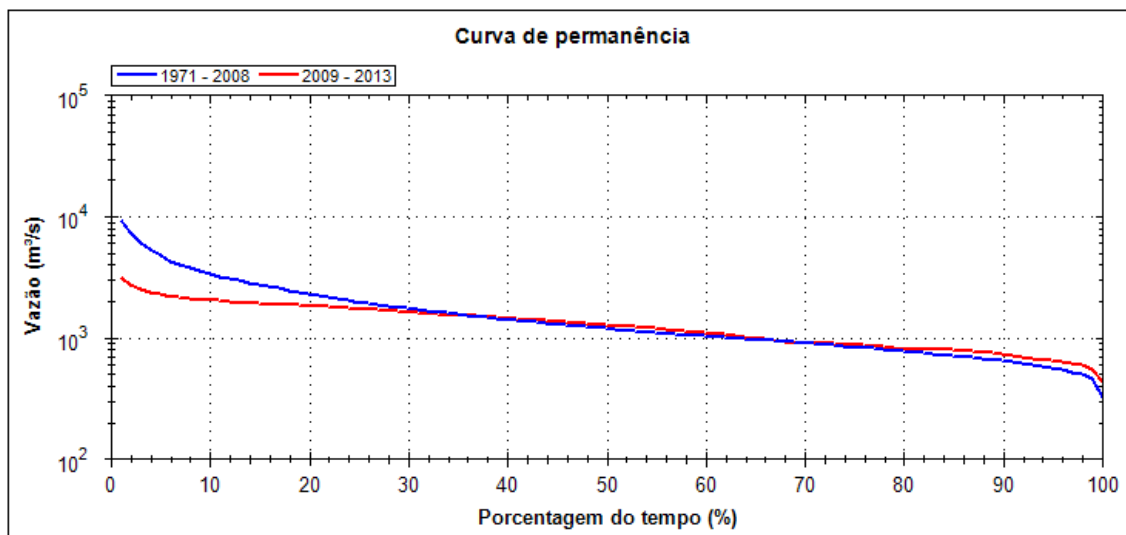


Gráfico 6. Curvas de permanência obtidas para a estação Peixe.

#### 5.1.1.4. Estação Miracema do Tocantins

Para a estação Miracema do Tocantins, localizada a jusante da UHE Luiz Eduardo Magalhães, foi possível obter duas curvas-chave de sedimentos, uma a partir de dados amostrados entre 1985 e 1989, totalizando 11 amostras; e outra através de 21 dados obtidos entre 2005 e 2014. A usina entrou em operação em 2003, no entanto existe uma considerável falha nos dados sedimentométricos entre os anos de 1990 e 2004, que impede o cálculo de curvas-chave considerando estes intervalos de tempo.

O Gráfico 7 apresenta as curvas-chave obtidas para esta estação. No período anterior à implantação do barramento, observa-se um aumento proporcional da concentração de sedimentos em relação à vazão, este, no entanto, é reduzido consideravelmente durante o período posterior, indicando uma redução na dispersão dos dados. Este fato é comprovado através do coeficiente de variação de Pearson, o qual variou de 11,09 para 0,34. Assim como para a área de estudo localizada a montante, estação Peixe, o coeficiente de correlação dos dados apresenta uma redução, indicando uma redução da dependência da concentração em relação à vazão.

As curvas de permanência para o rio Tocantins no local da estação (Gráfico 8) apresentam uma redução das vazões máximas e um aumento das vazões mínimas; considerando-se a vazão média anual, a mesma sofre uma redução de aproximadamente 20% do primeiro para o segundo período. Comparando-se as curvas de permanência da estação Miracema do Tocantins com aquelas ocorrentes a montante, na estação Peixe, observa-se que a redução das vazões máximas e a elevação das vazões mínimas

ocorrentes nesta última são mais significativas, o que pode estar relacionado à presença de outras três usinas logo à montante da mesma, além da UHE Peixe.

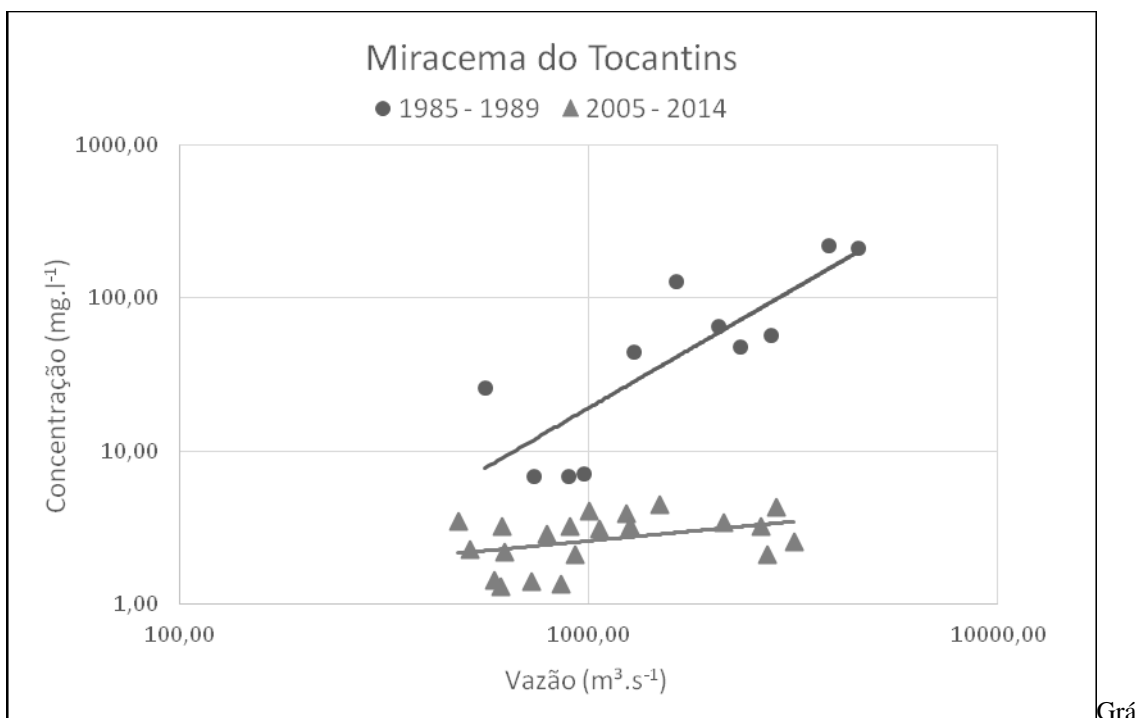


Gráfico 7. Curvas-chave de sedimentos obtidas para a estação Miracema do Tocantins.

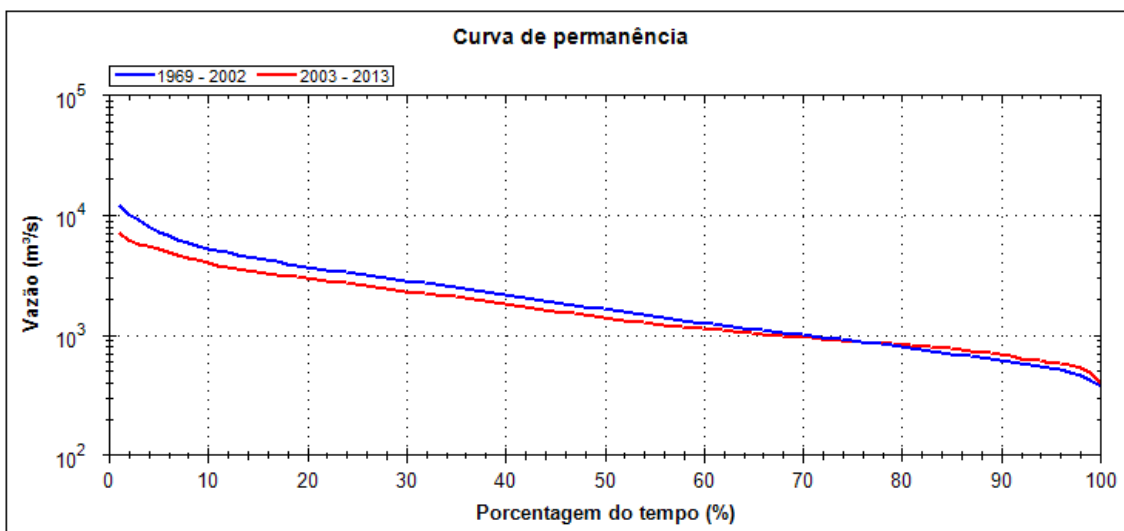


Gráfico 8. Curvas de permanência obtidas para a estação Miracema do Tocantins.

Além disto, a estação apresenta uma redução no deflúvio sólido médio anual semelhante ao que ocorre na estação Peixe, aproximadamente 99% da descarga sólida. Ao longo dos anos 1969 e 2002, estima-se que o deflúvio seja cerca de  $1,91 \times 10^7 \text{ t.ano}^{-1}$ ,

sendo reduzido para  $1,72 \times 10^5 \text{ t.ano}^{-1}$  ao longo dos anos posteriores ao barramento. Já a descarga sólida específica apresenta uma redução de 103 para  $0,93 \text{ t.ano}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$

#### 5.1.1.5. Estação Pontes e Lacerda

A partir dos dados disponíveis da estação Pontes e Lacerda, ajustaram-se duas curvas-chave de sedimento: uma, referente ao período anterior à implantação da UHE Guaporé em 2003 e outra após. O primeiro período apresenta 49 amostragens realizadas, enquanto o segundo possui 23 dados.

Analisando-se as curvas-chave ajustadas, observa-se que há um aumento do coeficiente de correlação no segundo intervalo de tempo em estudo, 2003 a 2014. O coeficiente de variação, entretanto, reduz de 1,05 para 0,45, refletindo uma menor dispersão dos dados.

Analisando-se o Gráfico 9, percebe-se que apesar da mudança ocorrente na curva-chave, os pontos de ambos os intervalos de tempo ainda se concentram em uma mesma nuvem de pontos, indicando que não há uma redução significativa da concentração de sedimentos após a construção da usina. Este ponto também pode ser comprovado através da análise do deflúvio sólido médio anual da estação, que foi estimado como sendo  $4,91 \times 10^4$  e  $3,51 \times 10^4 \text{ t.ano}^{-1}$ , antes e após o barramento, respectivamente, ou seja, uma redução de 28%. A descarga sólida, da mesma maneira, apresentou uma redução de  $16,43 \text{ t.ano}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$  para  $11,76 \text{ t.ano}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ .

Quanto à descarga líquida do rio Guaporé, a mesma praticamente não sofre alterações após a construção do barramento, apresentando curvas de permanência muito próximas (Gráfico 10). Assim, conclui-se que mesmo não havendo modificações significativas nos padrões de vazões, ocorre uma redução da descarga sólida, indicando que a mesma apresenta outras dependências.

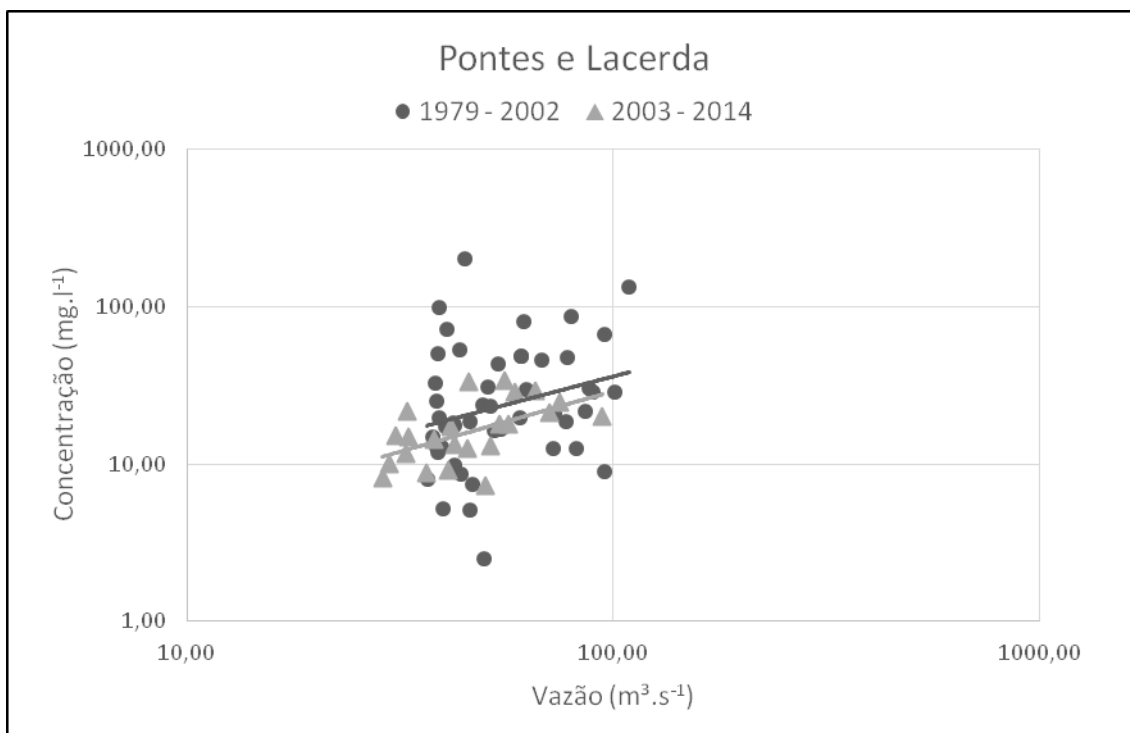


Gráfico 9. Curvas-chave de sedimento obtidas para a estação Pontes e Lacerda.

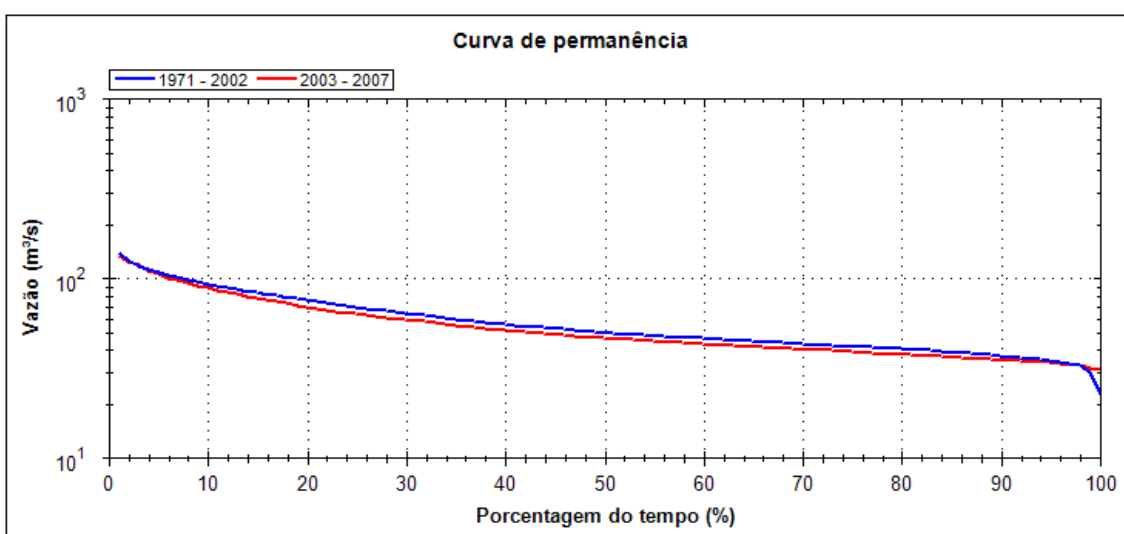


Gráfico 10. Curvas de permanência obtidas para a estação Pontes e Lacerda.

#### 5.1.1.6. Estação Colatina

A estação Colatina, localizada a jusante das UHEs Mascarenhas e Aimorés, possibilitou o estabelecimento de duas curvas-chave: uma já após a construção da UHE Mascarenhas, finalizada em 1974, no entanto, anterior à construção da UHE Aimorés, e outra após o término desta última, em 2005. Desta maneira, a primeira curva-chave foi construída com base em 56 amostragens realizadas no período entre 1976 e 2004, e a

segunda curva-chave estabelecida a partir de 12 amostras obtidas entre os anos de 2005 e 2012.

Apesar de alguns pontos pertencentes ao período pós-barramento ainda se concentrarem próximos aos pontos representativos do período pré-barramento, o Gráfico 11 indica que ocorre um deslocamento das concentrações de sedimento em suspensão, especialmente para as vazões mais baixas; pode-se estimar, entretanto, que as curvas-chave se cruzam na ocorrência de vazões mais altas. Ademais, observa-se uma redução no coeficiente de correlação dos dados de concentração e vazão após a construção do barramento, bem como um aumento no coeficiente de variação de Pearson da concentração, variando de 1,70 para 1,83, indicando uma maior dispersão dos dados de concentração.

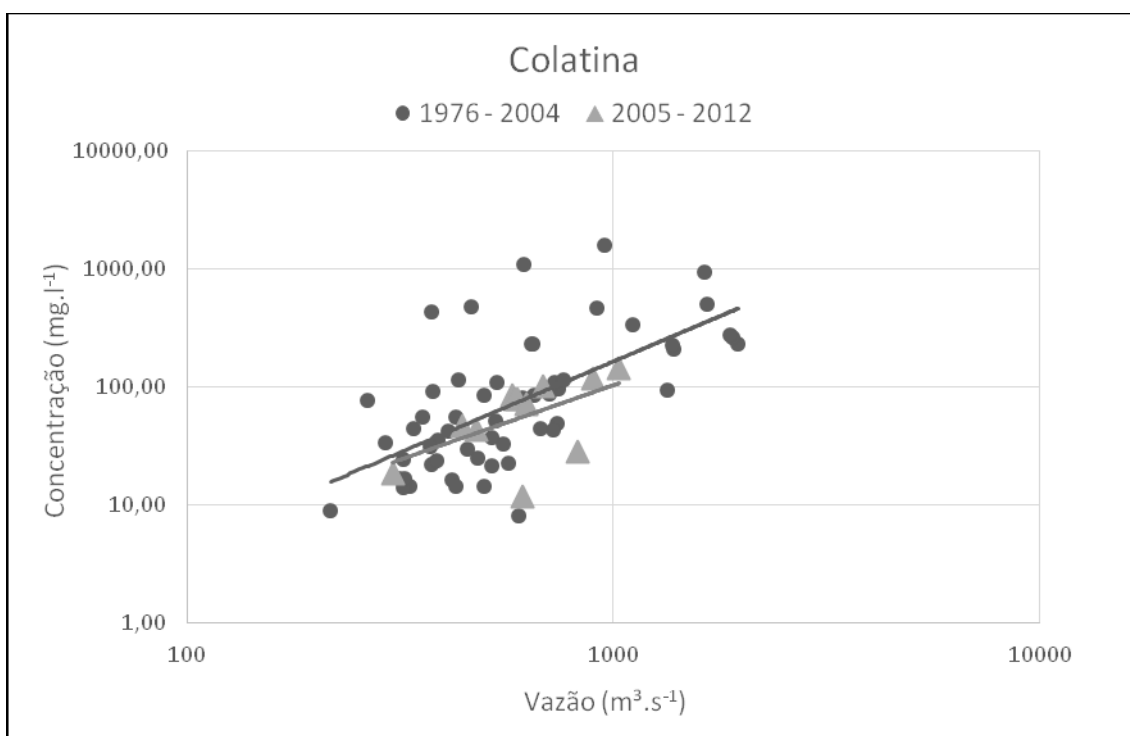


Gráfico 11. Curvas-chave de sedimento obtidas para a estação Colatina.

Considerando-se os padrões de descarga líquida (Gráfico 12), pode-se observar uma pequena rotação da curva de permanência, ocasionando um aumento das vazões máximas e uma redução das vazões mínimas do primeiro para o segundo período; a vazão média anual, no entanto, mantém-se quase inalterada, sofrendo uma redução de apenas 10%. Ressalta-se que para a obtenção da curva de permanência relativa ao período anterior à UHE Aimorés, optou-se por utilizar os dados após o ano de 1974, ano de implantação da UHE Mascarenhas, a montante.

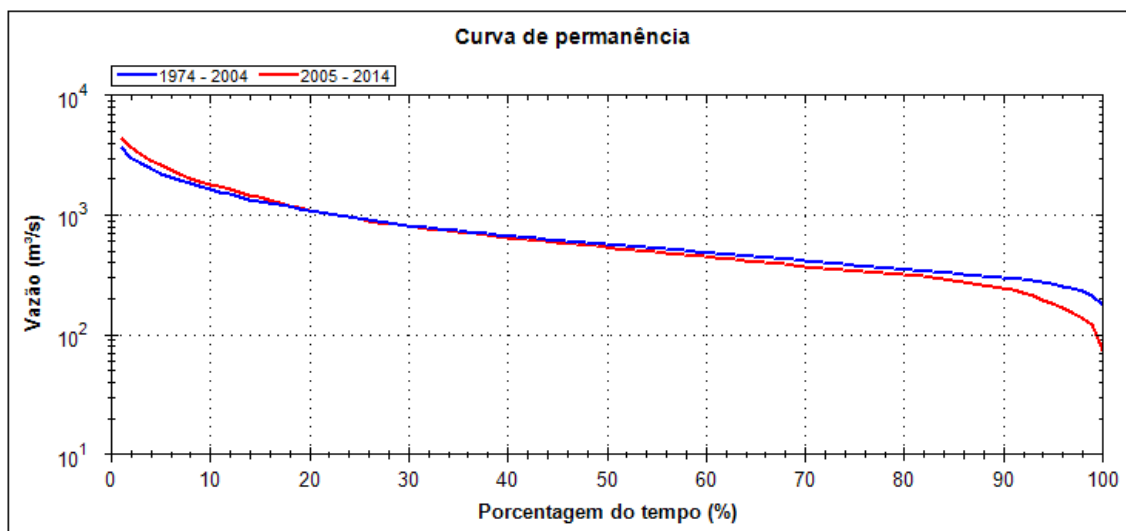


Gráfico 12. Curvas de permanência obtidas para a estação Colatina.

O deflúvio sólido médio anual estimado antes da construção da barragem foi de aproximadamente  $8,06 \times 10^6$  t.ano<sup>-1</sup>, o qual sofre uma redução de 33% após a implantação da mesma, passando a  $5,33 \times 10^6$  t.ano<sup>-1</sup>. A descarga sólida específica, em seu turno, varia de 105 para 69,7 t.ano<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup>.

Ressalva-se que, apesar da presença de outra usina, UHE Mascarenhas, localizada entre a estação Colatina e a UHE Aimorés, devido ao período de dados sedimentométricos disponíveis não é possível realizar a análise da sua influência no transporte de sedimentos em suspensão. A UHE Mascarenhas, no entanto, apresenta um porte significativamente menor que a UHE Aimorés com um reservatório de apenas 4 hm<sup>3</sup> alagando uma área de 3,9 km<sup>2</sup>, o que sugere um impacto reduzido na retenção dos sedimentos.

#### 5.1.1.7. Estação Porto FAE Novo

As curvas-chave ajustadas para estação Porto FAE Novo foram determinadas a partir de 46 amostragens, para o período referente aos anos 1979 a 2002, ou seja, anteriormente à implantação da UHE Quebra Queixo e através de 24 dados obtidos entre os anos de 2003 e 2014, após a construção da usina.

A análise do traçado das curvas-chave de sedimentos obtidas (Gráfico 13) mostra que para ambos os intervalos de tempo analisados os pontos permanecem em uma mesma nuvem, não indicando uma redução severa na concentração de sedimentos em suspensão. Este fato é comprovado através da análise do deflúvio sólido médio anual,

que apresenta uma redução de apenas 5%. Da mesma maneira, a descarga sólida específica, inicialmente estimada em  $15,74 \text{ t. ano}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$  é reduzida para  $14,85 \text{ t. ano}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ .

Apesar da localização das nuvens de pontos estarem sobrepostas, há uma redução de 50% no coeficiente de variação dos dados de concentração, indicando que no período pós-barramento os mesmos apresentam-se mais próximos do valor médio.

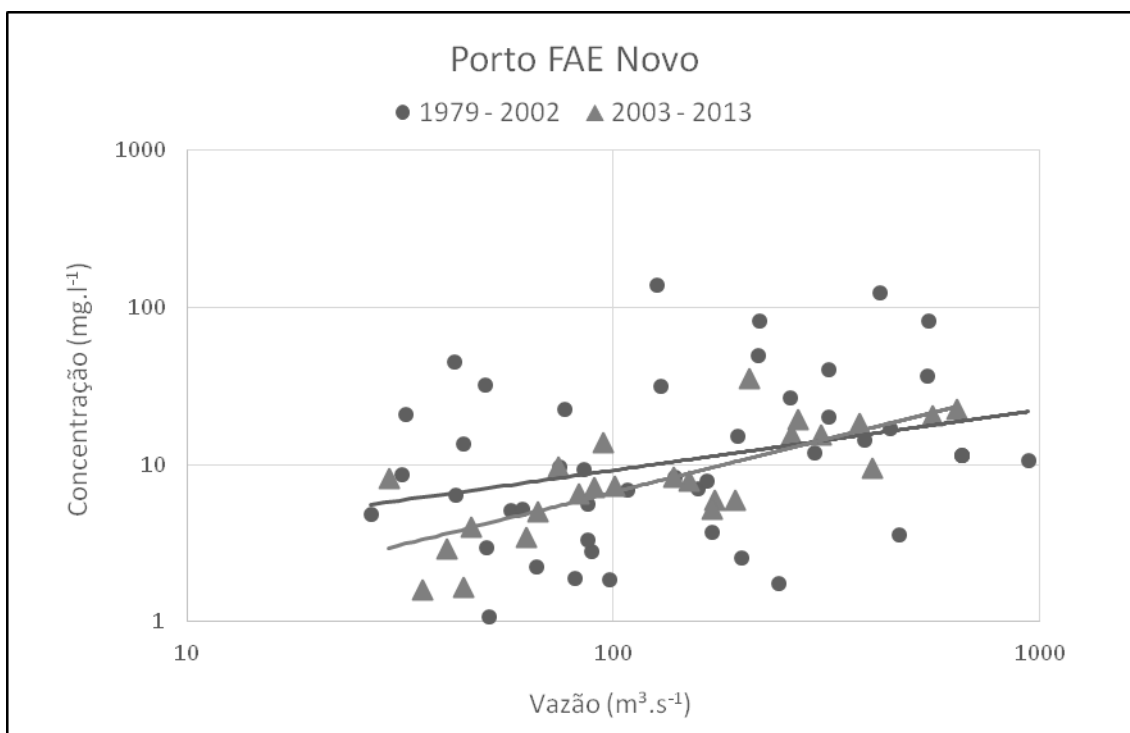


Gráfico 13. Curvas-chave de sedimentos obtidas para a estação Porto FAE Novo.

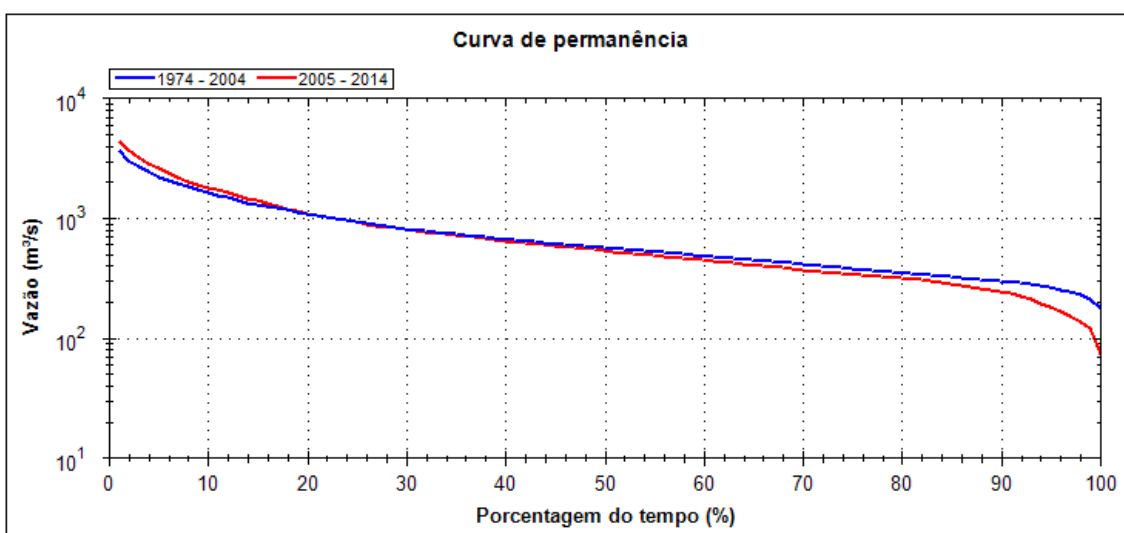


Gráfico 14. Curvas de permanência obtidas para a estação Porto FAE Novo.



Em relação aos padrões de descarga líquida (Gráfico 14), a curva de permanência para o período pós-barramento apresenta um pequeno alongamento, gerando um aumento das vazões máximas e uma redução das vazões mínimas.

O coeficiente de correlação entre os dados sofre um aumento significativo do primeiro para o segundo período, indicando uma maior dependência da concentração em relação à vazão. Entretanto, percebe-se que, apesar do aumento das vazões máximas, ainda ocorre uma redução no deflúvio sólido médio.

#### 5.1.1.8. Estação Iraí

A estação sedimentométrica Iraí localiza-se a jusante de um complexo de barramentos instalados ao longo do rio Uruguai, entretanto, devido às longas distâncias entre a estação e os barramentos, se torna difícil estimar os efeitos individuais e sucessivos de cada um dos mesmos, devido a fatores semelhantes àqueles apresentados na análise da estação Peixe. Desta maneira, para a estação Iraí optou-se por analisar o comportamento dos sedimentos em suspensão durante três diferentes intervalos de tempo: um período inicial entre os anos de 1979 e 1999, quando ainda não haviam empreendimentos hidrelétricos instalados neste curso de água – apesar de já existirem empreendimentos em seus afluentes, tais como a UHE Pery, instalada no rio Canoas desde 1965, e a PCH Forquilha no rio Forquilha, desde 1950. Um segundo período, entre os anos de 2000 e 2009, ao longo dos quais foram implementadas as UHEs Itá, Machadinho e Barra Grande. E, finalmente, um último período, de 2010 a 2013, após a construção da UHE Foz do Chapecó, a mais próxima da estação. Para obtenção destas curvas foram utilizadas, respectivamente, 18, 23 e 14 amostragens sedimentométricas. Ressalta-se que esta divisão em três períodos de tempo é possível para a estação Iraí, pois a UHE Foz do Chapecó, localizada logo a montante da mesma, era o empreendimento mais recente instalado no rio Uruguai (até o momento deste estudo).

A análise das curvas-chave de sedimentos obtidas (Gráfico 15), indica uma redução das concentrações de sedimentos em suspensão, especialmente na ocorrência de vazões mais baixas, tanto ao longo do segundo quanto do terceiro períodos em estudo. Quanto ao período entre os anos de 1979 e 1999, anterior à presença dos barramentos rio Uruguai, são notáveis tanto a pequena inclinação da curva-chave quanto a baixa dispersão dos dados de concentração. Ao longo dos anos em estudo, o coeficiente de correlação entre os dados de vazão e concentração de sedimentos, sofre um aumento

contínuo, terminando em 0,69 para o último período; isto pode indicar a maior capacidade de controle do transporte de sedimentos por parte da descarga líquida na região devido às modificações geradas pela instalação das quatro usinas hidrelétricas.

O coeficiente de variação de Pearson apresenta um padrão de comportamento interessante, inicialmente possui um valor de 0,51, passando a 0,81 no último período em estudo, entretanto, atingindo o seu máximo ao longo dos anos de construção e implantação das usinas hidrelétricas. Assim, percebe-se que as intervenções e modificações realizadas no curso de água durante a realização destas obras de engenharia também pode ocasionar alterações nos padrões de comportamento dos sedimentos fluviais.

Quanto ao regime de vazões do rio Uruguai no decorrer destes três períodos, apresentado no Gráfico 16, observa-se que não ocorrem diferenças significativas nas vazões altas, entretanto, a partir da  $Q_{20\%}$  nota-se um aumento gradual das mesmas.

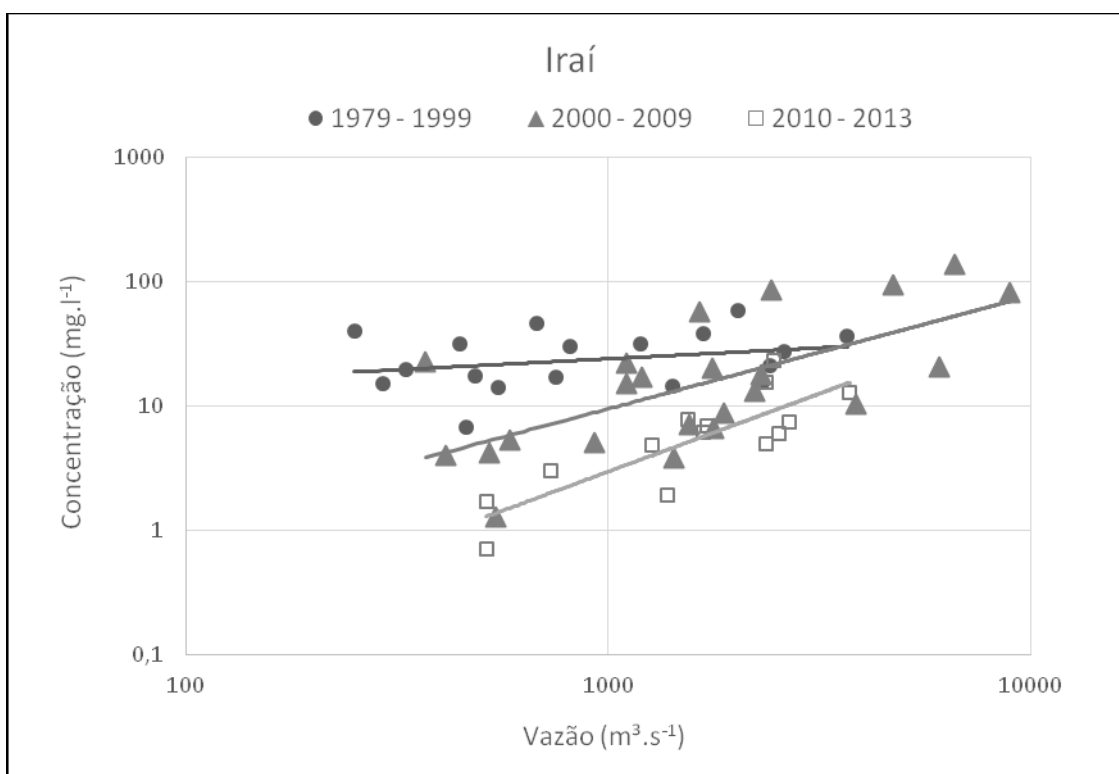


Gráfico 15. Curvas-chave de sedimentos obtidas para a estação Iraí.

Entre o primeiro e o segundo intervalos de tempo em estudo, o deflúvio sólido médio anual da estação apresenta-se constante, apesar da pequena elevação da vazão média anual. No terceiro e último período, após a implantação da UHE Foz do Chapecó, entretanto, apesar de haver um aumento maior da descarga líquida média, cerca de 18%,

ocorre uma redução da descarga sólida específica em cerca de 36%, variando de  $21,86 \text{ t.ano}^{-1}.\text{km}^{-2}$  para  $13,88 \text{ t.ano}^{-1}.\text{km}^{-2}$ . O deflúvio sólido médio anual segue o mesmo padrão de comportamento, passando de  $1,35 \times 10^6 \text{ t.ano}^{-1}$  para  $8,59 \times 10^5 \text{ t.ano}^{-1}$ .

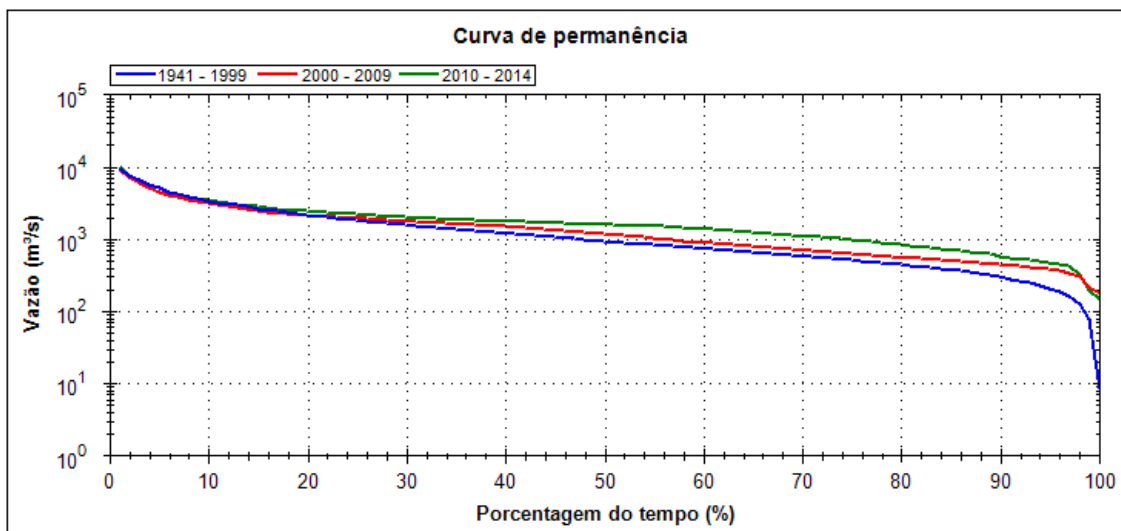


Gráfico 16. Curvas de permanência obtidas para a estação Iraí.

#### 5.1.1.9. Estação Dona Francisca

A estação Dona Francisca localiza-se a jusante de quatro reservatórios, sendo o mais próximo deles a UHE Dona Francisca, a 34 km de distância. Através dos dados sedimentométricos disponibilizados pela ANA, entretanto, somente é possível avaliar a concentração de sedimentos em suspensão antes e após a implantação do reservatório de Dona Francisca, ocorrida em 2001. Desta maneira, as análises realizadas para o período anterior à implantação desta usina já estão condicionadas à existência dos outros três reservatórios localizados à montante.

Analisando-se as curvas-chave obtidas (Gráfico 17), percebe-se que ocorre um deslocamento dos dados de concentração para a parte inferior do gráfico, refletindo a redução dos valores de concentração obtidos. Para o primeiro período em análise, entre os anos de 1978 e 2000, observa-se que a correlação entre os dados de vazão e concentração de sedimentos em suspensão é baixa ( $R^2 = 0,002$ ), aumentando para os anos de 2001 a 2014. O contrário ocorre com o coeficiente de variação de Pearson dos dados de concentração, o qual reduz de 1,30 para 0,52, refletindo uma menor dispersão dos dados em relação ao valor médio.

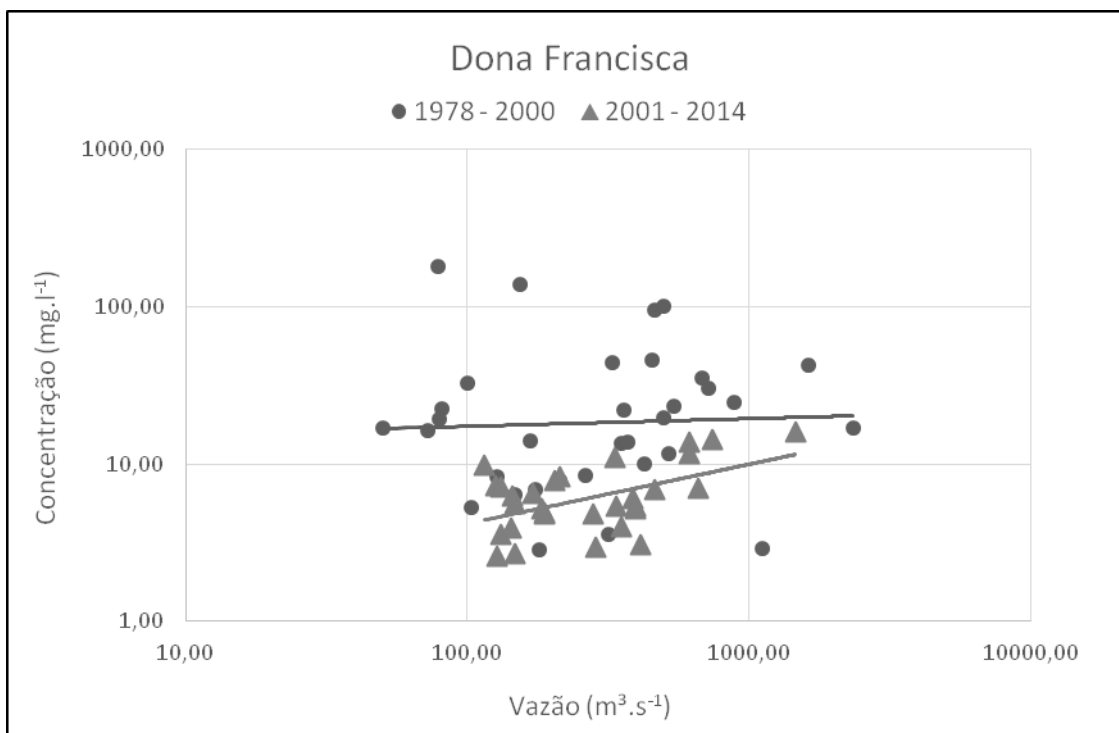


Gráfico 17. Curvas-chave de sedimentos obtidas para a estação Dona Francisca.

No caso da estação Dona Francisca, optou-se por realizar a análise da curva de permanência pré-barramento utilizando os dados disponíveis após a implantação das outras UHEs localizadas a montante da UHE Dona Francisca, visto que as mesmas possivelmente também provocaram alterações nos padrões de descarga líquida. As curvas de permanência de ambos os períodos em análise (Gráfico 18) apresentam-se muito próximas, havendo apenas um aumento do tempo de permanência das vazões mínimas. Desta maneira, apesar de ocorrerem alterações no padrão de descarga líquida, o deflúvio sólido médio anual apresenta uma redução de aproximadamente 58%, variando de  $2,43 \times 10^5$  para  $1,01 \times 10^5 \text{ t.ano}^{-1}$ , indicando que a descarga sólida em suspensão está relacionada com outros diversos fatores além da vazão, como esperado. A descarga sólida específica estimada para o período pré-barramento foi de 17,41 para  $7,26 \text{ t.ano}^{-1} \cdot \text{km}^2$ .

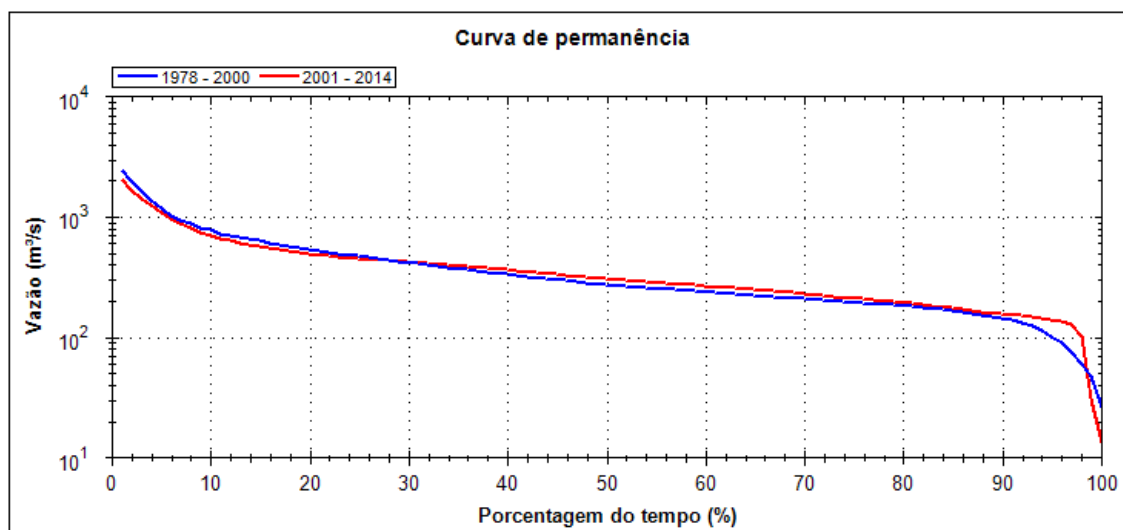


Gráfico 18. Curvas de permanência obtidas para a estação Dona Francisca.

#### 5.1.1.10. Estação Muçum

Assim como Peixe, Iraí e Dona Francisca, a estação Muçum também está, atualmente, localizada a jusante de um complexo de reservatórios artificiais, todos formados pela instalação de UHEs. Desta maneira, o primeiro período em estudo, entre 1979 e 2002, corresponde à situação do rio Taquari anteriormente à implantação de barramentos; o segundo período é determinado pela implantação da UHE Monte Claro em 2004; e o terceiro período é marcado pela entrada em operação das UHEs Castro Alves e 14 de Julho no ano de 2008. A análise das curvas-chave obtidas (Gráfico 19) mostra que tanto após a implantação da UHE Monte Claro, quanto das UHEs Castro Alves e 14 de Julho, ocorre uma redução das concentrações ocorrentes nas vazões menores e um aumento das concentrações para vazões maiores, resultando na modificação da inclinação das curvas.

As curvas de permanência obtidas para o rio Taquari no local da estação Muçum, não apresentam modificações bruscas ao longo dos intervalos de tempo em estudo, como pode ser observado no Gráfico 20. O deflúvio sólido médio anual apresenta uma elevação de cerca de 51% do primeiro para o segundo período, relativo a finalização do primeiro barramento e construção dos outros dois, e logo após uma redução de 43% após a finalização de todas as UHEs. A descarga sólida específica varia de  $12,97 \text{ t.ano}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$  para o período anterior à presença de todos os reservatórios, para  $26,73 \text{ t.ano}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$  entre os anos de 2004 e 2007 e finalmente passa a  $15,21 \text{ t.ano}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$  ao longo do último período.

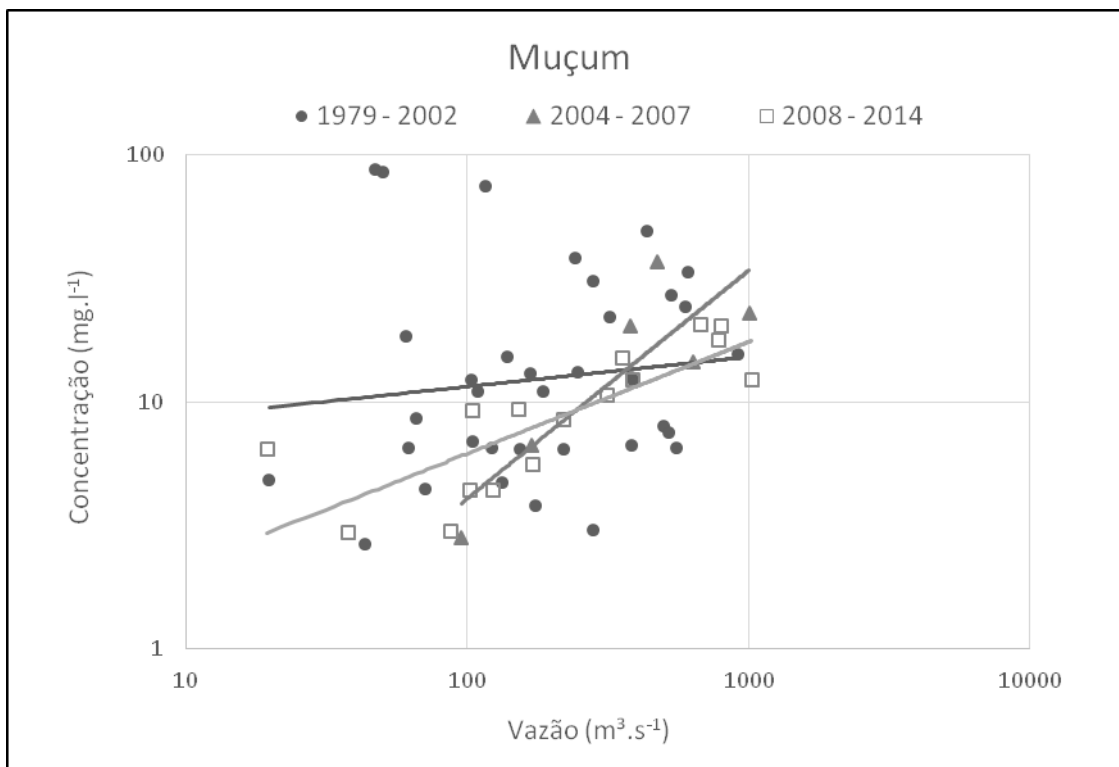


Gráfico 19. Curvas-chave de sedimentos obtidas para a estação Muçum.

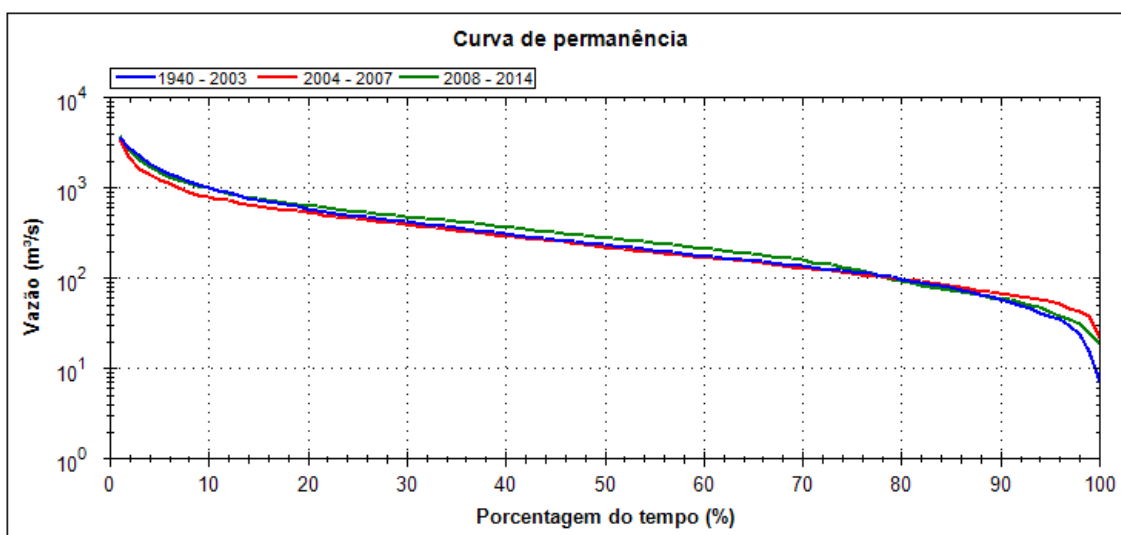


Gráfico 20. Curvas de permanência obtidas para a estação Muçum.

A Tabela 2 apresenta uma síntese dos resultados encontrados para as estações em estudo. Além dos períodos de dados utilizados e suas características, apresentam-se as vazões máximas e mínimas utilizadas para a obtenção das curvas-chave e aquelas

disponíveis nas séries de vazões diárias, utilizadas para o cálculo do deflúvio sólido médio anual.

Tabela 2. Resumo dos resultados obtidos após a análise dos dados sedimentométricos: curvas-chave (concentração), deflúvio sólido médio anual e produção específica de sedimentos.

Estação	Período de dados de sedimento	N	Curva-chave	Vazões de obtenção <sup>14</sup>	R <sup>2</sup>	P	Período de dados de vazão	Vazões de extrapolação <sup>15</sup>	Ds (t.ano <sup>-1</sup> )	Qesp (t.ano <sup>-1</sup> . km <sup>-2</sup> )	Aumento/redução de Ds (%)
Peixe Gordo	1994 -1997	7	$C_{ss} = 2,82930Q^{0,72300}$	$4 < Q < 19$	0,42	0,72	1961 - 2001	$0 < Q < 1700$	$1,13 \times 10^6$	23,79	-94
	2002 -2004	22	$C_{ss} = 1,13280Q^{0,66264}$	$6 < Q < 123$	0,17	0,96	2002 - 2014	$3 < Q < 992$	$7,52 \times 10^4$	1,57	
Porto Velho	1978 -2009	56	$C_{ss} = 0,01003Q^{1,04679}$	$3338 < Q < 48413$	0,51	1,15	1967 - 2010	$2228 < Q < 43991$	$2,42 \times 10^8$	248	+26
	2012 -2014	4	$C_{ss} = 0,00048Q^{1,36321}$	$4593 < Q < 31209$	0,89	0,80	2011 - 2013	$3078 < Q < 41630$	$3,29 \times 10^8$	337	
Peixe	1978 -2005	22	$C_{ss} = 0,00009Q^{1,82755}$	$799 < Q < 7031$	0,81	1,73	1971 - 2005	$318 < Q < 9430$	$2,01 \times 10^7$	157	-99
	2006 -2014	11	$C_{ss} = 1,40941Q^{0,14334}$	$773 < Q < 1896$	0,002	1,26	2006 - 2014	$415 < Q < 3012$	$1,66 \times 10^5$	1,30	

<sup>14</sup> Vazões máximas e mínimas registradas no momento da coleta das amostras de sedimentos em suspensão.

<sup>15</sup> Vazões máximas e mínimas obtidas através da curva de permanência do curso de água.



Estação	Período de dados de sedimento	N	Curva-chave	Vazões de obtenção <sup>14</sup>	R <sup>2</sup>	P	Período de dados de vazão	Vazões de extrapolação <sup>15</sup>	Ds (t.ano <sup>-1</sup> )	Qesp (t.ano <sup>-1</sup> · km <sup>-2</sup> )	Aumento/redução de Ds (%)
Miracema do Tocantins	1985 -1989	11	C <sub>ss</sub> = 0,00043Q <sup>1,54881</sup>	558 < Q < 4568	0,67	11,09	1969 -2002	366 < Q < 12200	1,91x10 <sup>7</sup>	103	-99
	2005 -2014	21	C <sub>ss</sub> = 0,44864Q <sup>0,25317</sup>	479 < Q < 3171	0,15	0,34	2003 -2013	393 < Q < 7178	1,72x10 <sup>5</sup>	0,93	
Pontes e Lacerda	1979 -2002	49	C <sub>ss</sub> = 1,34697Q <sup>0,71331</sup>	36 < Q < 109	0,06	1,05	1971 -2002	22 < Q < 137	4,91x10 <sup>4</sup>	16,43	-28
	2003 -2014	23	C <sub>ss</sub> = 0,84363Q <sup>0,76811</sup>	28 < Q < 94	0,29	0,45	2003 -2007	30 < Q < 134	3,51x10 <sup>4</sup>	11,76	
Colatina	1976 -2004	56	C <sub>ss</sub> = 0,00406Q <sup>1,53616</sup>	217 < Q < 1959	0,42	1,70	1974 -2004	175 < Q < 3697	8,06x10 <sup>6</sup>	105	-33
	2005 -2012	12	C <sub>ss</sub> = 0,01705Q <sup>1,26152</sup>	304 < Q < 1030	0,29	0,59	2005 -2014	72 < Q < 4434	5,33x10 <sup>6</sup>	69,77	
Porto FAE Novo	1979 -2002	46	C <sub>ss</sub> = 1,57389Q <sup>0,38314</sup>	27 < Q < 941	0,09	1,41	1979 -2002	5 < Q < 1180	8,74x10 <sup>4</sup>	15,74	-5
	2003 -2014	24	C <sub>ss</sub> = 0,30009Q <sup>0,67369</sup>	29 < Q < 639	0,57	0,77	2003 -2014	6 < Q < 1136	8,24 x 10 <sup>4</sup>	14,85	

Estação	Período de dados de sedimento	N	Curva-chave	Vazões de obtenção <sup>14</sup>	R <sup>2</sup>	P	Período de dados de vazão	Vazões de extrapolação <sup>15</sup>	Ds (t.ano <sup>-1</sup> )	Qesp (t.ano <sup>-1</sup> · km <sup>-2</sup> )	Aumento/redução de Ds (%)
Iraí	1979 -1999	18	C <sub>ss</sub> = 7,10167Q <sup>0,17654</sup>	251 < Q < 3673	0,07	0,51	1941 -1999	8 < Q < 9764	1,37x10 <sup>6</sup>	22,07	0
	2000 -2009	23	C <sub>ss</sub> = 0,01764Q <sup>0,91062</sup>	369 < Q < 8928	0,44	1,27	2000 -2009	174 < Q < 9272	1,35x10 <sup>6</sup>	21,86	-36
	2010 -2013	14	C <sub>ss</sub> = 0,00050Q <sup>1,25748</sup>	515 < Q < 3727	0,69	0,84	2010 -2014	146 < Q < 10269	8,59x10 <sup>5</sup>	13,87	
Dona Francisca	1978 -2000	34	C <sub>ss</sub> = 13,86565Q <sup>0,04854</sup>	50 < Q < 2339	0,002	1,30	1978 -2000	26 < Q < 2423	2,43x10 <sup>5</sup>	17,41	-58
	2003 -2014	30	C <sub>ss</sub> = 0,73243Q <sup>0,37770</sup>	115 < Q < 1458	0,25	0,52	2001 -2014	13 < Q < 2067	1,01x10 <sup>5</sup>	7,26	
Muçum	1979 -2002	36	C <sub>ss</sub> = 6,62730Q <sup>0,11984</sup>	19 < Q < 919	0,01	1,13	1940 -2003	5 < Q < 3110	2,07x10 <sup>5</sup>	12,97	+51
	2004 -2007	6	C <sub>ss</sub> = 0,05813Q <sup>0,92196</sup>	95 < Q < 1007	0,73	0,71	2004 -2007	21 < Q < 3403	4,27x10 <sup>5</sup>	26,73	-43
	2008 -2014	16	C <sub>ss</sub> = 0,77070Q <sup>0,45156</sup>	19 < Q < 1027	0,63	0,57	2008 -2014	18 < Q < 3692	2,43x10 <sup>5</sup>	15,21	

### ***5.1.2. Tipificação dos padrões de comportamento encontrados***

De uma maneira geral, percebe-se que as alterações de comportamento observadas na descarga sólida de sedimentos em suspensão e na descarga líquida, são condizentes com aquelas citadas na literatura (Williams e Wolman, 1984; Asselman, 2000; Brandt, 2000; Coelho, 2008; Siqueira et al., 2009). Quanto à redução na concentração de sedimentos em suspensão estimada e sua relação com as distâncias entre os barramentos e as estações de amostragem, não é possível observar uma correlação clara entre os dados. Para as estações Peixe e Miracema do Tocantins, as quais apresentam a mesma retenção de sedimentos, as distâncias são similares; o mesmo ocorre nas estações Colatina e Iraí. No caso das estações Peixe Gordo e Muçum, entretanto, apesar de as distâncias entre as estações e os barramentos serem semelhantes, as reduções no deflúvio sólido médio anual não seguem o mesmo padrão.

Após a análise individual das dez estações sedimentométricas em estudo, observa-se que é possível associá-las em quatro grupos quanto aos seus padrões de comportamento: (i) aumento da inclinação da curva-chave de sedimentos, (ii) redução da inclinação da curva-chave de sedimentos, (iii) deslocamento vertical da curva-chave de sedimentos, e (iv) curvas-chave de sedimentos com nuvens de pontos sobrepostas; os mesmos estão descritos a seguir.

#### ***5.1.2.1. Aumento da inclinação da curva-chave de sedimentos***

No caso da estação Muçum (entre os períodos 1979-2002 e 2004-2007) e da estação Iraí (entre os períodos 1979-1999 e 2000-2009), percebe-se que ocorre um aumento da inclinação da curva-chave, representada pelo coeficiente *b*. Assim, há uma elevação da concentração de sedimentos em suspensão no caso de vazões altas e uma redução para vazões baixas. Quanto à curva de permanência dos rios, é possível notar uma pequena redução da curva de permanência para as vazões altas e logo após uma elevação, que se mantém até as vazões mínimas. Para Muçum, este comportamento é observado após a implantação da UHE Monte Claro; já na estação Iraí, este comportamento ocorre entre o período inicial, sem a presença de barramentos no rio Uruguai, e o período ao longo da implantação das três usinas já citadas.

Para a estação Muçum, há inicialmente um aumento da concentração de sedimentos em suspensão ao longo do período de construção/implantação de barramentos,

provavelmente devido às alterações realizadas nos cursos de água durante estas obras de engenharia, e logo após há uma queda nos valores de descarga sólida. Estes resultados são compatíveis com aqueles obtidos por Brandt (2000) e Williams e Wolman (1984), os quais indicam que as alterações a jusante de barramentos podem ser identificadas também durante estes períodos, no entanto, os efeitos completos somente são observados após o fechamento total dos barramentos.

No caso da estação Iraí, as modificações observadas no coeficiente  $b$  da curva-chave de sedimentos são contrabalanceadas pela redução do coeficiente  $a$ , mantendo a descarga sólida constante entre os dois períodos. Neste caso, durante o segundo intervalo de tempo em estudo ocorre a construção/implantação de três barramentos a montante da estação, assim, é possível que as elevações e/ou reduções da descarga sólida de sedimentos ocorrentes tenham sido diluídas ao longo do intervalo de tempo análise; a análise da influência particular de cada um destes barramentos necessitaria da disponibilidade de dados a jusante de cada um dos mesmos.

#### 5.1.2.2. *Redução da inclinação da curva-chave de sedimentos*

Para as estações Peixe e Miracema do Tocantins, observam-se comportamentos muito semelhantes tanto nas modificações da curva-chave quanto na curva de permanência. As curvas-chave de sedimentos para o período anterior aos barramentos apresentam uma forte inclinação, com as concentrações de sedimento em suspensão sofrendo um aumento proporcional ao aumento da vazão. Após a implantação do barramento, entretanto, ocorre uma redução na inclinação das curvas-chave, sendo que os pontos concentram-se ao longo de uma linha quase horizontal, menos dispersos e menos dependentes da vazão. O padrão de descargas líquidas sofre uma redução das vazões máximas e um aumento das vazões mínimas.

#### 5.1.2.3. *Deslocamento vertical da curva-chave de sedimentos*

Em três estações, Peixe Gordo, Iraí (entre os períodos 2000-2009 e 2010-2013) e Dona Francisca, observa-se um deslocamento da curva-chave para a porção inferior do gráfico, refletindo uma redução da concentração de sedimentos em suspensão para todas as faixas de vazão. No caso de Peixe Gordo, observa-se uma brusca redução das vazões máximas e elevação das vazões a partir da  $Q_{40\%}$ ; a estação Dona Francisca possui comportamento semelhante, entretanto, com modificações não tão acentuadas; a estação

Iraí por sua, vez, do segundo para o terceiro período em estudo, apresenta uma manutenção das vazões maiores e logo em seguida uma elevação geral da curva de permanência. Este tipo de comportamento também já foi observado por Asselman (2000), o qual, a partir de dados sintéticos, associou este deslocamento da curva-chave à redução da descarga sólida do curso de água.

#### *5.1.2.4. Curvas-chave de sedimentos com nuvens de pontos sobrepostas*

Por fim, nota-se para algumas das estações que as nuvens de pontos obtidas para os períodos anterior e posterior à implantação do barramento apresentam-se sobrepostas, sem um deslocamento vertical significativo das curvas-chave, são elas: Porto Velho, Pontes e Lacerda, Colatina, Porto FAE Novo e Muçum (entre os períodos de 2004-2007 e 2008-2014). As curvas de permanência destas estações sofrem poucas modificações entre os períodos em análise, sendo que no caso das estações Porto FAE Novo e Colatina, ocorre o aumento das vazões máximas e a redução das vazões mais baixas.

No caso da estação Porto Velho, para o período pós-barramento ocorre um aumento significativo da inclinação da curva-chave (coeficiente  $b$ ), o qual reflete em uma elevação do deflúvio sólido médio anual, o mesmo comportamento observado para as estações Iraí e Muçum durante os períodos de construção/implantação dos barramentos a montante.

No restante das estações, ocorre uma redução do deflúvio sólido médio, as modificações observadas nos coeficientes das curvas-chave de sedimentos, no entanto, não são uniformes; para as estações Colatina e Muçum há uma redução do coeficiente  $b$  e um aumento do coeficiente  $a$ ; já para as estações Pontes e Lacerda e Porto FAE Novo, ocorre uma redução do coeficiente  $a$  e um aumento do coeficiente  $b$ , todavia o mesmo não é suficiente para ocasionar um aumento no deflúvio sólido médio no período pós-barramento como ocorre na estação Porto Velho.

#### *5.1.3. Comparação entre curvas-chave de sedimentos*

Como citado em 3.6, as curvas-chave de sedimentos também podem ser obtidas através da correlação direta entre a vazão e a descarga sólida em suspensão. Visando comparar os deflúvios sólidos médio anuais obtidos através destas curvas com aqueles obtidos através das curvas-chave de concentração de sedimentos, as mesmas foram traçadas utilizando a mesma metodologia. Neste caso, o deflúvio sólido médio anual é

obtido diretamente a partir da aplicação da curva-chave à curva de permanência do curso de água. Os gráficos das curvas-chaves obtidas estão apresentados no Apêndice A; pode-se observar que as curvas-chave de descarga sólida de sedimentos seguem os mesmos padrões de comportamento daqueles encontrados para as curvas-chave de concentração de sedimentos.

Como pode ser observado na Tabela 3, os valores de deflúvio sólido médio anual e, conseqüentemente, os de descarga sólida específica, estão muito próximos daqueles estimados através das curvas-chave de concentração de sedimentos em suspensão. As alterações observadas entre os intervalos de tempo pré e pós-barramento, no entanto, são rigorosamente iguais. Assim, percebe-se que o aumento dos coeficientes de correlação destas curvas-chave em relação àquelas obtidas através da concentração de sedimentos ocorre simplesmente devido à dependência da descarga sólida em relação a vazão.

Conclui-se então que a utilização destas curvas-chave de sedimentos pode gerar a apresentação de resultados tendenciosos ao leitor, entretanto, não ocorrem divergências em relação aos padrões de comportamento encontrados para curvas-chave de sedimentos obtidas através da concentração.

Tabela 3. Resumo dos resultados obtidos após a análise dos dados sedimentométricos: curvas-chave (descarga sólida), deflúvio sólido médio anual e produção específica de sedimentos.

Estação	Curva-chave	R <sup>2</sup>	P	Ds (t.ano <sup>-1</sup> )	Qesp (t.ano <sup>-1</sup> .km <sup>-2</sup> )	Aumento/ redução de Ds (%)
Peixe Gordo	$Q_{ss} = 0,24445Q^{1,72300}$	0,80	1,37	$1,16 \times 10^6$	24,30	-94
	$Q_{ss} = 0,09787Q^{1,66264}$	0,57	1,99	$5,51 \times 10^4$	1,15	
Porto Velho	$Q_{ss} = 0,00086Q^{2,04679}$	0,80	1,53	$2,43 \times 10^8$	$2,49 \times 10^2$	+26
	$Q_{ss} = 0,00004Q^{2,36321}$	0,96	0,88	$3,30 \times 10^8$	$3,38 \times 10^2$	
Peixe	$Q_{ss} = 0,000008Q^{2,82755}$	0,91	2,82	$2,04 \times 10^7$	$1,59 \times 10^2$	-99
	$Q_{ss} = 0,12177Q^{1,14334}$	0,15	1,20	$1,66 \times 10^5$	1,30	
Miracema	$Q_{ss} = 0,00003Q^{2,54881}$	0,85	1,49	$1,93 \times 10^7$	$1,04 \times 10^2$	-99

Estação	Curva-chave	R <sup>2</sup>	P	Ds (t.ano <sup>-1</sup> )	Qesp (t.ano <sup>-1</sup> .km <sup>-2</sup> )	Aumento/ redução de Ds (%)
	$Q_{SS} = 0,03876Q^{0,25317}$	0,81	0,80	$2,02 \times 10^5$	1,09	
Pontes e Lacerda	$Q_{SS} = 0,11637Q^{1,71331}$	0,29	1,22	$4,91 \times 10^4$	16,45	-28
	$Q_{SS} = 0,07289Q^{1,76811}$	0,69	0,67	$3,52 \times 10^4$	11,78	
Colatina	$Q_{SS} = 0,00035Q^{2,53616}$	0,66	1,95	$8,13 \times 10^6$	$1,06 \times 10^2$	-33
	$Q_{SS} = 0,00147Q^{2,26152}$	0,56	0,85	$5,38 \times 10^6$	70,52	
Porto FAE Novo	$Q_{SS} = 0,13598Q^{1,38314}$	0,58	1,84	$8,77 \times 10^4$	15,80	-5
	$Q_{SS} = 0,02592Q^{1,67369}$	0,89	1,38	$8,30 \times 10^4$	14,96	
Iraí	$Q_{SS} = 0,61358Q^{1,17654}$	0,78	1,06	$1,36 \times 10^6$	22,11	0
	$Q_{SS} = 0,00152Q^{1,91062}$	0,78	2,00	$1,36 \times 10^6$	22,05	-36
	$Q_{SS} = 0,00004Q^{2,25748}$	0,87	1,07	$8,75 \times 10^5$	14,06	
Dona Francisca	$Q_{SS} = 1,19799Q^{1,04854}$	0,47	1,33	$2,43 \times 10^5$	17,42	-58
	$Q_{SS} = 0,06328Q^{1,37770}$	0,81	1,56	$1,01 \times 10^5$	0,72	
Muçum	$Q_{SS} = 0,57259Q^{1,11984}$	0,56	1,19	$2,07 \times 10^5$	12,97	+51
	$Q_{SS} = 0,00502Q^{1,92196}$	0,92	0,91	$4,27 \times 10^5$	26,73	-43
	$Q_{SS} = 0,06658Q^{1,45156}$	0,94	1,21	$2,43 \times 10^5$	15,21	

## 5.2. Eficiência de retenção de sedimentos

A partir dos resultados obtidos para o deflúvio sólido médio anual, estimou-se a redução no aporte de sedimentos em suspensão após a implantação do barramento no canal fluvial. Estes resultados foram comparados com aqueles obtidos através da utilização do método de Brune, como pode ser visto na Tabela 4.

Para o cálculo da capacidade de afluência, utilizou-se como base a vazão média original do curso d'água, ou seja, aquela obtida anteriormente à implantação do barramento, como é usual nos estudos de previsão de assoreamento de reservatórios. No caso das áreas de estudo com mais de um barramento a montante da estação passíveis de serem analisados, foi considerado apenas o barramento mais a jusante para aplicação do método de Brune e posterior comparação dos resultados. Assim, no caso da área de estudo da estação Iraí, a eficiência de retenção calculada para o reservatório da UHE Foz do Chapecó foi comparada com a redução no aporte de sedimentos ocorrente entre o segundo e o terceiro períodos em análise; o mesmo raciocínio foi utilizado para a UHE 14 de Julho na área de estudo da estação Muçum.

No caso da UHE Santo Antônio, houve um aumento no deflúvio sólido médio anual, ou seja, os dados sedimentométricos indicam que não há retenção de sedimentos atualmente neste reservatório, conforme explicado em 5.1.1.2. Portanto, a eficiência de retenção com base nos dados sedimentométricos não foi estimada para esta usina. Além disto, exclusivamente para UHE Quebra Queixo não foi possível estimar a eficiência de retenção segundo o método de Brune, devido à ausência da informação sobre o volume do reservatório. Desta maneira, a comparação entre a eficiência de retenção estimada através dos dados sedimentométricos e a eficiência de retenção calculada através do método de Brune foi realizada para oito dos dez reservatórios em estudo.

Devido à falta de informação sobre a granulometria dos sedimentos nas áreas de estudo, a eficiência de retenção foi obtida sempre através da curva média de Brune. A diferença entre os resultados obtidos foi computada como sendo a subtração da eficiência de retenção a partir do método de Brune do valor de eficiência de retenção calculada.

Em suma, para cinco dos reservatórios, a eficiência de retenção estimada através dos dados sedimentométricos foi superior àquela calculada segundo o método de Brune. A maior diferença positiva ocorreu para os reservatórios da UHE Peixe Angical e da UHE 14 de Julho, os quais apresentaram uma eficiência de retenção calculada 25% maior. A maior diferença negativa, por sua vez, ocorreu para o reservatório da UHE Foz do Chapecó, sendo a retenção calculada 30% menor. Para os reservatórios Açude Castanhão e UHE Aimorés, os resultados foram muito semelhantes entre os dois métodos, sendo a diferença de apenas 3%.

No Gráfico 21, estão representadas as curvas de Brune, as eficiências de retenção calculadas por este método bem como aquelas obtidas através dos dados



sedimentométricos. Os pontos plotados a partir das eficiências de retenção estimadas para os reservatórios UHE Peixe Angical, UHE Luiz Eduardo Magalhães, UHE Guaporé, UHE Foz do Chapecó, UHE Dona Francisca e UHE 14 de Julho não localizaram-se no interior das envoltórias das curvas Brune, apresentando valores superiores ou inferiores. No caso da UHE Aimorés e do Açude Castanhão, a eficiência de retenção estimada aparece muito próxima da eficiência de retenção estimada por Brune.

Tabela 4. Comparação da eficiência de retenção obtida através do método de Brune com aquela calculada a partir dos dados sedimentométricos disponíveis para cada estação em estudo.

<b>Reservatório</b>	<b>Capacidade de afluência</b>	<b>Eficiência de retenção segundo Brune (%)</b>	<b>Eficiência de retenção calculada (%)</b>	<b>Diferença (%)</b>
Açude Castanhão	1,401	97	94	-3
UHE Santo Antônio	0,0000036	0	-	-
UHE Peixe Angical	0,049	74	99	+25
UHE Luiz Eduardo Magalhães	0,076	82	99	+17
UHE Guaporé	0,012	47	28	-19
UHE Aimorés	0,006	30	33	+3
UHE Quebra Queixo	-	-	5	-
UHE Foz do Chapecó	0,03	66	36	-30
UHE Dona Francisca	0,0025	17	58	+41
UHE 14 de Julho	0,0043	21	43	+22

Percebe-se que, com a reduzida amostra de reservatórios em estudo no presente trabalho, a maioria dos valores de eficiência de retenção estimados não são condizentes

com aqueles calculados através do método de Brune. Considerando-se que o método foi elaborado a partir da análise de apenas 44 reservatórios localizados nos Estados Unidos, nota-se a necessidade da elaboração de um método de avaliação da eficiência de retenção de sedimentos mais adequado às condições específicas de cada local.

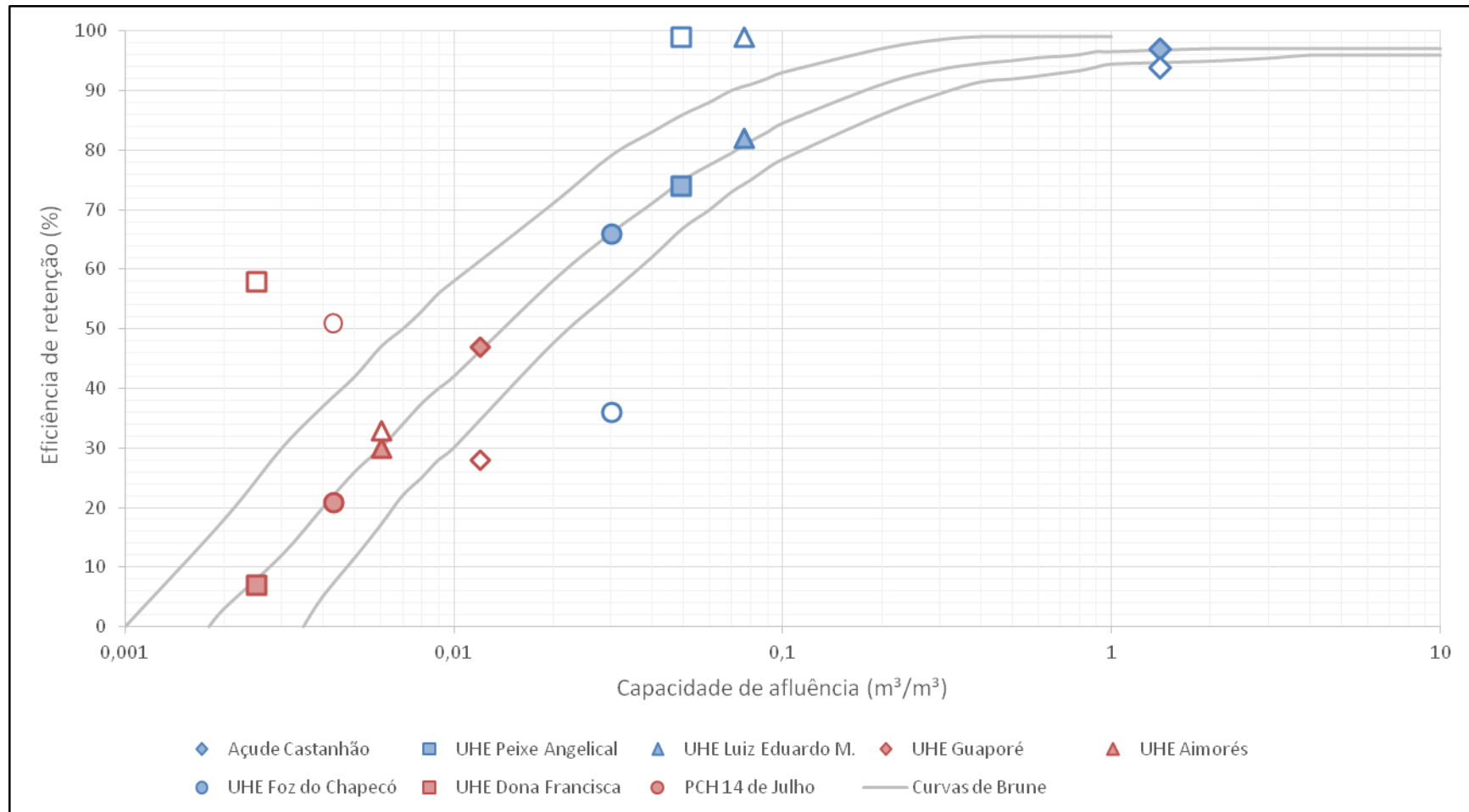


Gráfico 21. Comparação da eficiência de retenção obtida através do método de Brune com aquela calculada a partir dos dados sedimentométricos disponíveis para cada estação em estudo. Os pontos com preenchimento sólido branco representam as eficiências de retenção calculadas através da análise dos dados sedimentométricos; os pontos com preenchimento sólido com coloração representam os dados obtidos pelo método de Brune.

Visando fornecer uma análise preliminar para o desenvolvimento deste novo método, foram analisadas as correlações entre a eficiência de retenção de sedimentos e as principais características dos reservatórios: área, volume e capacidade de afluência, bem como a altura dos barramentos. A relação que apresentou o maior coeficiente de correlação,  $R^2 = 0,61$ , ocorreu entre a eficiência de retenção de sedimentos e a área dos reservatórios, como pode ser visto no Gráfico 22.

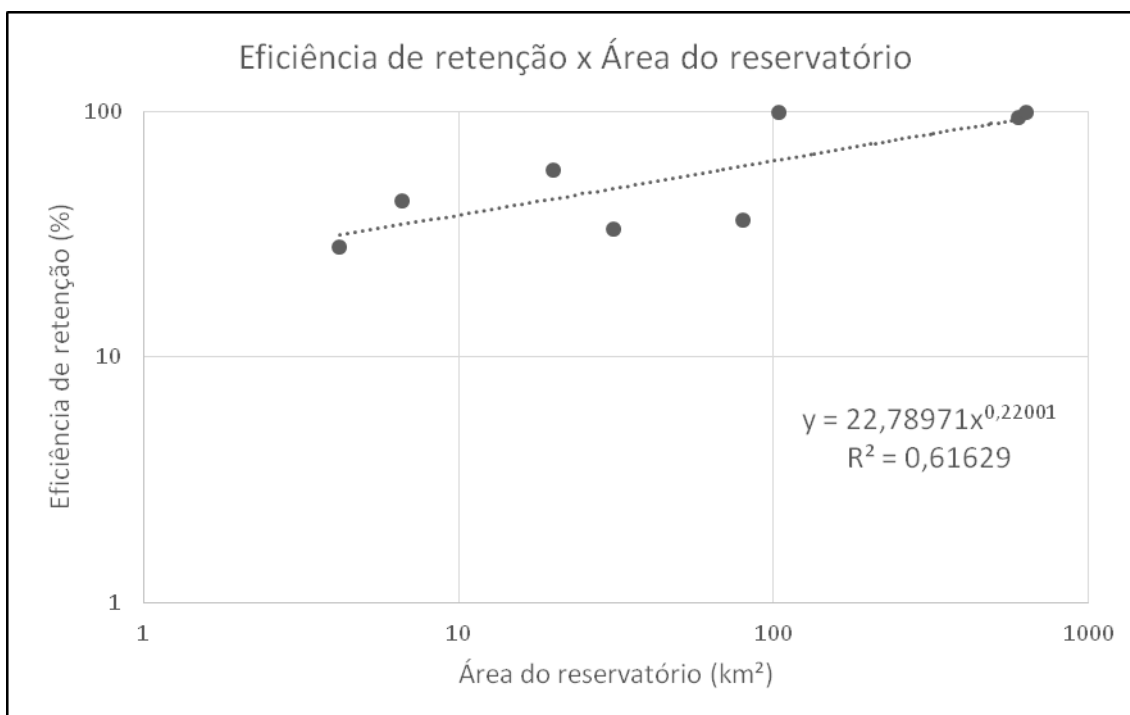


Gráfico 22. Relação observada entre a eficiência de retenção e a área dos reservatórios em estudo.

Esta, no entanto, é apenas uma análise preliminar e a correlação com outras características dos reservatórios e barramentos, bem como a possibilidade de ocorrência de correlações múltiplas devem ser avaliadas com maior enfoque em trabalhos futuros.

### 5.3.Limitações

Quanto às curvas-chave de sedimentos em suspensão elaboradas, as mesmas apresentam uma série de limitações quanto à sua aplicação. As limitações iniciam-se durante a amostragem dos sedimentos em suspensão, cuja confiabilidade depende da escolha do método adequado de medição e da correta amostragem laboratorial. Para toda amostragem de sedimentos em suspensão realizada, existe uma zona não amostrada, próxima ao leito do canal, a qual não é contabilizada; alguns métodos utilizados para o cálculo da descarga sólida total apresentam meios de correção desta falha. Ademais, as amostragens de sedimentos geralmente são realizadas na ocorrência de vazões baixas, por conseguinte, existe uma quantidade significativamente maior de valores nestas vazões, reduzindo a confiabilidade do uso das mesmas para os casos de vazões altas. Como citado por Bellinaso et al. (2007), a aplicação de curvas-chave de sedimentos para vazões altas pode gerar erros importantes na estimativa da produção de sedimentos. A única maneira de eliminar este erro seria através da obtenção de amostragens na ocorrência de vazões altas, ou seja, a parte superior da curva-chave.

Para determinados sistemas fluviais, pode ser possível o ajuste de mais de uma curva para diferentes faixas de vazão em um mesmo período de dados, observando-se a distribuição dos dados ao longo das faixas de vazões (CARVALHO, 2008). Este procedimento, no entanto, deve ser utilizado com cautela, visto que, dependendo da quantidade de dados disponíveis para o local, pode-se reduzir muito a confiabilidade da curva-chave. Não notou-se a necessidade de realização deste procedimento para os dados sedimentométricos analisados no presente trabalho.

Segundo Asselman (2000) as imprecisões do uso da curva-chave de sedimentos para estimativa da descarga sólida estão vinculadas ao método estatístico utilizado para obtenção da mesma e com a dispersão dos dados ao redor da linha de regressão.

Como citado por Bicalho (2006), outra imprecisão intrínseca à utilização de curvas-chave de sedimentos reside no fato de que as mesmas relacionam à concentração de sedimentos somente à descarga líquida, sendo que, na realidade, as mesmas também apresentam outras dependências, tais como a oferta de sedimentos mobilizados no curso de água, eventos anteriores, uso do solo, entre outros. Warrick (2014) sugere a análise também dos dados de precipitação visando identificar os padrões de alteração na oferta de sedimentos e descarga líquida.

Além disto, existe a possibilidade da existência de mais de uma curva-chave para os períodos em estudo, entendendo-se que as mesmas não estão somente relacionadas à retenção de sedimentos ocasionadas por barramentos, mas também com outros diversos fatores tais como alterações climáticas e modificações no uso do solo na bacia hidrográfica (BICALHO, 2006).

Em alguns casos, o comportamento e a tendência dos padrões de sedimentos de alguns sistemas fluviais podem ser tão complexos que a curva-chave não é capaz de descrevê-los propriamente, por conseguinte, faz-se necessária a utilização de outros métodos para obtenção de uma estimativa da descarga sólida. Apesar destas incertezas, a curva-chave é considerada um instrumento muito útil e de fácil entendimento (WARRICK, 2014), por isto ainda é largamente utilizada.

## 6. Conclusões e recomendações

### 6.1. Conclusões

Através da utilização de curvas-chave de sedimentos, procurou-se estimar as alterações no deflúvio sólido médio em estações sedimentométricas localizadas atualmente a jusante de barramentos no Brasil, comparando-se os períodos pré e pós implantação destas estruturas. Observa-se que a correlação entre os dados de concentração de sedimentos em suspensão e a vazão não apresentam um valor elevado para a maioria dos casos, o que reflete a aleatoriedade do fenômeno de transporte de sedimentos, visto que para cada valor de vazão é possível a ocorrência de mais de um valor de concentração de sedimentos.

Após a análise global dos dez casos em estudo, foi possível realizar a associação dos mesmos em quatro diferentes grupos, de acordo com as modificações observadas no comportamento das curvas-chave de sedimentos e das curvas de permanência: (i) redução da descarga sólida para vazões mínimas e aumento para as vazões máximas; (ii) redução da inclinação da curva-chave de sedimentos; (iii) deslocamento vertical da curva-chave de sedimentos; e (iv) curvas-chave de sedimentos com nuvens de pontos sobrepostas.

A comparação entre os valores estimados para o deflúvio sólido médio anual para os períodos pré e pós barramento, demonstrou que para a maioria dos casos há uma redução significativa no aporte de sedimentos a jusante. As maiores reduções, cerca de 99%, foram constatadas para os casos das UHEs Peixe Angical e Luiz Eduardo Magalhães, ambas no rio Tocantins. No caso da UHE Santo Antônio, observou-se um aumento no deflúvio sólido médio, fato que pode estar relacionado às altas taxas de erosão ocorrentes no rio Madeira, bem como o pequeno volume do reservatório da usina. De maneira geral, não foi possível observar uma correlação clara entre a distância da estação de amostragem e o barramento e as eficiências de retenção calculadas através dos dados sedimentométricos.

Para cada reservatório situado logo a montante da estação em estudo, também calculou-se a eficiência de retenção através do método de Brune. Estes valores foram comparados com as reduções encontradas nos deflúvios sólidos médios e, em quase

todos os casos, os valores de eficiência de retenção estimados a partir do deflúvio sólido médio foram superiores ou inferiores àqueles estimados pelo método de Brune, sugerindo a necessidade de estudos mais aprofundados sobre a questão e possivelmente a elaboração de um novo método de avaliação de retenção sedimentos adaptado às condições dos reservatórios do país. Uma análise preliminar dos dados utilizados neste estudo sugere a existência de uma função com elevado grau de correlação entre a eficiência de retenção e a área inundada dos reservatórios

Finalmente, os resultados de deflúvio sólido médio e descarga sólida específica obtidos através da utilização de curvas-chave de descarga sólida foram comparados com aqueles estimados a partir das curvas-chave de concentração de sedimentos. Os resultados mostram que, apesar do aumento significativo do coeficiente de correlação das curvas e dos valores de deflúvio ligeiramente diferentes encontrados, as alterações no aporte de sedimentos entre os períodos pré e pós-barramento são rigorosamente as mesmas.

Em suma, não se tem a pretensão de afirmar que as estimativas de deflúvio sólido e retenção de sedimentos aqui apresentadas refletem com exatidão a realidade do sistema fluvial, devido à grande quantidade de erros intrínsecos ao processo de elaboração de curvas-chave de sedimentos, entretanto, as mesmas são úteis por demonstrar que, mesmo em períodos de tempo relativamente curtos e/ou grandes distâncias das estações, é possível observar alterações nos padrões de comportamento do aporte de sedimentos a jusante de barramentos.

Finalmente, fica registrada a necessidade da realização de estudos mais aprofundados sobre a questão hidrossedimentológica no país, tendo em vista a importância do tema no contexto da gestão integrada dos recursos hídricos. A partir de agora, com a assinatura de uma resolução conjunta entre a ANA e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Resolução Conjunta N°3 de 10 de Agosto de 2010, a qual fornece as diretrizes para a realização dos monitoramentos pluviométricos, limnimétricos, fluviométricos e sedimentométricos, espera-se que ocorra uma melhora significativa na disponibilidade de dados e um consequente aumento do número de estudos sobre o tema no Brasil.



## **6.2.Recomendações para trabalhos futuros**

O presente trabalho utilizou para a estimativa do deflúvio sólido médio curvas-chave de sedimentos em suspensão elaboradas diretamente a partir dos dados de concentração de sedimentos e vazão, sem um tratamento estatístico posterior. Uma maneira de se avaliar a confiabilidade das curvas-chave estabelecidas reside na análise dos erros estimados, ou seja, a diferença entre o valor estimado através da curva-chave e aquele amostrado em campo. Após, se necessário, pode-se realizar um tratamento estatístico das curvas, como aqueles propostos por Ferguson (1986), Ferguson (1987) e Jansson (1985), que visam eliminar as subestimativas existentes quando as concentrações de sedimentos em suspensão são determinadas a partir da vazão utilizando o método dos mínimos quadrados. Outro método interessante de se avaliar as modificações que ocorrem nos aportes de sedimentos baseia-se na análise das variações das curvas de massa elaboradas através da vazão e a descarga sólida acumuladas.

Além disto, quando disponíveis dados de estações de amostragens localizadas tanto a montante quanto a jusante dos barramentos, esta análise pode fornecer dados complementares àqueles obtidos através da avaliação temporal do aporte de sedimentos.

Propõe-se também a análise mais aprofundada das características das áreas de estudo, incluindo clima, precipitação, uso do solo e granulometria dos sedimentos, visando encontrar uma correlação entre estes fatores e as modificações que ocorrem nas curvas-chave.

Por fim, sugere-se que, através da análise de dados provenientes de um maior número de reservatórios, observem-se as correlações existentes entre as características dos mesmos e a eficiência de retenção obtida através de dados sedimentométricos, visando o estabelecimento de uma nova lei de retenção de sedimentos adaptada às condições dos reservatórios do país.

## Referências bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Relatório de Segurança de Barragens [de] 2011**. Brasília, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira**. 2014. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/hotsite/hotsite\\_ver2/index.htm](http://www.aneel.gov.br/hotsite/hotsite_ver2/index.htm)>. Acesso em: 5 nov. 2014.

ANANDELE, G. W. Reservoir Sedimentation. **Developments in Water Science**, n. 29, New York: Elsevier: 1987.

ASSELMAN, N.E.M. Fitting and interpretation of sediment rating curves. **Journal of Hydrology**, n. 234, p. 228 – 248, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6502: Rochas e solos**. Rio de Janeiro, 1995.

BELLINASO, T.B.; DORNELLES, F.; GOLDENFUM, J.A. Avaliação de incertezas na determinação de curvas-chave de sedimentos ajustadas por mínimos quadrados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo. **Anais eletrônicos...** Porto Alegre: ABRH. Disponível em: <<http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=3&ID=19&PAG=10>>. Acesso em: 1 nov. 2014.

BICALHO, C.C. **Estudo do transporte de sedimentos na bacia do rio Descoberto**. 2006. 142 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2006.

BORDAS, M. P.; SEMMELMANN, F. R. Elementos de Engenharia de Sedimentos. In: TUCCI, C.E.M.(Ed.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2007. 943 p.

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

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretária de Recursos Hídricos. **Caderno da Região Hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental**. Brasília: MMA, 2006. 104 p.

- \_\_\_\_\_. **Caderno da Região Hidrográfica Amazônica**. Brasília: MMA, 2006. 124 p.
- \_\_\_\_\_. **Caderno da Região Hidrográfica do Tocantins-Araguaia**. Brasília: MMA, 2006. 132 p.
- \_\_\_\_\_. **Caderno da Região Hidrográfica do Atlântico Sudeste**. Brasília: MMA, 2006. 140 p.
- \_\_\_\_\_. **Caderno da Região Hidrográfica do Uruguai**. Brasília: MMA, 2006. 128 p.
- \_\_\_\_\_. **Caderno da Região Hidrográfica do Atlântico Sul**. Brasília: MMA, 2006. 128 p.
- BRIDGE, J. S. **Rivers and Floodplains**. Estados Unidos: Blackwell Science, 2005. 491 p.
- BRUNE, G.M. Trap Efficiency of Reservoirs. **Transactions of the American Geophysical Union**, v. 34, n. 3, p. 407 – 418, 1953.
- CÂMARA, H.A.; FROTA, F.H.S. A Barragem do Castanhão e sua Importância Sócio-econômica para Jaguaribara e o Estado do Ceará. **Revista do Mestrado Profissional em Planejamento em Políticas**. Universidade Estadual do Ceará, [s.d]. Disponível em: <<http://seer.uece.br/?journal=politicaspUBLICASemdebate&page=article&op=download&path%5B%5D=30&path%5B%5D=261>> Acesso em: 20 out. 2014.
- CARLSON, D.H.; PLUMMER, C.C.; HAMMERSLEY, L. **Physical Geology: Earth Revealed**. New York: McGraw-Hill, 2011. 644 p.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 599 p.
- CARVALHO, N.O.; FILIZOLA JÚNIOR, N.P.; SANTOS, P.M.C.; LIMA, J.E.F.W. **Guia de práticas sedimentométricas**. BRASÍLIA: ANEEL, 95 p, 2000a.
- \_\_\_\_\_. **Guia de avaliação de assoreamento em reservatórios**. BRASÍLIA: ANEEL, 107 p., 2000b.
- CHILDS, M. **Literature survey: the impacts of dams on river channel geomorphology**. University of Hull, 2010.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Blucher, 1980. 188 p.
- CHURCHILL M.A. **Discussion of “Analysis and Use of Reservoir Sedimentation Data”, Proceedings of Federal Interagency sedimentation Conference**. Estados Unidos, Denver, p. 139-140, 1948.

CIA ENERGÉTICA RIO DAS ANTAS - CERAN. **Geração de Energia**. 2008.

Disponível em: <[http://www.ceran.com.br/session/viewPage/pageId/60/language/pt\\_BR/](http://www.ceran.com.br/session/viewPage/pageId/60/language/pt_BR/)>.

Acesso em: 5 nov. 2014.

COELHO, A. L. N. Geomorfologia fluvial de rios impactados por barragens. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 9, n. 26, p. 16-32, jun. 2008.

COLBY, B.R. **Fluvial sediments** –a Summary of Source, Transportation, Deposition, and Measurement of Sediment Discharge. USGS Bulletin: 1181-A, 1963. 47 p. Disponível em <<http://pubs.er.usgs.gov/publication/b1181A>>. Acesso em: 10 set. 2014.

COMPANHIA ENERGÉTICA CHAPECÓ. **UHE Quebra Queixo Dados Técnicos**.

2010. Disponível em: <<http://www.uhequebraqueixo.com.br/dados.htm>>. Acesso em: 5 nov.2014.

CORTEZ, J.R.; PINHEIRO, M.C.; BAPTSTA, M.B. Desempenho de modelos numéricos em estudos de assoreamento de reservatórios – Estudo na UHE Aimorés. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais Eletrônicos...** Porto Alegre: ABRH. Disponível em:

<<http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=3&ID=155&PAG=3>>. Acesso em: 5 nov. 2014.

DI SILVIO, G. River Processes in Upland Watersheds. In: BRUK, S.; ZEBIDI, H. (Ed.). **Reservoir Sedimentation - Proceedings of the St. Petersburg Workshop**. Paris: UNESCO, 1996.

EDWARDS, T.K.; GLYSSON, G.D. Field Methods for Measurement of Fluvial Sediment. Open-file Report 86-531. Virginia: US Geological Survey, 1999.

ENERGIAS DE PORTUGAL – EDP. **Dados técnicos UHE Luiz Eduardo Magalhães**. 2012.

Disponível em: <<http://www.edp.com.br/geracao- renovaveis/geracao/tocantins/investco/a-usina/dados- tecnicos/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 5 nov. 2014.

ENGEHIDRO ENGENHARIA LTDA. **UHE Peixe Angical**. Disponível em:

<<http://www.engehidroengenharia.com.br/htmls/principaisProjetos.htm>>. Acesso em: 5 nov. 2014.

FERGUSON, R.I. River loads underestimated by rating curves. **Water Resources Research**, v.22, p.74-76, 1986.

- FERGUSSON, R.I. Accuracy and precision of methods for estimating river loads. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.12, p.95-104, 1987.
- FURNAS Centrais Elétricas S.A – FURNAS. **Sistema Furnas de Geração e Transmissão**. 2013. Disponível em:  
<[http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina\\_hidr\\_peixe.asp](http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina_hidr_peixe.asp)>. Acesso em: 5 nov. 2014.
- GLYSSON, G. D. **Sediment-transport curves**. Virginia: US Geological Survey, 1987.
- GRAF, W.L. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. **Geomorphology**, v. 79, p. 336 – 360, 2006.
- GUIMARÃES, V. S. **Rede hidrometeorológica nacional. In: Seminário Estadual do setor Público Catarinense para a Prospecção e Identificação de Demandas em Pesquisas e Serviços Ambientais**. Florianópolis, 2011. Disponível em:  
[http://circam.epagri.sc.gov.br/circam\\_arquivos/arquivos/portal/imprensa/seminario/palestra\\_valde\\_mar.pdf](http://circam.epagri.sc.gov.br/circam_arquivos/arquivos/portal/imprensa/seminario/palestra_valde_mar.pdf). Acesso em: 23 jun. 2014.
- HASSAN, S. I. K. A. A. Suspended sediment rating curve for Tigris River upstream Al-Amarah Barrage. **International Journal of Advanced Research**, v. 2, p. 624-629, 2014.
- HICKIN, E. J. **River Geomorphology**. Chichester: Wiley & Sons, 1995. 255 p.
- HOWARD, A.; DOLAN, R. Geomorphology of the Colorado River in the Grand Canyon. **Journal of Geology**, v. 89, n. 3, p. 269-298, 1981.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS – ICOLD. **Dams & The World's Water** – An Educational Book that Explains how Dams Help to Manage the World's Water. 2008.
- JANSON, M. A comparison of detransformed logarithmic regressions and power function regressions. **Geografiska Annaler** 67A, p. 61-70, 1985.
- KHANCHOU, K.; ALTSCHUL, R.; ASSASI, F. Estimating suspended sediment yield, sedimentation controls and impacts in the Mellah Catchment of Northern Algeria. **Arab J Geosci**, v. 2, p. 257 – 271, 2009.
- KUMMU, M.; VARIS, O. Sediment-related impacts due to upstream reservoir trapping, the Lower Mekong River. **Geomorphology**, v. 85, p. 275 – 293, 2007.

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

MAGILLIGAN, F.J.; NISLOW, K.H. Changes in hydrologic regime by dams. **Geomorphology**, v.71, p. 61-78, 2005.

MAYNARI, W. V. **Impactos Ambientais a Jusante de Hidrelétricas – O caso da usina de Tucuruí, PA.** 2007. 211 f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético e Ambiental) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MCCARTNEY, M. Living with dams: managing the environmental impacts. **Water Policy**, v. 11, supplement 1, p. 121 – 139, 2009.

MORISAWA, M. **Streams their dynamic and morphology.** New York: McGraw-Hill, 1968. 175 p.

MORRIS, G. L. Reservoirs and Sediment Management. *In*: BRUK, S.; ZEBIDI, H. (Ed.). **Reservoir Sedimentation - Proceedings of the St. Petersburg Workshop.** Paris: UNESCO, 1996.

MORRIS, G. L.; ANNANDALE, G.; HOTCHKISS, R. Reservoir Sedimentation. *In*: GARCÍA, M. (Ed.). **Sedimentation Engineering – Processes, Measurements, Modeling and Practice** (ASCE Manual and Reports on Engineering Practice No. 110). Virginia: American Society of Civil Engineerings, 2008. 1132 p.

MORRIS, G.L.; FAN, J. **Reservoir Sedimentation Handbook.** New York: McGraw Hill, 1998. 805 p.

PETTS, G. E. **Impounded Rivers: perspectives for ecological management.** Chichester: John Wiley, 1984. 366 p.

PEVIANI, M. A. An initial approach to the state of art on sediment processes in mountain watersheds. *In*: BRUK, S.; ZEBIDI, H. (Ed.). **Reservoir Sedimentation - Proceedings of the St. Petersburg Workshop.** Paris: UNESCO, 1996.

RIBEIRO, B. M. G. **Efeitos das barragens no transporte sedimentar fluvial.** 2009. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

RODRIGUES, L. M.; SCHWARZBOLD, A.; OLIVEIRA, M. A. Spatial and temporal variation of Dona Francisca reservoir (Jacuí river, Rio Grande do Sul State), a subtropical reservoir.

**Acta Scientiarum. Biological Sciences**, v. 34, n. 3, p. 279-288, 2012. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil.

SCHUMM S. A. Variability of the Fluvial System in Space and Time. *In*: RISSER, P. G. **Spatial and Temporal Variability of Biospheric and Geospheric Processes: Research Needed to Determine Interactions with Global Environmental Change**. Paris: International Council of Scientific Unions Press, 1986. 53 p. Disponível em: <<http://www.scopenvironment.org/downloadpubs/scope35/preface.html>>. Acesso em: 25 set. 2014.

SENTÜRK, F. **Hydraulics of dams and reservoirs**. Colorado: Water Resources Publications, 1994. 788 p.

SIQUEIRA, A. G.; AZEVEDO, A. A.; SOUZA, L.A.P.; SILVA, M. **Modificações fluviais à jusante de barragens**. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Rio de Janeiro, 2013. **Anais...** São Paulo: ABGE, 2013.

SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION. **Determination of fluvial sediment discharge, Report No. 14**. Minnesota: Inter-Agency Committee on Water Resources, 1963.

\_\_\_\_\_. **Measurement of the sediment discharge of streams, Report 8**. Iowa: Inter-Agency Committee on Water Resources, 1948.

SYVITSKI, J.P.; MOREHEAD, M.D.; BAHR, D.B.; MULDER, T. Estimating fluvial sediment transport: The rating parameters. **Water Resources Research**, v. 36, n. 9, p. 2747-2760, 2000.

THOMS, M.T., WALKER, K.F. Channel changes associated with two adjacent weirs on a regulated lowland alluvial river. **Regul. Rivers**, v. 8, p. 271–284, 1993.

TRAN, V. T. T. **AN analysis of the suspended sediment rating curve parameters in the upper Mississippi river basin at the monthly and annual levels**. Master's Thesis, University of Tennessee, 2014. Disponível em: <[http://trace.tennessee.edu/utk\\_gradthes/2854](http://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/2854)>. Acesso em 10 nov. 2014.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Channel stability assessment for flood control projects**. Washington, 1994. 133 p.

VANONI, V.A. **Sedimentation Engineering**. New York: ASCE, 1977. 745 p.

WALLING, D. E.; FANG, D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. **Global and Planetary Change**, 39, p. 111 – 126, 2003.

WARRICK, J.A. Trend analyses with river sediment rating curves. **Hydrological processes**. USA: John Wiley and Sons, 2014.

WILLIAMS, G. P.; WOLMAN, M.G. **Down stream effects of dams on alluvial rivers**. Geological Survey Professional Paper, 1286. US Geological Survey: Washington, 1984.

YANG, X. **Manual on Sediment Management and Measurement**. World Meteorological Organization, Operational Hydrology n. 47, WMO-No. 948, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2003.



**Apêndice A** – Curvas-chave de sedimentos geradas a partir da descarga sólida.