

## **ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA GRANULOMETRIA DOS SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO E SEU POTENCIAL DE TRANSPORTE DE NUTRIENTES/POLUENTES POR ADSORÇÃO, NOS POSTOS MONITORADOS PELA ITAIPU BINACIONAL**

*Anderson Braga Mendes<sup>1</sup>; Cícero Medeiros da Silva<sup>2</sup>; Edelbert Eynng<sup>3</sup>, Bruna Montanari<sup>4</sup>; Mauricio Ribeiro de Jesus Júnior<sup>5</sup>*

**RESUMO** --- O presente artigo utilizou dados históricos do monitoramento sedimentométrico realizado pela Itaipu Binacional no âmbito do Programa Cultivando Água Boa. Para 13 dos 15 postos monitorados buscou-se investigar as relações existentes entre a capacidade do sedimento em suspensão em transportar nutrientes e/ou poluentes por adsorção, a composição granulométrica desse sedimento ao longo do ciclo hidrológico e sua concentração. Observou-se que para todos os postos analisados as correlações se mostraram extremamente satisfatórias, além de ter sido possível identificar claros padrões granulométricos para os períodos de cheias em quase todos os postos sob estudo. Considerando que o maior transporte de nutrientes/poluentes adsorvidos aos sedimentos em suspensão ocorre durante as cheias, os resultados obtidos até o momento são úteis para subsidiar estudos futuros de quantificação de variáveis limnológicas de uma forma mais simples e econômica.

**ABSTRACT** --- This article has used historical data of the sediment monitoring performed by Itaipu Binacional through the Cultivating Good Water Program. For 13 of the 15 monitored stations it was aimed to investigate the relationships between the ability of the suspended sediment to carry adsorbed nutrients and/or pollutants, the grain characteristics of such sediment through the hydrological cycle and its concentration. It was observed that for all the stations analyzed the correlations were extremely reasonable, besides the fact that it was possible to identify clear granulometric patterns for flood periods at nearly all the stations under study. By considering that most of the transport of nutrients/pollutants adsorbed on the sediment take place during flood events, the results achieved hitherto are useful in order to subsidy future studies on the quantification of limnological variables in a simpler and more economical way.

**Palavras-chave:** Sedimentos em suspensão, granulometria, adsorção de nutrientes/poluentes

---

<sup>1</sup> Engenheiro civil, MSc; ITAIPU Binacional. Av. Pres. Tancredo Neves, 6731, CEP 85866-900, Foz do Iguaçu, PR; [abragam@itaipu.gov.br](mailto:abragam@itaipu.gov.br)

<sup>2</sup> Téc. Biociências; ITAIPU Binacional. Av. Pres. Tancredo Neves, 6731, CEP 85866-900, Foz do Iguaçu, PR; [cicero@itaipu.gov.br](mailto:cicero@itaipu.gov.br)

<sup>3</sup> Téc. Biociências; ITAIPU Binacional. Av. Pres. Tancredo Neves, 6731, CEP 85866-900, Foz do Iguaçu, PR; [edelbert@itaipu.gov.br](mailto:edelbert@itaipu.gov.br)

<sup>4</sup> Acadêmica Eng. Ambiental; ITAIPU Binacional. Av. Pres. Tancredo Neves, 6731, CEP 85866-900, Foz do Iguaçu, PR; [brunamon@itaipu.gov.br](mailto:brunamon@itaipu.gov.br)

<sup>5</sup> Acadêmico Eng. Ambiental; ITAIPU Binacional. Av. Pres. Tancredo Neves, 6731, CEP 85866-900, Foz do Iguaçu, PR; [mrjir@itaipu.gov.br](mailto:mrjir@itaipu.gov.br)

## INTRODUÇÃO

O presente trabalho é fruto de quatro anos de intensa pesquisa desenvolvida pela equipe responsável pelas amostragens, análises e estudos sedimentológicos da Divisão de Reservatório da ITAIPU Binacional. Ele contou com a associação de registros automáticos horários de níveis d'água (e conseqüentemente vazão, pelo uso de curva-chave) e dados de análises laboratoriais de amostras pontuais de sedimentos em suspensão com vistas a subsidiar futuros estudos limnológicos.

Conforme já mostrado em Mendes *et. al.* (2012), existe boa correlação entre a produção de sedimentos em suspensão em determinada bacia hidrográfica com a concentração de fosfatos totais na água; para alguns postos, o valor de  $R^2$  é superior a 0,92. Uma vez que é mais simples e econômico realizar levantamentos sedimentométricos em vez que limnológicos, associar as concentrações de sedimentos em suspensão com as de fosfatos totais mostrou-se de suma importância como subsídio para os estudos de qualidade de água desenvolvidos pela Itaipu Binacional. Desse modo, complementarmente, buscou-se dar seqüência nesses estudos de maneira mais detalhada, investigando a relação existente entre a capacidade do sedimento em suspensão em transportar nutrientes e/ou poluentes por adsorção, a composição granulométrica desse sedimento ao longo do ciclo hidrológico e a sua concentração.

Destaca-se que na atual pesquisa, além de adotar métodos laboratoriais clássicos, utilizou-se um analisador de partículas por difração de laser, adquirido pela Entidade em 2010. Ele fornece informações da distribuição granulométrica de cada amostra segundo 32 diferentes faixas – grãos de 0,0011 mm a 0,2301 mm de diâmetro. Dado que os dados de saída desse analisador a laser não são apresentados em  $\text{mg.L}^{-1}$ , mas sim em microlitros por litro ( $\mu\text{L.L}^{-1}$ ), buscou-se correlacionar essa variável à área superficial dos grãos de sedimento na amostra (em  $\text{cm}^2$ ), também levantada pelo analisador de partículas por laser. Preferiu-se evitar correlações entre a área superficial dos grãos e a concentração de sedimentos em suspensão em  $\text{mg.L}^{-1}$ , já que para converter  $\mu\text{L.L}^{-1}$  em  $\text{mg.L}^{-1}$  é necessário conhecer o peso específico seco dos sedimentos contidos em cada amostra, o qual pode diferir muito do valor usualmente empregado ( $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$ ) (Lee, 2003) dependendo da estação de medição, do ciclo hidrológico, das porcentagens de finos em suspensão na ocasião da coleta e do local na bacia onde os sedimentos são produzidos.

Para fins deste estudo, o histórico de vazões empregado abrangeu desde a instalação de cada posto até 31/12/2013. Quanto aos dados granulométricos, adotou-se o histórico desde 2010, data da aquisição do analisador a laser. Não se considerou dados do ano 2014, pois nem todos os postos apresentavam dados já consolidados até a data de fechamento deste artigo.

## MONITORAMENTO SEDIMENTOMÉTRICO

A ITAIPU Binacional, no âmbito da Divisão de Reservatório, realiza o monitoramento sedimentométrico em 15 postos, sendo que nove deles estão na área de influência direta do empreendimento; os demais se localizam na área de influência indireta (quatro a montante da região do remanso do lago de Itaipu, um a jusante da barragem e um no Canal da Piracema. A grande maioria das estações (14) conta com monitoramento horário do nível d'água e da concentração de sedimentos em suspensão através de equipamentos automáticos instalados em campo (sensores de nível d'água e turbidímetros, respectivamente). Somando-se as áreas de influência direta e indireta do empreendimento, contabiliza-se 150.900 km<sup>2</sup> de área de drenagem, estando aproximadamente 90% desse total monitorado (136.000 km<sup>2</sup>) (Mendes, 2010).

A Figura 1 ilustra a rede de monitoramento sedimentométrico da Itaipu Binacional, a qual abrange os Estados brasileiros do Paraná e Mato Grosso do Sul, bem como o Paraguai na margem direita do reservatório. O ponto mais a jusante da área de cobertura é o ponto de monitoramento 100 metros a jusante do barramento da hidrelétrica de Itaipu, sendo o mais a montante o trecho de jusante das hidrelétricas Eng. Sérgio Motta (Porto Primavera) e Rosana, controladas pela CESP e Duke Energy, respectivamente.

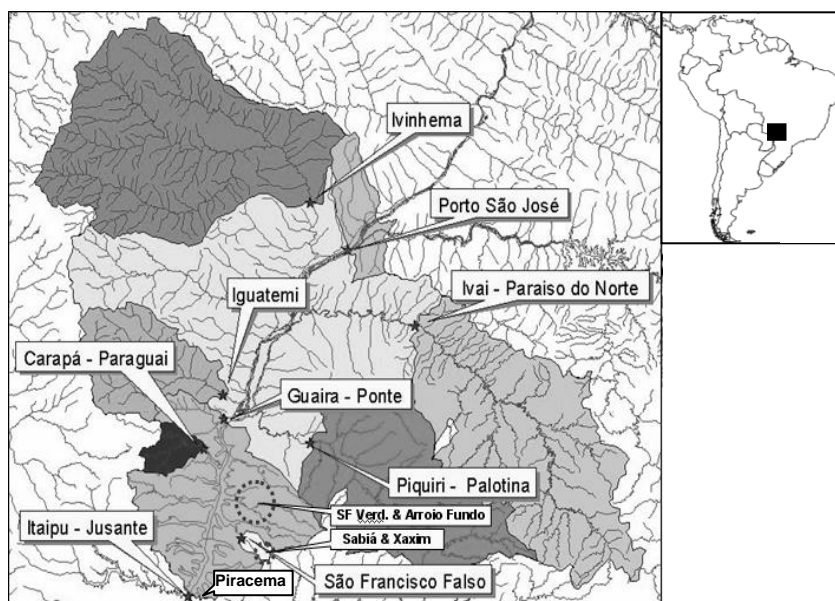


Figura 1 – Localização dos 15 postos de monitoramento sedimentométrico da ITAIPU Binacional (em Guaira-Ponte são 2 postos: Guairá-MS e Guairá-PR) (Mendes *et al.*, 2011)

O monitoramento sedimentométrico realizado pela Itaipu Binacional, no âmbito do Programa Cultivando Água Boa, conta com três procedimentos distintos para coleta de informações em campo: turbidímetros e sensores de níveis d'água automáticos, coletas pontuais e amostragem

clássica por igual incremento de largura, essa última conforme descrito em Carvalho (2008). Entretanto, para o presente trabalho foram empregados apenas os resultados obtidos pelo método de coleta pontual de amostras.

A Itaipu Binacional mantém contrato com amostradores de campo residentes nos locais onde estão instalados os sensores automáticos. Semanalmente esses colaboradores fazem uma coleta pontual de superfície em garrafas especiais com capacidade de um litro no ponto da seção transversal do rio onde os equipamentos estão instalados. Ademais, nos eventos de cheias há coleta de amostras adicionais, independentemente de quando eles ocorram, uma vez que até 90% de toda a descarga sólida anual em uma seção transversal pode ser transportada durante os poucos meses das cheias (Tornes, 1986). Todas as amostras coletadas são acondicionadas em caixas de madeira opacas para que a luminosidade não promova a proliferação de algas. Na ocasião das campanhas de campo bimestrais, as garrafas com as coletas pontuais são recolhidas e analisadas no laboratório de sedimentologia da Itaipu Binacional. As variáveis investigadas e incorporadas ao banco de dados são turbidez, concentração de sedimentos em suspensão e granulometria do material suspenso, essa última obtida por analisador de partículas por difração de laser (Figura 2). Frequentemente é feita análise de uma mesma amostra tanto pelo método a laser quanto pelo tubo de remoção pela base de forma a verificar alguma possível descalibração do analisador de partículas.



Figura 2 – Analisador de partículas por difração de laser

## **COMPORTAMENTO GRANULOMÉTRICO DA DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO PARA CADA POSTO EM ANÁLISE**

Dentre os 15 postos de monitoramento sedimentométrico da Itaipu Binacional, apenas aqueles instalados no Canal da Piracema e em Itaipu-Jusante não serão aqui abordados por suas descargas sólidas serem advindas exclusivamente do lago de Itaipu, e não de áreas de drenagem. A seguir serão exibidas, para cada estação e de forma sucinta, informações técnicas e os gráficos de concentração de sedimentos em suspensão *versus* área superficial dos grãos, bem como a

variabilidade existente entre material fino e areias ao longo do ciclo hidrológico. De forma complementar, também é exibida a curva de permanência para cada estação; assim, é possível identificar a partir de qual vazão os percentuais de finos e areias no sedimento em suspensão passam a seguir uma tendência.

## Sabiá

Dentre os postos analisados, aquele instalado no córrego Sabiá, no Estado do Paraná, é o que apresenta menor área de drenagem: 9,88 km<sup>2</sup>. Está inserido na bacia do rio São Francisco Falso, nas coordenadas (25° 06' 50,18" S; 54° 00' 39,33" W). Por se tratar de um rio de cabeceira, apresenta baixo tempo de concentração.

O posto foi instalado em junho/2005, estando em operação até hoje. Desde 2010 (início das análises granulométricas por tecnologia laser) até 2013, foram realizadas 175 amostragens pontuais. A vazão média na estação é 0,25 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> (2005-2013), com oscilação do nível d'água desde 0,12 m (08/11/2007 às 8:00 h; Q=0,02 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) até 2,45 m (26/04/2007 às 4:00 h; Q=164,80 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) em relação ao zero da régua limnimétrica. A concentração de sedimentos em suspensão média anual é 144 mg.L<sup>-1</sup> (2005-2013).

A Figura 3 exibe a curva de permanência de vazões para o posto em questão, a correlação existente entre a concentração de sedimentos em suspensão (em µL.L<sup>-1</sup>) e a área superficial dos grãos (em cm<sup>2</sup>), bem como o comportamento do material fino e das areias em suspensão para vários valores de vazão registrados no posto ao longo do histórico considerado.

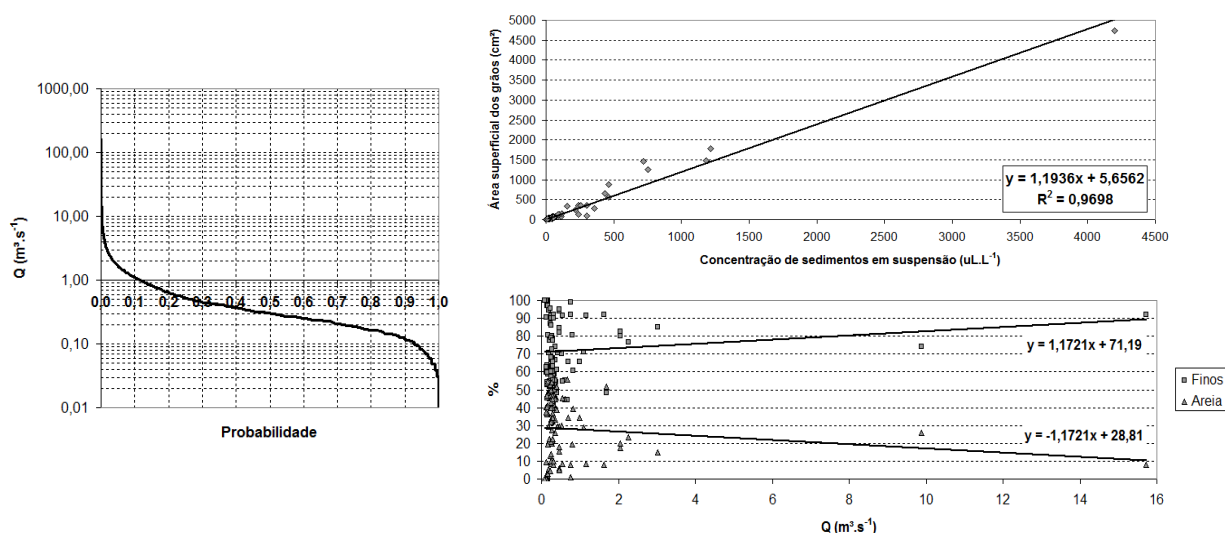


Figura 3 – Posto Sabiá. À esquerda: curva de permanência de vazões. À direita, acima: gráfico concentração de sedimentos em suspensão (em µL.L<sup>-1</sup>) versus área superficial dos grãos (cm<sup>2</sup>); À

direita, abaixo: comportamento dos percentuais de finos e areias na descarga sólida em suspensão para diferentes vazões.

Pela análise dos gráficos da Figura 3, nota-se que a granulometria do material em suspensão é muito variável na ocasião de baixas vazões, não sendo possível identificar um padrão. O que pode ser inferido é que, a partir de aproximadamente  $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  – vazões com probabilidade de ocorrência de 3% no histórico considerado (cerca de 11 dias ao ano) –, há um aumento gradual da participação dos finos na descarga em suspensão, fato a ser ratificado com mais coletas em períodos de cheia.

Sobre a capacidade de transporte de nutrientes e/ou poluentes por adsorção, nota-se que é possível utilizar a concentração volumétrica dos sedimentos em suspensão para essa quantificação, dada a excelente correlação encontrada ( $R^2 \approx 0,97$ ). Obviamente, é necessário realizar mais coletas durante períodos de altas vazões para confirmar a tendência encontrada.

### Xaxim

O posto instalado no córrego Xaxim, Estado do Paraná, possui área de drenagem  $35,81 \text{ km}^2$ . Também está inserido na bacia do rio São Francisco Falso, nas coordenadas ( $25^\circ 05' 51,4'' \text{ S}$ ;  $53^\circ 57' 14,0'' \text{ W}$ ). Também apresenta baixo tempo de concentração.

O posto foi instalado em julho/2005, estando ainda em operação. De 2010 até 2013 foram realizadas 229 amostragens pontuais. A vazão média na estação é  $0,45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (2005-2013), com oscilação do nível d'água desde  $0,09 \text{ m}$  (06/11/2007 às 4:00 h;  $Q=0,17 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) até  $2,30 \text{ m}$  (08/01/2013 às 12:00 h;  $Q=73,53 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) em relação ao zero da régua limnimétrica. A concentração de sedimentos em suspensão média anual é  $114 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (2005-2013).

A Figura 4 exibe a curva de permanência de vazões para o posto Xaxim, a correlação existente entre a concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ ) e a área superficial dos grãos (em  $\text{cm}^2$ ), bem como o comportamento do material fino e das areias em suspensão para vários valores de vazão registrados no posto ao longo do histórico considerado.

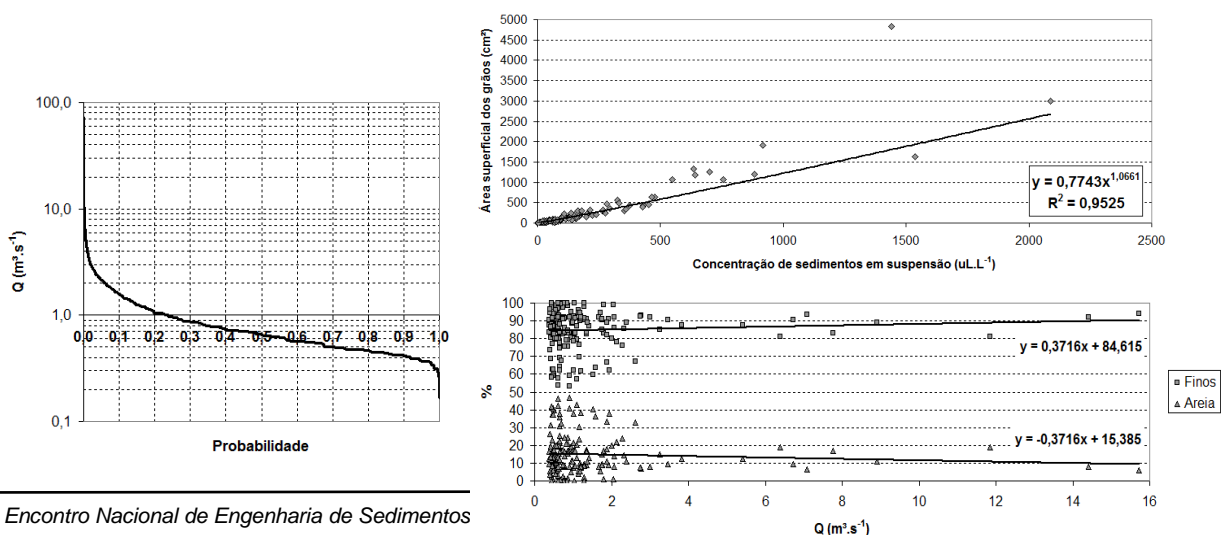


Figura 4 – Posto Xaxim. À esquerda: curva de permanência de vazões. À direita, acima: gráfico concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) *versus* área superficial dos grãos ( $\text{cm}^2$ ); À direita, abaixo: comportamento dos percentuais de finos e areias na descarga sólida em suspensão para diferentes vazões.

No caso do Xaxim, um maior número de coletas durante períodos de cheias permitiu identificar que para vazões superiores a  $2 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , as quais são observadas durante 6% do histórico (aproximadamente 22 dias por ano), ocorre uma clara e gradual redução da participação das areias na descarga sólida em suspensão, o oposto sendo observado para os finos.

O fato da curva concentração de sedimentos em suspensão *versus* área superficial dos grãos mostrar-se melhor ajustada na forma de potência ( $R^2 \approx 0,95$ ) indica que o potencial de transporte de compostos por adsorção nos grãos na ocasião de cheias é ligeiramente maior no Xaxim que no Sabiá, pois esse último exibe um menor percentual de finos na descarga em suspensão.

### **Arroio Fundo**

O posto instalado no córrego Arroio Fundo, Estado do Paraná, possui área de drenagem  $163,20 \text{ km}^2$ . Integra a bacia do rio São Francisco Verdadeiro, localizado nas coordenadas ( $24^\circ 37' 05,98'' \text{ S}$ ;  $54^\circ 10' 21,77'' \text{ W}$ ). Também apresenta baixo tempo de concentração, embora superior ao dos dois postos anteriormente analisados.

O posto foi instalado em junho/2006 e ainda está em operação. Desde 2010 (início das análises granulométricas por tecnologia laser) até 2013, foram realizadas 177 amostragens pontuais de sedimentos em suspensão. A vazão média na estação é  $1,36 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (2006-2013), com oscilação do nível d'água desde  $0,09 \text{ m}$  (04/02/2007 às 23:00 h;  $Q=0,08 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) até  $4,28 \text{ m}$  (19/08/2011 às 18:00 h;  $Q=63,73 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) em relação ao zero da régua limnimétrica. A concentração de sedimentos em suspensão média anual é  $163 \text{ mg.L}^{-1}$  (2006-2013).

A Figura 5 exibe a curva de permanência de vazões para o posto Arroio Fundo, a correlação existente entre a concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) e a área superficial dos grãos (em  $\text{cm}^2$ ), bem como o comportamento do material fino e das areias em suspensão para vários valores de vazão registrados no posto ao longo do histórico considerado.

No Arroio Fundo as frações granulométricas do sedimento em suspensão são bem definidas. Para vazões até  $3 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (82% do histórico; 300 dias por ano) os finos integram entre 80 e 100% da descarga sólida em suspensão, enquanto as areias estão compreendidas entre 0 e 20%. Para vazões

superiores, observa-se uma segregação ainda mais acentuada, sendo o percentual das areias bem reduzido em eventos de cheia.

A curva concentração de sedimentos *versus* área superficial dos grãos ( $R^2 \approx 0,95$ ) ratifica a grande participação dos finos na descarga em suspensão, já que exibe valores exponencialmente crescentes de área superficial dos grãos mesmo para concentrações não tão elevadas – os finos possuem peso específico menor que as areias, porém área superficial maior. Por esse motivo, para vazões mais elevadas o potencial de transporte de compostos por adsorção nos grãos aumenta exponencialmente.

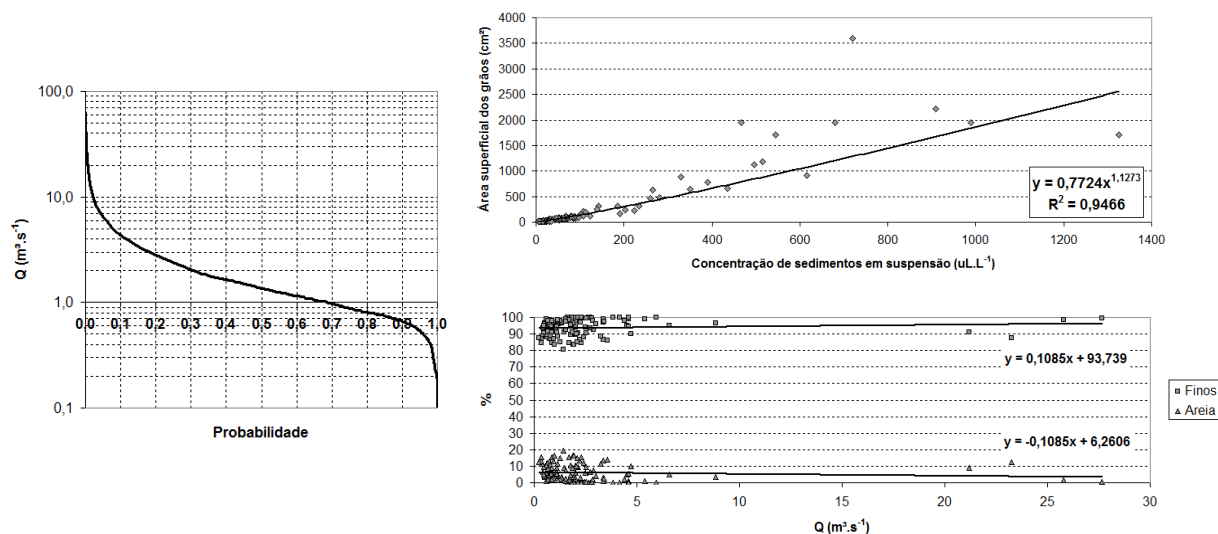


Figura 5 – Posto Arroio Fundo. À esquerda: curva de permanência de vazões. À direita, acima: gráfico concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) *versus* área superficial dos grãos ( $\text{cm}^2$ ); À direita, abaixo: comportamento dos percentuais de finos e areias na descarga sólida em suspensão para diferentes vazões.

### São Francisco Falso

O posto está instalado no médio curso do rio São Francisco Falso, Estado do Paraná, e possui área de drenagem  $501,4 \text{ km}^2$ . Está localizado nas coordenadas ( $24^\circ 59' 35,89'' \text{ S}$ ;  $54^\circ 07' 48,46'' \text{ W}$ ).

O posto já existia antes do início do monitoramento sedimentométrico (janeiro/2001) e ainda está em operação. Ao longo dos últimos quatro anos do histórico (2010-2013) foram realizadas 202 amostragens pontuais de sedimentos em suspensão. A vazão média na estação é  $10,54 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (2001-2013), com oscilação do nível d'água desde  $0,01 \text{ m}$  (18/04/2012 às 14:00 h;  $Q=0,30 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) até  $9,33 \text{ m}$  (08/01/2013 às 16:00 h;  $Q=697,94 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) em relação ao zero da régua limnométrica. A concentração de sedimentos em suspensão média anual é  $220 \text{ mg.L}^{-1}$  (2001-2013).



A Figura 6 exibe a curva de permanência de vazões para o posto São Francisco Falso, a correlação existente entre a concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) e a área superficial dos grãos (em  $\text{cm}^2$ ), bem como o comportamento do material fino e das areias em suspensão para vários valores de vazão registrados no posto ao longo do histórico considerado.

Para esta estação é possível concluir que a composição granulométrica é muito variável nos períodos de estiagem, não sendo possível estabelecer um padrão de comportamento. Entretanto, nota-se que a partir de  $30 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  – cerca de 5% do histórico (18 dias ao ano) – os percentuais de finos e areias permanecem praticamente imutáveis (86% e 14%, respectivamente).

Também foi possível um bom ajuste para a curva que correlaciona a concentração dos sedimentos em suspensão e sua área superficial total ( $R^2 \approx 0,96$ ).

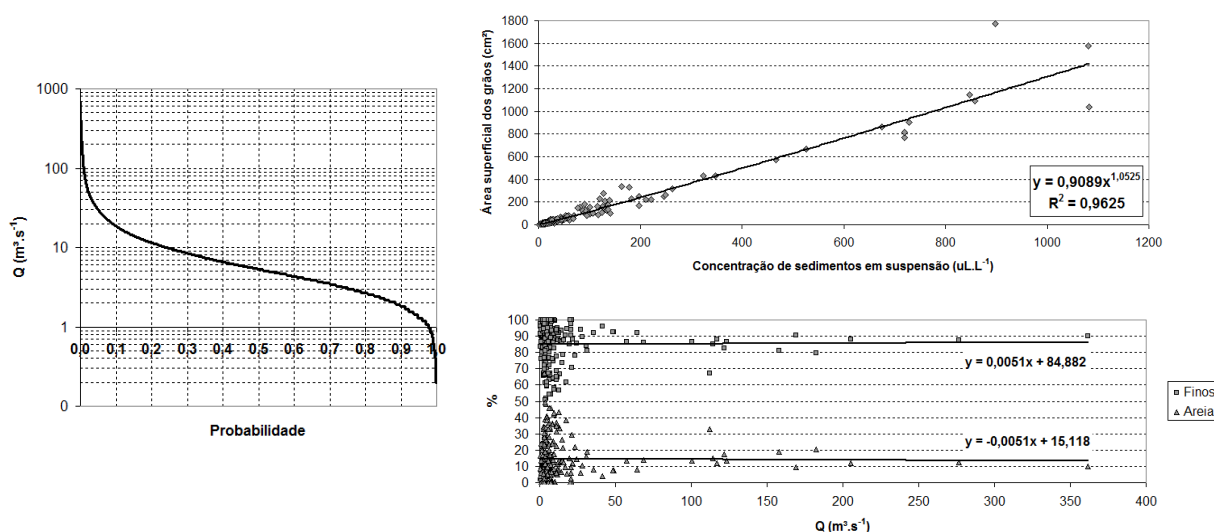


Figura 6 – Posto São Francisco Falso. À esquerda: curva de permanência de vazões. À direita, acima: gráfico concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) versus área superficial dos grãos ( $\text{cm}^2$ ); À direita, abaixo: comportamento dos percentuais de finos e areias na descarga sólida em suspensão para diferentes vazões.

### São Francisco Verdadeiro

O posto está instalado no baixo curso do rio São Francisco Verdadeiro, no Estado do Paraná, e possui área de drenagem  $1.399,65 \text{ km}^2$ . Está localizado nas coordenadas ( $24^\circ 44' 34,78'' \text{ S}$ ;  $54^\circ 05' 46,19'' \text{ W}$ ).

O posto foi instalado em 2005 e ainda está em operação. Ao longo dos últimos quatro anos do histórico (2010-2013) foram realizadas 187 amostragens pontuais de sedimentos em suspensão. A vazão média na estação é  $14,80 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (2005-2013), com oscilação do nível d'água desde 0,21 m (13/04/2012 às 14:00 h;  $Q=7,32 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) até 3,42 m (18/06/2012 às 16:00 h;  $Q=395,76 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) em

relação ao zero da régua limnimétrica. A concentração de sedimentos em suspensão média anual é  $164 \text{ mg.L}^{-1}$  (2005-2013).

A Figura 7 exibe a curva de permanência de vazões para o posto São Francisco Verdadeiro, a correlação existente entre a concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) e a área superficial dos grãos (em  $\text{cm}^2$ ), bem como o comportamento do material fino e das areias em suspensão para vários valores de vazão registrados no posto ao longo do histórico considerado.

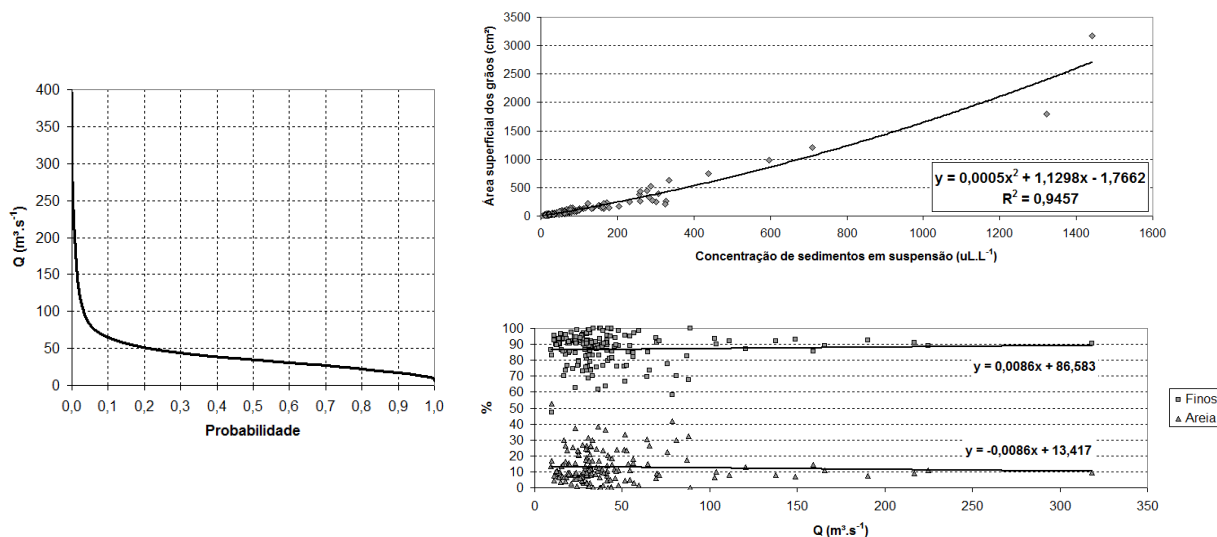


Figura 7 – Posto São Francisco Verdadeiro. À esquerda: curva de permanência de vazões. À direita, acima: gráfico concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) *versus* área superficial dos grãos ( $\text{cm}^2$ ); À direita, abaixo: comportamento dos percentuais de finos e areias na descarga sólida em suspensão para diferentes vazões.

Nota-se que apenas para vazões acima de  $90 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  – cerca de 3% do histórico (11 dias ao ano) – as frações granulométricas na descarga em suspensão obedecem a um padrão, o qual é quase invariável até a vazão máxima registrada.

Novamente, obteve-se uma correlação muito satisfatória entre a concentração de sedimentos em suspensão e a área superficial de seus grãos ( $R^2 \approx 0,95$ ).

## Carapá

O posto está instalado no Paraguai, no baixo curso do rio Carapá e possui área de drenagem  $2.314,55 \text{ km}^2$ . Está localizado nas coordenadas ( $24^\circ 17' 12,02'' \text{ S}$ ;  $54^\circ 28' 03,00'' \text{ W}$ ).

Apesar da existência prévia da estação, o posto de monitoramento sedimentométrico foi instalado apenas em 2002, estando ainda em operação. Entre 2010-2013 foram realizadas 228 amostragens pontuais de sedimentos em suspensão. A vazão média na estação é  $40,66 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (2002-2013), com oscilação do nível d'água desde  $0,64 \text{ m}$  (04/05/2009 às 15:00 h;  $Q=12,61 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) até

4,00 m (22/12/2004 às 13:00 h;  $Q=141,64 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) em relação ao zero da régua limnimétrica. A concentração de sedimentos em suspensão média anual é  $55 \text{ mg.L}^{-1}$  (2002-2013).

A Figura 8 exibe a curva de permanência de vazões para o posto Carapá, a correlação existente entre a concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) e a área superficial dos grãos (em  $\text{cm}^2$ ), bem como o comportamento do material fino e das areias em suspensão para vários valores de vazão registrados no posto ao longo do histórico considerado.

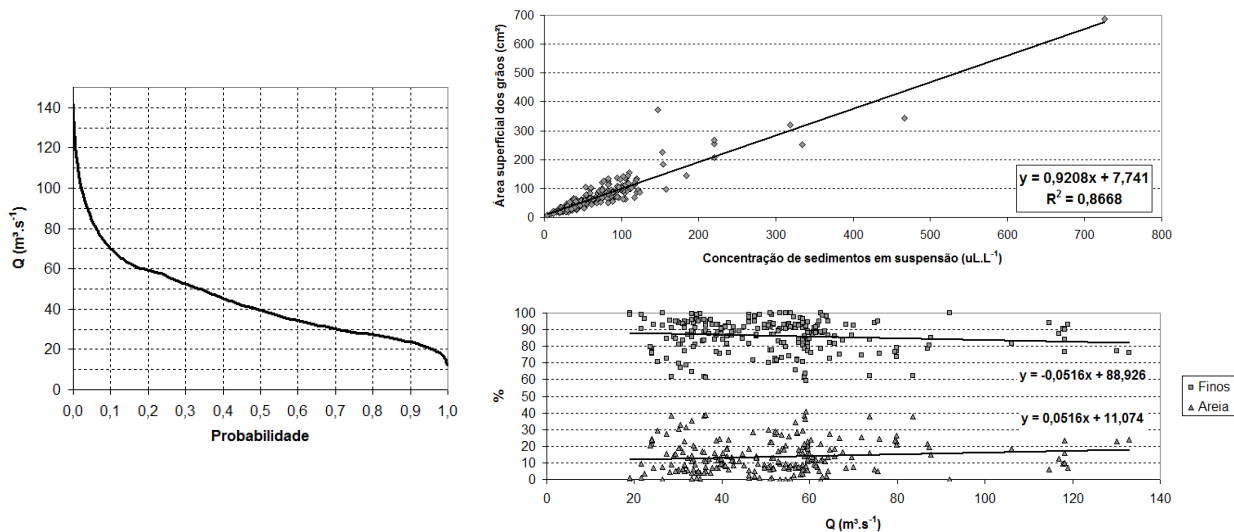


Figura 8 – Posto Carapá. À esquerda: curva de permanência de vazões. À direita, acima: gráfico concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) versus área superficial dos grãos ( $\text{cm}^2$ ); À direita, abaixo: comportamento dos percentuais de finos e areias na descarga sólida em suspensão para diferentes vazões.

Nota-se que a granulometria do sedimento em suspensão no posto Carapá é bem variável ao longo de todo o histórico de vazões disponível, não sendo possível estabelecer a partir de qual descarga líquida existe certa previsibilidade dos percentuais de finos e areias. Uma hipótese é que como a bacia do rio Carapá, nos últimos anos, tem apresentado intensa modificação do uso do solo devido à expansão agrícola, as constantes alterações da cobertura vegetal da bacia, aliadas ao frequente preparo do solo para os plantios, estejam impossibilitando a estabilização da produção de sedimentos na área de drenagem do posto, gerando reflexos tanto no tipo de material em suspensão quanto na relação entre sua concentração e área superficial dos grãos.

## Iguatemi

O posto está instalado no baixo curso do rio Iguatemi, no Estado do Mato Grosso do Sul, e possui área de drenagem  $7.991,78 \text{ km}^2$ . Está localizado nas coordenadas ( $23^\circ 50' 12,73'' \text{ S}$ ;  $54^\circ 20' 05,64'' \text{ W}$ ).

Apesar da existência prévia da estação, o posto de monitoramento sedimentométrico foi instalado apenas em 2001, estando ainda em operação. Entre 2010-2013 foram realizadas 94 amostragens pontuais de sedimentos em suspensão. A vazão média na estação é  $163,56 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (2001-2013), com oscilação do nível d'água desde 1,60 m (08/05/2009 às 3:00 h;  $Q=85,87 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) até 5,62 m (25/12/2006 às 8:00 h;  $Q=696,02 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) em relação ao zero da régua limnimétrica. A concentração de sedimentos em suspensão média anual é  $73 \text{ mg.L}^{-1}$  (2001-2013).

A Figura 9 exibe a curva de permanência de vazões para o posto Iguatemi, a correlação existente entre a concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) e a área superficial dos grãos (em  $\text{cm}^2$ ), bem como o comportamento do material fino e das areias em suspensão para vários valores de vazão registrados no posto ao longo do histórico considerado.

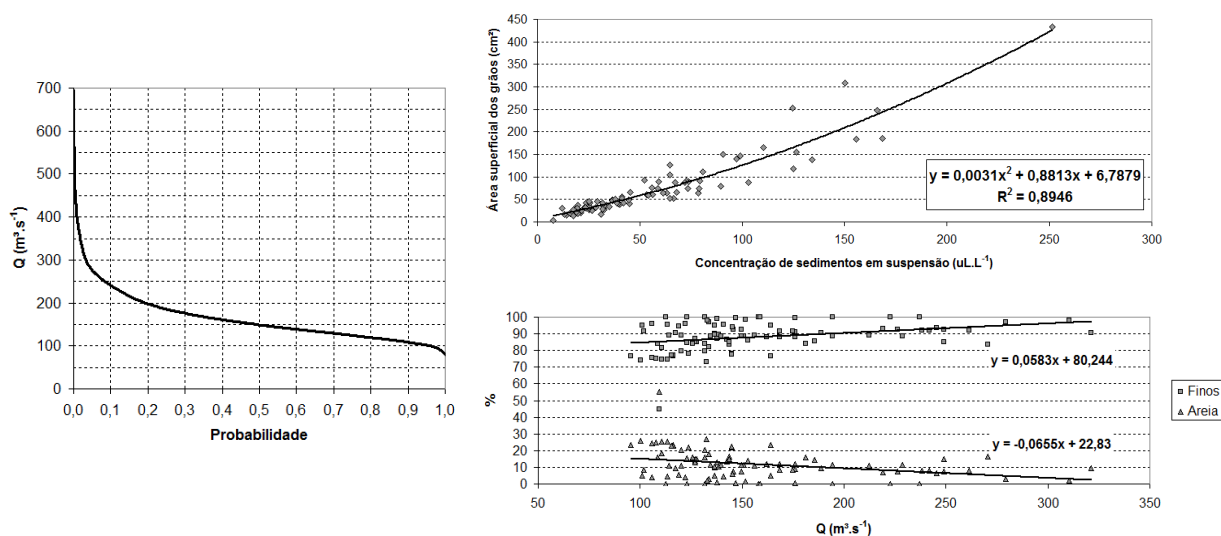


Figura 9 – Posto Iguatemi. À esquerda: curva de permanência de vazões. À direita, acima: gráfico concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) versus área superficial dos grãos ( $\text{cm}^2$ ); À direita, abaixo: comportamento dos percentuais de finos e areias na descarga sólida em suspensão para diferentes vazões.

No posto Iguatemi é observado que existe um aumento significativo da participação dos finos na descarga sólida em suspensão com o incremento de vazão – variando de pouco mais de 70% em períodos de seca até quase 100% nas cheias. Como reflexo desse fenômeno, o melhor ajuste para a curva concentração de sedimentos versus área superficial dos grãos foi por meio de uma parábola ( $R^2 \approx 0,90$ ), já que para uma mesma concentração de sedimentos, os finos possuem mais área superficial total que as areias. Destaca-se que com a continuidade do monitoramento será possível obter amostras para cheias maiores, o que poderá ratificar essa constatação.

Sobre a granulometria do material em suspensão, pode-se notar que a tendência de queda do percentual das areias e consequente aumento do de finos é mais claramente verificado para vazões superiores a  $150 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , as quais ocorrem em 50% do tempo, i.e., cerca de 182 dias ao ano.

## Piquiri

O posto está instalado no baixo curso do rio Piquiri, Estado do Paraná, e possui área de drenagem  $21.596,11 \text{ km}^2$ . Está localizado nas coordenadas ( $24^\circ 11' 22,74'' \text{ S}$ ;  $59^\circ 51' 16,64'' \text{ W}$ ).

O posto de monitoramento sedimentométrico foi instalado em 2001 e ainda está em operação. Ao longo dos últimos quatro anos do histórico (2010-2013) foram realizadas 211 amostragens pontuais de sedimentos em suspensão. A vazão média na estação é  $439,26 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (2001-2013), com oscilação do nível d'água desde  $0,80 \text{ m}$  (14/08/2006 às 22:00 h;  $Q=96,80 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) até  $10,49 \text{ m}$  (27/06/2013 às 2:00 h;  $Q=4.137,81 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) em relação ao zero da régua limnimétrica. A concentração de sedimentos em suspensão média anual é  $100 \text{ mg.L}^{-1}$  (2005-2013).

A Figura 10 exibe a curva de permanência de vazões para o posto Piquiri, a correlação existente entre a concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) e a área superficial dos grãos (em  $\text{cm}^2$ ), bem como o comportamento do material fino e das areias em suspensão para vários valores de vazão registrados no posto ao longo do histórico considerado.

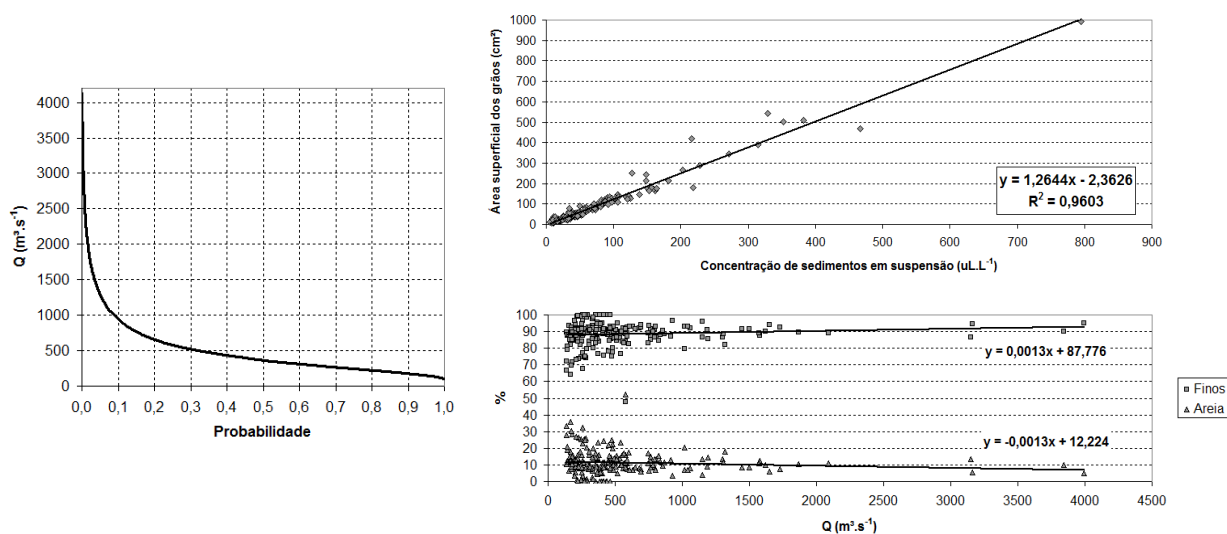


Figura 10 – Posto Piquiri. À esquerda: curva de permanência de vazões. À direita, acima: gráfico concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) *versus* área superficial dos grãos ( $\text{cm}^2$ ); À direita, abaixo: comportamento dos percentuais de finos e areias na descarga sólida em suspensão para diferentes vazões.

Para o posto Piquiri, a partir dos  $600 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (cerca de 20% do tempo – 73 dias ao ano) já é possível evidenciar uma discreta queda da participação das areias e um sutil aumento dos finos na

descarga sólida em suspensão. Essa constância granulométrica para as altas vazões resultou em um ajuste linear da curva concentração de sedimentos em suspensão *versus* área superficial dos grãos, com coeficiente de correlação muito expressivo ( $R^2 \approx 0,96$ ).

## Ivinhema

O posto está instalado no baixo curso do rio Ivinhema, Estado do Mato Grosso do Sul, e possui área de drenagem 32.128,33 km<sup>2</sup>. Está localizado nas coordenadas (22° 22' 52,40" S; 59° 32' 01,26" W).

O posto de monitoramento sedimentométrico está em operação desde 2001. Entre 2010-2013 foram realizadas 182 amostragens pontuais de sedimentos em suspensão. A vazão média na estação é 367,92 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> (2001-2013), com oscilação do nível d'água desde 0,77 m (29/10/2008 às 9:00 h; Q=133,41 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) até 4,79 m (22/11/2001 às 18:00 h; Q=1.352,20 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) em relação ao zero da régua limnimétrica. A concentração de sedimentos em suspensão média anual é 62 mg.L<sup>-1</sup> (2001-2013).

A Figura 11 exibe a curva de permanência de vazões para o posto Ivinhema, a correlação existente entre a concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) e a área superficial dos grãos (em cm<sup>2</sup>), bem como o comportamento do material fino e das areias em suspensão para vários valores de vazão registrados no posto ao longo do histórico considerado.

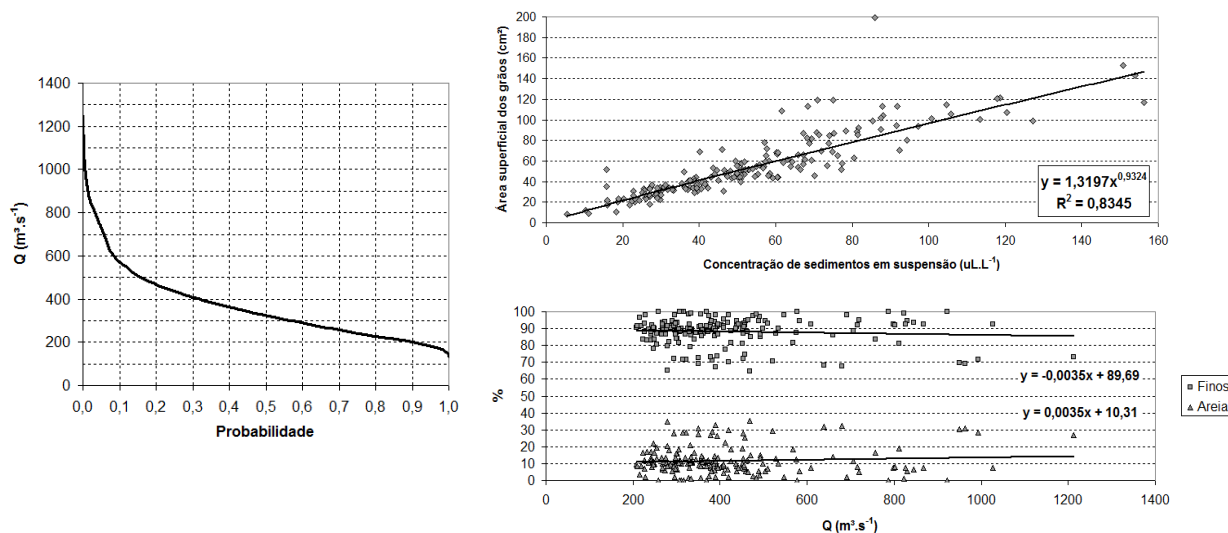


Figura 11 – Posto Ivinhema. À esquerda: curva de permanência de vazões. À direita, acima: gráfico concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) *versus* área superficial dos grãos (cm<sup>2</sup>); À direita, abaixo: comportamento dos percentuais de finos e areias na descarga sólida em suspensão para diferentes vazões.

Similarmente ao observado para o posto Carapá, o Ivinhema também mostra uma grande flutuação dos percentuais de finos e areias tanto para baixas quanto para altas vazões; destaca-se que essa variabilidade é vista até mesmo para descargas líquidas muito próximas da máxima do histórico. Essa dispersão dos registros durante as cheias resultou em um ajuste com  $R^2 \approx 0,83$  da curva que correlaciona a concentração de sedimentos e as áreas superficiais de seus grãos. Nota-se que a ocorrência de um aumento, mesmo que pequeno, da participação das areias na ocasião das altas vazões conferiu ao expoente da equação um valor inferior à unidade.

## Ivaí

O posto está instalado no Estado do Paraná, no médio curso do rio Ivaí, e possui área de drenagem 39.394,53 km<sup>2</sup>. Está localizado nas coordenadas (23° 19' 23,96" S; 58° 39' 57,49" W).

O monitoramento sedimentométrico está em operação na estação desde 2001. Entre 2010-2013 foram realizadas 182 amostragens pontuais de sedimentos em suspensão. A vazão média na estação é 567,82 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> (2001-2013), com oscilação do nível d'água desde 0,41 m (15/08/2006 às 17:00 h; Q=86,46 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) até 16,84 m (27/06/2013 às 13:00 h; Q=9.079,20 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) em relação ao zero da régua limnimétrica. A concentração de sedimentos em suspensão média anual é 147 mg.L<sup>-1</sup> (2001-2013). A Figura 12 exibe a curva de permanência de vazões para o posto Ivaí, a correlação existente entre a concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) e a área superficial dos grãos (em cm<sup>2</sup>), bem como o comportamento do material fino e das areias em suspensão para vários valores de vazão registrados no posto ao longo do histórico considerado.

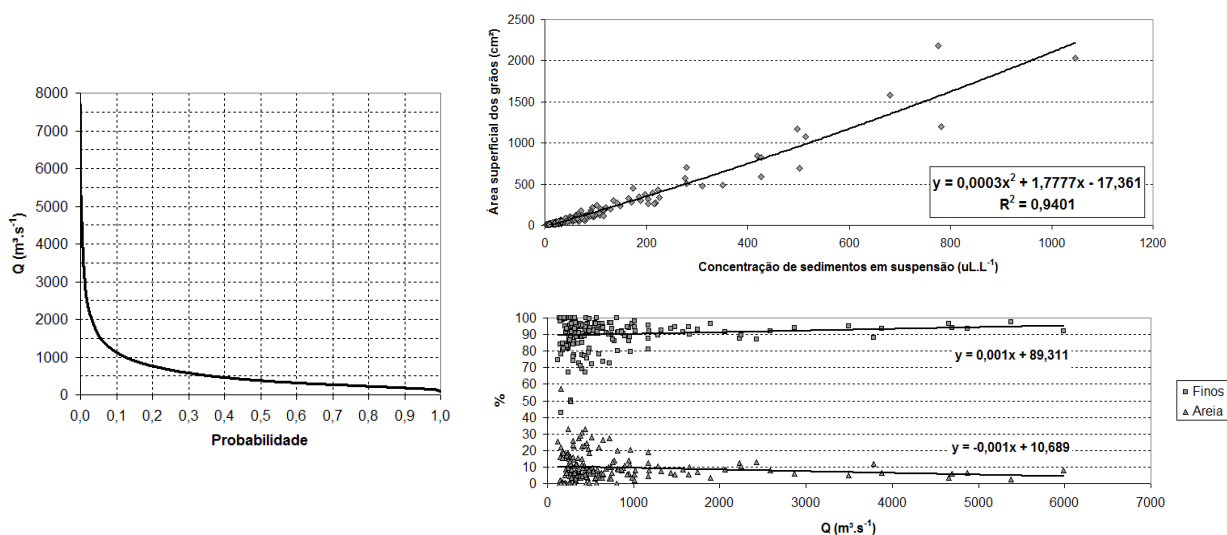


Figura 12 – Posto Ivaí. À esquerda: curva de permanência de vazões. À direita, acima: gráfico concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) versus área superficial dos grãos (cm<sup>2</sup>); À direita, abaixo: comportamento dos percentuais de finos e areias na descarga sólida em suspensão para diferentes vazões.

Para vazões superiores a  $1.100 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (10% do tempo – cerca de 37 dias ao ano), observa-se que há um padrão granulométrico para a descarga em suspensão no posto Ivaí: incremento de aproximadamente 5% do material fino e queda da participação das areias na mesma proporção. Consequentemente, essa regularidade propiciou um ajuste parabólico da curva que correlaciona a concentração de sedimentos em suspensão e a área superficial dos grãos ( $R^2 \approx 0,94$ ).

### Porto São José

O posto está instalado no rio Paraná, Estado do Paraná, e possui área de drenagem  $676.749,27 \text{ km}^2$ . Está localizado nas coordenadas ( $22^\circ 42' 50,57'' \text{ S}$ ;  $59^\circ 10' 43,91'' \text{ W}$ ). É a estação situada mais a montante na rede sedimentométrica da Itaipu Binacional, estando cerca de 40 km a jusante da usina hidrelétrica Eng. Sérgio Motta (Porto Primavera).

O monitoramento sedimentométrico está em operação na estação desde 2001. Entre 2010-2013 foram realizadas 132 amostragens pontuais de sedimentos em suspensão. A vazão média na estação é  $8.441,20 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (2001-2013), com oscilação do nível d'água desde 1,61 m (11/07/2001 à 00:00 h;  $Q=5.959,44 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) até 7,15 m (04/02/2010 às 3:00 h;  $Q=21.908,60 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) em relação ao zero da régua limnimétrica. A concentração de sedimentos em suspensão média anual é  $10 \text{ mg.L}^{-1}$  (2001-2013). A Figura 13 exibe a curva de permanência de vazões para o posto Porto São José, a correlação existente entre a concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) e a área superficial dos grãos (em  $\text{cm}^2$ ), bem como o comportamento do material fino e das areias em suspensão para vários valores de vazão registrados no posto ao longo do histórico considerado.

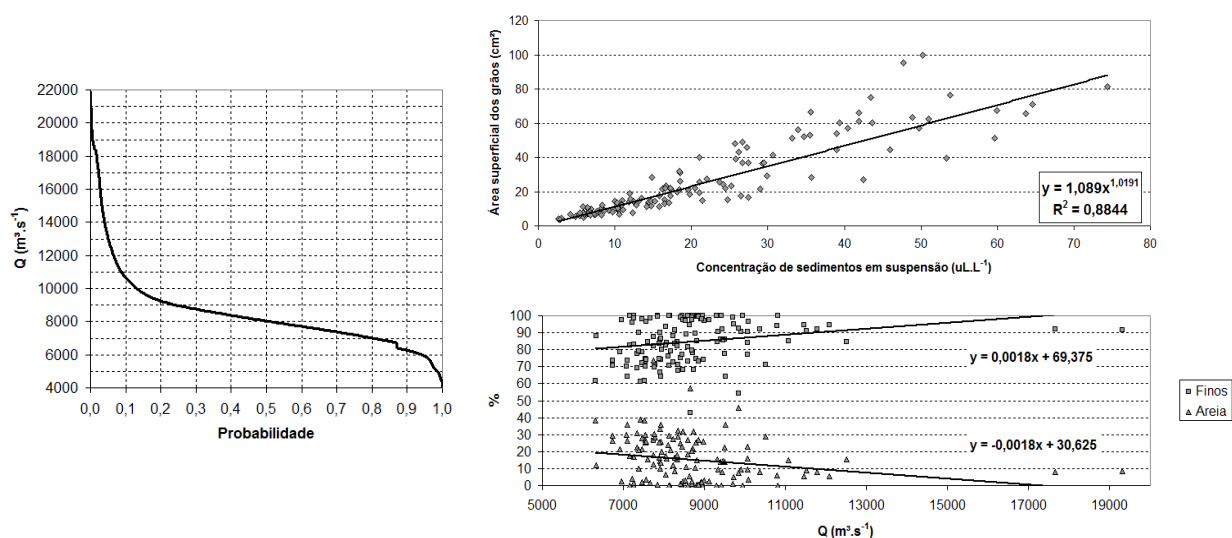


Figura 13 – Posto Porto São José. À esquerda: curva de permanência de vazões. À direita, acima: gráfico concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) *versus* área superficial dos grãos ( $\text{cm}^2$ ); À direita, abaixo: comportamento dos percentuais de finos e areias na descarga sólida em suspensão para diferentes vazões.



Por estar situado no trecho de jusante das barragens de Porto Primavera e Rosana, a poucos quilômetros delas, o posto Porto São José exhibe as maiores variações das frações granulométricas com o aumento das vazões. Enquanto o percentual de areias na descarga em suspensão chega a 40% no período de estiagem, essa participação cai para menos de 10% no período de águas altas. Como o posto apresenta vazões regularizadas e o estirão a montante dele é rico em areias, das descargas líquidas baixas até as próximas da média o percentual de areias é expressivo. Entretanto, com o aumento das vazões causado pelo regime operacional dos vertedouros das barragens de montante, os quais vertem águas ricas em finos durante as cheias, a participação percentual das areias cai substancialmente.

O incremento da parcela de finos no período de águas altas gera reflexo na curva que correlaciona a concentração de sedimentos em suspensão e a área superficial dos grãos, a qual mostrou um ajuste mais adequado por meio de uma equação exponencial ( $R^2 \approx 0,89$ ).

### **Guaíra-MS e Guaíra PR**

Ambos os postos estão instalados no rio Paraná, no extremo de montante da área de influência direta da UHE Itaipu. Uma vez que na localidade o rio Paraná é muito extenso (a largura alcança quase 4 km), foram instaladas duas estações, uma mais próxima à margem matogrossense e a outra, próxima à margem paranaense. Desse modo, é possível quantificar e caracterizar o aporte sólido em suspensão derivado dos afluentes de cada margem. Juntas, as estações possuem área de drenagem de 816.447,69 km<sup>2</sup>. A estação matogrossense está localizada nas coordenadas (24° 03' 15,59" S; 54° 15' 43,48" W), estando a paranaense em (24° 03' 44,19" S; 54° 15' 18,89" W).

Os postos de monitoramento sedimentométrico foram instalados em 2001, estando ambos em operação. Ao longo dos últimos quatro anos do histórico (2010-2013) foram realizadas 156 e 157 amostragens pontuais de sedimentos em suspensão nas estações matogrossense e paranaense, respectivamente. As vazões médias nas estações do MS e PR entre 2001 e 2013 foram 6.524,03 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> e 3.669,76 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, respectivamente. O nível d'água do rio Paraná na seção de medição variou desde 0,96 m (23/09/2001 às 12:00 h; Q=5.843,75 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) até 3,44 m (30/06/2013 às 19:00 h; Q=18.922,49 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) em relação ao zero da régua limnimétrica. As concentrações de sedimentos em suspensão médias anuais (período 2001-2013) são 18 mg.L<sup>-1</sup> (Guaíra-MS) e 30 mg.L<sup>-1</sup> (Guaíra-PR).

A Figura 14 exhibe a curva de permanência de vazões na estação Guaíra-MS, as correlações existentes entre a concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) e a área superficial dos grãos (em cm<sup>2</sup>), bem como o comportamento do material fino e das areias em suspensão para diferentes valores de vazão.

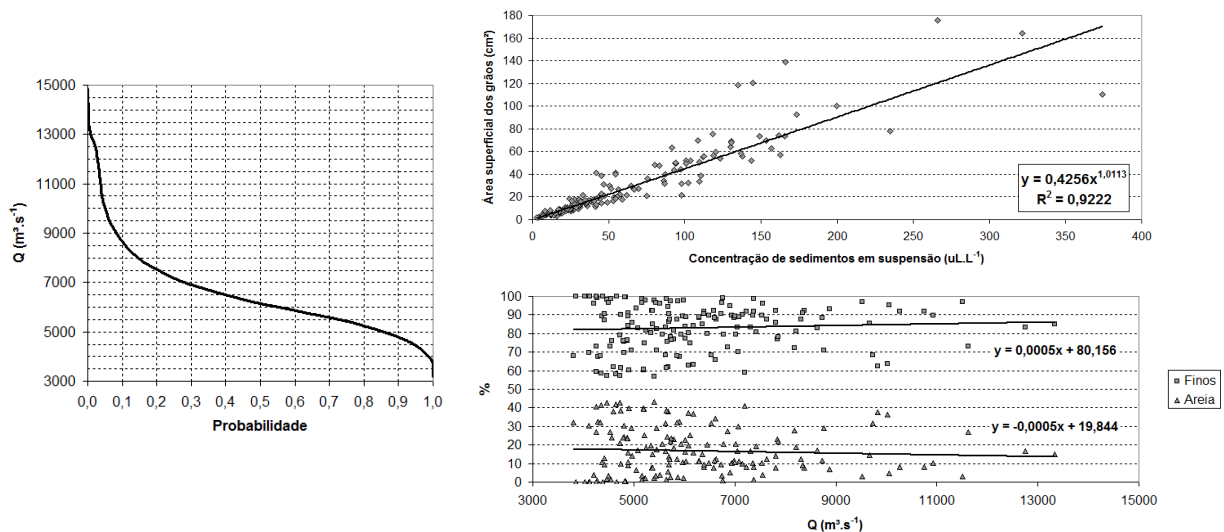


Figura 14 – Posto Guaíra-MS. À esquerda: curva de permanência de vazões. À direita, acima: gráfico concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) *versus* área superficial dos grãos ( $\text{cm}^2$ ); À direita, abaixo: comportamento dos percentuais de finos e areias na descarga sólida em suspensão para diferentes vazões.

A Figura 15 exibe a curva de permanência de vazões na estação Guaíra-PR, as correlações existentes entre a concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) e a área superficial dos grãos (em  $\text{cm}^2$ ), bem como o comportamento do material fino e das areias em suspensão para diferentes valores de vazão.

Comparando-se os dois postos, os quais se situam na mesma seção transversal do rio Paraná, nota-se claramente a influência das vazões advindas dos rios da margens esquerda e direita. Além de ambos receberem as águas regularizadas pelas usinas de montante (ricas em areias, como visto no posto Porto São José), o posto Guairá-MS tem contribuição dos rios Iguatemi e Ivinhema, com maior percentual de areias que os rios Ivaí e Piquiri, cujos caudais incrementam as vazões do posto Guairá-PR.

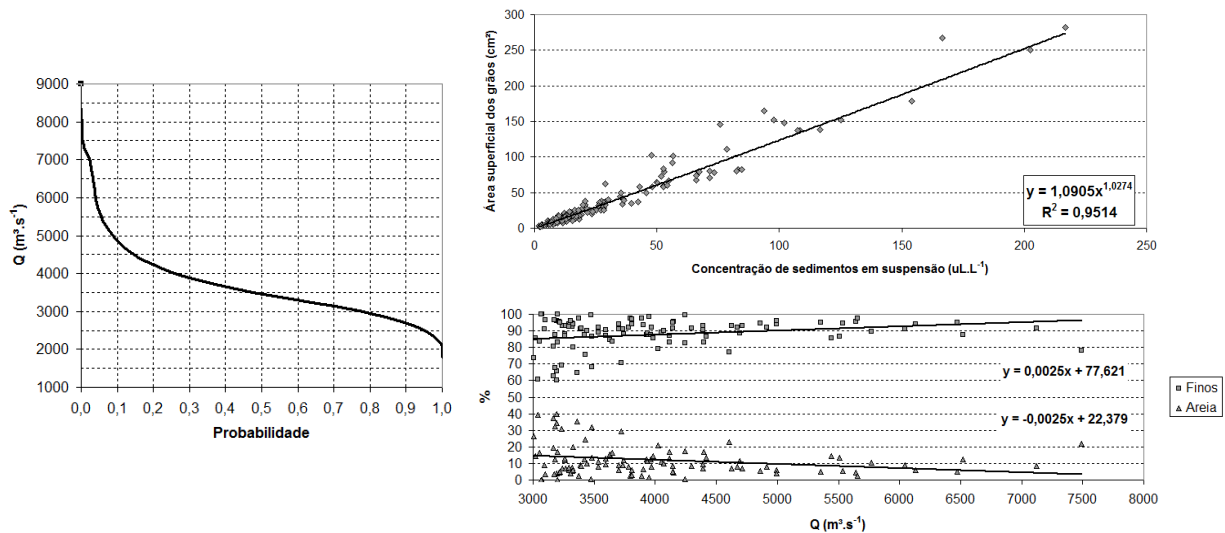


Figura 15 – Posto Guáira-PR. À esquerda: curva de permanência de vazões. À direita, acima: gráfico concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) *versus* área superficial dos grãos ( $\text{cm}^2$ ); À direita, abaixo: comportamento dos percentuais de finos e areias na descarga sólida em suspensão para diferentes vazões.

## CONCLUSÕES

A partir da análise das curvas de correlação entre a concentração de sedimentos em suspensão (em  $\mu\text{L.L}^{-1}$ ) e a área superficial dos grãos (em  $\text{cm}^2$ ), observa-se que em todos os 13 postos abordados neste trabalho obteve-se êxito na determinação das respectivas equações, já que o menor valor de  $R^2$  encontrado foi para o posto Ivinhema (0,83), tendo sido o maior registrado para o posto Sabiá (0,97). Desse modo, pode-se afirmar que é possível, para as estações analisadas, inferir sobre o potencial de transporte de nutrientes e/ou poluentes por adsorção aos grãos dos sedimentos em suspensão com base nas equações determinadas. Destaca-se que essas curvas e equações apenas cumprirão esse papel de indicadores ambientais se associadas a estudos limnológicos paralelos, os quais permitam correlacionar as variáveis abordadas neste trabalho à carga do composto sob investigação; uma vez associados, tornar-se-ia possível estimar tais cargas ao longo de todo o ciclo hidrológico tendo-se como insumo as vazões e/ou concentrações de sedimentos em suspensão – variáveis de mais simples quantificação.

Adicionalmente, nota-se que para quase todos os postos, exceto Carapá, Ivinhema e Guáira-MS, foi possível identificar com clareza o comportamento granulométrico da descarga sólida em suspensão para os períodos de águas altas, quando ocorre a maior parte do transporte anual de sedimentos. Já era esperado que nos eventos das maiores cheias – quando a precipitação em toda ou quase toda área de drenagem contribui na formação do escoamento superficial – fosse possível

observar um padrão granulométrico para a descarga em suspensão, já que ocorreria uma boa mescla das frações do material suspenso; porém este trabalho possibilitou não apenas constatar essa suposição, mas também quantificar (em %) as parcelas de finos e areias em tais eventos. Por outro lado, uma maior imprevisibilidade sobre as frações granulométricas era imaginada para as amostras coletadas durante as baixas vazões, uma vez que a granulometria do sedimento em suspensão em determinada seção transversal de um rio nessa circunstância é muito dependente da geologia da região, do uso do solo, topografia da zona de produção da descarga sólida – a micro ou sub-bacia onde ocorreu o evento chuvoso, dentre outros fatores.

## BIBLIOGRAFIA

CARVALHO, N. O. (2008). *Hidrossedimentologia prática*. 2. ed. Interciência, Rio de Janeiro-RJ, 599p.

LEE, M. W. (2003). *Elastic properties of overpressured and unconsolidated sediments*. U.S. Geological Survey, Colorado, USA, 14 p.

MENDES, A. B. (2010). *Relatório referente à reunião do Board Consultores Civis*. ITAIPU Binacional. Foz do Iguaçu – PR, 51 p.

MENDES, A. B.; BENASSI, S. F.; HENN, C.; OCAMPOS, J. M.; ABREU, G.; BORDIN, R. C. M. (2012). *Estimativa do aporte de fosfatos totais em cursos d'água afluentes ao reservatório de Itaipu através de dados de concentração de sedimentos em suspensão*, in: *X ENES: Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos*. Org. por Poletto, C., Pletsch, A.L., Mello, E.L. e Carvalho, N.O. Porto Alegre – RS: ABRH. 178–193.

MENDES, A. B.; SILVA, C. M.; COLOMBELLI, M.; PEREIRA, R.; JUNG, A. A. (2011). *Estimativas de vida útil de grandes empreendimentos hidrelétricos: o caso da usina de Itaipu*, in *Engenharia de sedimentos: na busca de soluções para problemas de erosão e assoreamento*. Org. por Lima, J.E.F.W e Lopes, W. T.A. Brasília – DF: ABRH. pp. 239–264.

TORNES, L. H. (1986). *Suspended sediment in Minnesota streams*. U.S. Geological Survey, Colorado, USA, 37 p.