

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

**TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO NOS RIOS
CATARINENSES**

LUCIANA MARCELINO

**Trabalho submetido à Banca Examinadora como
parte dos requisitos para Conclusão do Curso de
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental
TCC-II**

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Péricles Alves Medeiros
(Orientador)

Prof. Guilherme Farias Cunha
(Membro da Banca)

Mestrando Fernando Grison
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS, (SC)
DEZEMBRO/2009

RESUMO

Transporte de Sedimentos em Suspensão em Santa Catarina

A erosão é um problema que atinge diversas áreas: social, técnica e ambiental. Mesmo sendo um processo natural, a ação antrópica acelera-o de maneira negativa. O principal ator no processo de erosão são os sedimentos, portanto o estudo do transporte de sedimentos é importante para melhor compreensão do quadro atual de erosão hídrica e para tomada de decisões visando a solução dos problemas a ela relacionados. Na forma como ocorrem na natureza, a erosão e o transporte dos sedimentos apresentam uma enorme complexidade. Neste estudo são estabelecidas curvas-chave de sedimento para estimativa da deflúvios sólidos em suspensão em rios catarinenses. O estudo utilizará dados históricos disponíveis e na Agência Nacional de Águas (ANA). Este trabalho ficará disponível a estudantes e profissionais da área de Recursos Hídricos, tornando-se uma ferramenta de consulta técnica.

Palavras-chaves: transporte de sedimentos, erosão específica, sedimentos em suspensão.

ABSTRACT

The erosion is a problem that reaches different areas: social, technical and environmental. It is a natural process, but the anthropic action accelerate it in the negative way. The main actor in the erosion process are the sediments, so the study of sediments transport is very important to better understand the present water erosion conditions and for the decision making to solve its problems. In the form that happens in the nature, the erosion and sediment transport is a complex process. In this study, suspended sediment rating curves as well as the linked sediment yield in Santa Catarina rivers will be settled. This work will use the historic data available at Water National Agency (ANA). This study will be available to students and professional of Water Resources, to become technical search tool.

Key words: sediment transportation, specific erosion, suspended sediment.

ÍNDICE

1.0 INTRODUÇÃO.....	4
2.0 OBJETIVO GERAL.....	6
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
3.1 SEDIMENTOLOGIA.....	7
3.1.1 <i>Importância e Aplicação</i>	9
3.1.2 <i>Erosão</i>	10
3.1.3 <i>Transporte de Sedimentos</i>	14
3.1.4 <i>Sedimentação</i>	15
3.2 SEDIMENTOMETRIA.....	15
3.2.1 <i>Planejamento da Rede Sedimentométrica</i>	17
3.2.2 <i>Operação da Rede Sedimentométrica</i>	18
3.2.3 <i>Técnicas de Amostragem</i>	19
3.2.4 <i>Rede Hidrossedimentológica Brasileira</i>	22
4.0 ÁREA DE ESTUDO.....	23
5.0 METODOLOGIA.....	25
6.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
6.1 LEVANTAMENTO DE DADOS.....	26
6.2 ANÁLISE PRELIMINAR DE CONSISTÊNCIA DE DADOS.....	26
6.2.1 <i>Preenchimento de Falhas</i>	26
6.2.2 <i>Seleção das Estações para Obtenção das Curvas-Chave</i>	29
6.3 CURVAS-CHAVE.....	31
6.3.1 <i>Bacia do Rio Paraná</i>	33
6.3.2 <i>Bacia do Rio Uruguai</i>	35
6.3.3 <i>Bacia do Atlântico – Trecho Sudeste</i>	41
6.3.4 <i>Classificação das Curvas-Chave</i>	49
6.4 PERÍODOS DE ANÁLISE.....	50
6.5 DEFLÚVIO SÓLIDO EM SUSPENSÃO ACUMULADO.....	53
6.5.1 <i>Estação Barca Irani</i>	53
6.5.2 <i>Estação Barra do Chapecó aux</i>	55
6.5.3 <i>Estação Bonito</i>	56
6.5.4 <i>Estação Passo Caru</i>	58
6.5.5 <i>Estação Passo Marombas</i>	59
6.5.6 <i>Estação Jaraguá do Sul</i>	60
6.5.7 <i>Estação Rio Bonito</i>	61
6.6 EROÇÃO ESPECÍFICA MÉDIA.....	62
6.6.1 <i>Erosão Específica Média para os Períodos de 72/82 e 96/06</i>	62
6.6.2 <i>Erosão Específica Média para as Estações do item 6.3.1</i>	64
6.6.3 <i>Recomendações</i>	67
7.0 CONCLUSÕES.....	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
APÊNDICE.....	71

1. INTRODUÇÃO

A erosão é um processo natural de deslocamentos de solos que ocorrem através de uma escala de tempo geológica. *“Os sedimentos em suspensão são parte de um processo que é impossível de ser acompanhado em sua plenitude à escala de uma vida humana. Tal processo é denominado de Ciclo das Rochas”* (CARVALHO, 2000). No entanto, a ação antrópica baseada na exploração predatória dos recursos naturais representa uma forte influência na aceleração do processo de erosão. Dentre estas ações, as que caracterizam maior interferência são: práticas agrícolas e obras de engenharia que alteram a estrutura do solo de forma inadequada, suprimem a vegetação protetora do solo, impermeabilizam áreas de drenagem e interferem nos regimes fluviais.

Não somente a atividade humana acelera o processo de erosão como também sofre as consequências desse processo. O transporte de sedimentos afeta a qualidade da água para consumo humano e para outras finalidades na medida em que ele próprio constitui-se como poluente e, ao mesmo tempo, atua como catalisador, carreador e agente fixador de outros poluentes. A erosão excessiva contribui para a diminuição da fertilidade dos solos, prejudicando o setor agrícola. Quanto às obras de engenharia, por exemplo o caso de uma barragem, os sedimentos diminuem a capacidade de seus reservatórios. Apesar das dificuldades causadas pelo excesso de sedimentos, estes são responsáveis pelo transporte de nutrientes necessários à manutenção da fauna e flora aquática, constituem e mantêm praias em rios e mantêm o equilíbrio do fluxo sólido e líquido entre os continentes e zonas costeiras.

Diante dos problemas ambientais, técnicos e econômicos que os sedimentos podem gerar, tendo em vista ainda que o transporte de sedimentos é vital no que tange à conservação de um meio ambiente equilibrado, a sedimentologia se mostra como um campo de estudo importante para proteção ambiental e planos de desenvolvimento do país.

Este trabalho se propõe a determinar as equações de curvas-chaves de sedimentos em suspensão, através de dados hidrossedimentométricos de estações fluviométricas, aplicando-as às vazões líquidas diárias e assim determinar os deflúvios sólidos em suspensão acumulados e estimar a produção específica de sedimentos em suspensão. Por meio da análise e interpretação de informações e gráficos obtidos, junto a dados hidrológicos e geográficos, espera-se encontrar um panorama geral da deflúvio sólido em suspensão no Estado de Santa Catarina, bem como avaliar seus pontos de erosão crescente.

O estudo do comportamento hidrossedimentológico não encerra em si uma afirmativa conclusiva a partir da qual se criariam soluções imediatas aos problemas de transporte de sedimentos. No entanto, poderá ser a base para aprofundamentos em alguma área específica, por exemplo, o estudo de zonas mortas. “Zonas mortas” é uma expressão usada para se referir a parte do volume de um reservatório que é ocupado pelos sedimentos que ali se depositam, causando prejuízos devido a perda de capacidade de reservamento. O transporte de sedimentos é um processo físico que abarca inúmeras variáveis, algumas de extrema complexidade e difícil determinação, portanto, para qualquer estudo que se realize neste sentido é importante a conscientização de que hipóteses reducionistas terão que ser adotadas, a margem de erros extrapolará, em alguns casos, o mínimo aceitável e que a experiência e o bom senso do estudante é essencial para a continuidade do trabalho.

2. OBJETIVO GERAL

Avaliar preliminarmente o comportamento hidrossedimentológico das bacias hidrográficas do Estado de Santa Catarina por meio da análise do fluxo de sedimentos em suspensão nas estações fluviométricas já instaladas nos rios catarinenses.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter as curvas-chaves que relacionam a descarga sólida de sedimentos em suspensão com a descarga líquida do rio;
- Transformar as séries históricas de descarga líquida em descarga sólida em suspensão;
- Obter gráficos de deflúvio sólido acumulado em suspensão;
- Analisar e interpretar as informações obtidas para formar um panorama geral da deflúvio sólido em suspensão em Santa Catarina e destacar seus pontos de erosão crescente.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SEDIMENTOLOGIA

Sedimentos são partículas sólidas que através de um processo físico ou químico desprendem-se das rochas e, que, ao interagir com agentes dinâmicos externos transportam-se ou depositam-se.

Sedimentação é um termo geral, utilizado por CARVALHO (1994), que compreende os processos físicos envolvendo sedimentos: **erosão**, **transporte** nos cursos d'água e **deposição**. Estes processos são bastante complexos e ocorrem naturalmente em todo o planeta, tendo importância mundial na medida em que são responsáveis pela conformação atual da crosta terrestre.

Entre os agentes dinâmicos externos, que tornam possível a sedimentação, estão a água, o vento, a gravidade, o gelo e agentes biológicos, como a ação antrópica (CARVALHO, 1994). Os sedimentos transportados e depositados sob efeito do escoamento das águas são denominados de *sedimentos fluviais*.

3.1.1 Importância e Aplicação

A sedimentologia estuda, obviamente, os sedimentos. Segundo CARVALHO (1994), deve considerar também os processos hidroclimáticos, por exemplo, a relação água-sedimento. Esta área tem aplicações práticas diversas, a citar: navegação, morfologia fluvial, obras hidráulicas, avaliação de assoreamento, etc. A importância do estudo da

Sedimentologia torna-se evidente quando são abordados os problemas causados pelos sedimentos e também ao destacarmos sua presença necessária ao equilíbrio ecológico.

“Estudos hidrossedimentológicos são particularmente importantes para o Brasil, uma vez que os sistemas elétricos do País são, ao menos até o momento, de base predominantemente hidráulica. Atualmente, mais de 95% da energia elétrica por nós consumida provém de fontes hidráulicas” (SILVA, et al, 2003).

“Na hidrossedimentologia, a aplicação mais importante é a previsão do assoreamento e da vida útil de um reservatório”, (CARVALHO, 1994). No entanto, sua importância e aplicação não se reduz à obras hidráulicas. Os problemas advindos do sedimentos atingem tanto os empreendimentos, quanto a qualidade de vida da população e o equilíbrio do meio ambiente.

É importante ressaltar a importância da erosão como um processo irreversível. Diferentemente da água, onde as partículas mantêm-se dentro do ciclo hidrológico propriamente dito. No Ciclo das Rochas, definido por CARVALHO (2000), não temos o retorno das partículas sólidas ao seu local de origem. *De modo distinto do ciclo hidrológico, não existe realmente um “ciclo” sedimentológico pois, uma partícula sólida removida do solo e transportada águas abaixo, jamais volta à sua origem. O potencial destino final é o mar. Dessa forma, a perda de solos é importante por, praticamente, ser irreparável* (MEDEIROS, et al, 2008).

Dentre os problemas gerados pelos sedimentos na etapa da erosão, tem-se: risco de desertificação, destruição de nascentes, remoção da camada fértil dos solos, desabamento de terras e taludes, etc. Enquanto transportam-se pelo curso d'água, os sedimentos fluviais

afetam a qualidade da água para consumo humano e industrial, encarecendo seu tratamento; aumentam a turbidez da água, impedindo a entrada de luz e calor na coluna d'água e reduzindo a qualidade estética da mesma; diminuição da população de peixes e carregam outros poluentes, vírus e bactérias. Já na etapa da deposição, seus inconvenientes são: assoreamento de reservatórios, possibilitam o desenvolvimento de vetores causadores de doenças transmissíveis, etc, (CARVALHO, 1994).

3.1.2 Erosão

“Dentro das ciências ambientais define-se erosão como o desgaste e ou arrastamento da superfície da terra pela água corrente, vento, gelo ou outros agentes geológicos, incluindo processos de arraste gravitacional. A erosão é um dos principais fenômenos geológicos que ocorre na Terra e se processa de várias formas, se considerarmos seu ambiente de ocorrência”, (SILVA, et al, 2003).

A erosão pode ser entendida como os primeiros passos do sedimento em sua caminhada. Como já dito na Introdução, os sedimentos fazem parte de um processo cíclico de movimentação (Ciclo das Rochas), onde não há início nem fim; entretanto para melhor compreensão julga-se ser a erosão a etapa inicial deste processo.

O mecanismo físico que desprende partículas sólidas do solo e desloca-as através do espaço ocorre sob efeito de diversos agentes externos, como a água, o vento, etc. Nesta revisão serão estudados apenas os processos físicos de erosão pela ação da água da chuva, apresentado abaixo por dois autores:

*“A erosão do solo pela água da chuva compreende três subprocessos:
destacamento de partículas do solo pelo impacto das gotas da chuva;*

destacamento de partículas de solo pelo impacto das gotas do deflúvio superficial; e transporte de partículas pelo deflúvio superficial que ocorre nas áreas de contribuição e nos microcanais que alimentam os canais e cursos d'água.” (RIG HETTO, 1998).

“No meio natural, o destaque da partícula no processo de erosão ocorre através da energia de impacto da gota de chuva no solo e pelas forças geradas devido à ação do escoamento das águas. As gotas de chuvas caindo em terrenos inclinados desagregam as partículas, provocam o deslocamento e lavam o solo, removendo a camada superficial.” (CARVALHO, 1994).

Ambos os autores referem-se a erosão como um processo tanto de destacamento de partículas do solo como de suas movimentações, pela força do escoamento das águas, sobre o terreno. No entanto, em relação a movimentação, CARVALHO (1994) denomina-a de *deslocamento* enquanto que RIG HETTO (1998) usa o termo *transporte nas áreas de contribuição*. Nesta revisão, o termo “transporte de sedimentos” ficará restrito ao transporte nos canais e rios. Adotar-se-á a expressão “deslocamento das partículas de solo” nas áreas de contribuição como parte do processo erosivo.

Nem todo material sólido removido pelo processo erosivo dentro de uma bacia hidrográfica rompe as fronteiras destas, devido ao grau de seletividade dos grãos de cada modalidade de erosão e à dinâmica hidrológica dos canais de drenagem. A totalidade do material removido é chamada de **erosão total**; enquanto que a quantidade de sedimento removido carregado para fora da área de drenagem constitui a **erosão efetiva**. (SILVA, *et al*, 2003).

3.1.3 Transporte de Sedimentos

“As partículas dentro de um escoamento qualquer são erodidas ou sedimentam-se. A situação intermediária é o transporte para jusante.” (MEDEIROS, *et al.*, 2008). Com estas palavras permite-se entender que o transporte de sedimentos engloba todo o processo situado entre a erosão e a deposição do sedimento.

Os sedimentos têm origem na erosão da bacia e na erosão do leito e margens dos rios. As partículas erodidas que chegam ao rio podem ser transportadas em suspensão no meio líquido ou pelo leito. As partículas em suspensão se movimentam com a velocidade da corrente de água. As partículas do leito deslocam-se por arraste, ou seja, pela velocidade da corrente; mas também sofrem resistência de atrito, o que resulta numa velocidade menor que aquelas em suspensão. Dependendo da velocidade da corrente e do efeito de turbulência as partículas podem entrar no meio líquido e ficar em suspensão ou voltar ao leito quando as forças atuantes se reduzirem.

Como se sabe, as partículas sólidas dentro de um escoamento qualquer, ou são erodidas ou sedimentam-se. A situação intermediária é o transporte sólido sempre para jusante. O que normalmente acontece é uma complexa interação líquido-sólido resultando em trechos com dinâmicas diferentes. A produção de sedimentos de uma determinada área da bacia não é necessariamente igual ao deflúvio sólido que passa em uma secção de rio mais à jusante. Isso é porque, obviamente, parte fica depositada em algum ponto do caminho. Passando agora especificamente ao transporte concentrado dentro do rio, sabemos da hidráulica fluvial que os tipos básicos de transporte sólido são: suspensão e arraste. A suspensão inclui tanto partículas provenientes do próprio leito como a chamada

carga de lavagem ou carga de finos que é uma espécie de “pano de fundo de sedimentos” provenientes da bacia bem à montante. (MEDEIROS, et al, 2008).

SILVA (2003) divide o transporte de sedimentos em três grupos:

- **Carga sólida do leito ou de arrasto:** são partículas que rolam ou escorregam longitudinalmente nos cursos d’água, entrando em contato com o leito praticamente todo o tempo;

- **Carga sólida saltitante:** são as partículas que pulam ao longo do curso d’água por efeito da correnteza ou pelo impacto de outras partículas. O impulso inicial que arremessa uma partícula na correnteza pode se dever ao impacto de uma na outra, o rolamento de uma por sobre a outra ou o fluxo de água sobre a superfície curva de uma partícula, criando assim pressão negativa;

- **Carga sólida em suspensão:** são os sedimentos suportados pelas componentes verticais das velocidades do fluxo turbulento, enquanto estão sendo transportados pelas componentes horizontais dessas velocidades, sendo suficientemente pequenas para permanecerem em suspensão, subindo e descendo na corrente acima do leito. Geralmente esse grupo de sedimento representa a maior quantidade de carga sólida do curso d’água, podendo corresponder a 99% de toda carga sólida.

Segundo CARVALHO (2000), o termo carga sólida se refere a qualidade do movimento: em suspensão, de arraste, em contato e saltante. O termo descarga sólida se refere a quantidade do movimento. A descarga sólida em suspensão e a descarga sólida do leito são medidas separadamente devido a diferença de velocidade que se movimentam. Partículas finas, como argila e silte, estão em maiores quantidades na carga sólida em

suspensão que os materiais grossos, como a areia. Na carga sólida do leito encontra-se material mais grosso, areia e pedregulhos.

Dentre as duas formas básicas de transporte de sedimentos: em suspensão e arraste; este trabalho focará suas análises no transporte de sedimentos em suspensão, pois é relativamente fácil de ser medido. Enquanto que o transporte por arraste tem uma medição difícil, incerta e pouco acessível, calculado geralmente através de fórmulas desenvolvidas em laboratório de hidráulica, que quando aplicadas à natureza, muito mais complexa, podem resultar em erros de até 600% (MEDEIROS, *et al*, 2008).

A estimativa da deflúvio sólido em suspensão é efetuada através de modelos matemáticos, que podem tanto ser empíricos ou conceituais. Os modelos empíricos não se fundamentam na física dos processos, são formulados com base em equações obtidas através de regressão de alguma variável incluída no processo: concentração de sólidos suspensos, turbidez ou vazão. Com aplicação simples, possibilitam a estimativa de outra variável desejada. Os modelos conceituais não serão expandidos nesta revisão bibliográfica porque fogem ao foco deste trabalho (SOUZA, *et al*, 2007).

Dentre os diversos modelos empíricos, tem-se como mais comuns: o método da determinação da curva-chave (Protocolo ANEEL, Carvalho *et al.*, 2000) e o método da curva de permanência (CARVALHO, 1994). A vantagem destes modelos está em sua simples aplicação, onde o conhecimento das variáveis necessárias ao método são reduzidas. Apesar disso, deve-se estar consciente de que suas limitações, relacionadas principalmente ao grau de dispersão dos pares de dados nas curvas-chaves, subestimam os valores obtidos, que podem variar entre 10 e 50% (SOUZA, *et al.*, 2007).

O método a ser utilizado neste trabalho será o recomendado pelo Protocolo da ANEEL (CARVALHO, et al., 2000). Neste documento, para a estimativa da deflúvio sólido em suspensão é determinada, através da Regressão Linear, uma curva-chave de sedimentos (curva ajustada) para todos os pares de valores de descarga sólida em suspensão e vazão líquida média mensal. Da posse desta equação chave e com os valores de descarga líquida diária obtém-se a descarga sólida em suspensão para uma série histórica. Acumulando-se estes valores tem-se a deflúvio sólido em suspensão em determinado período.

3.1.4 Sedimentação

O processo de sedimentação acontece quando as forças exercidas pelo ação do escoamento das águas já não conseguem manter o transporte do sedimento em suspensão ou rolando pelo leito, então estas partículas depositam-se no leito, nas margens ou em outros locais específicos. Pode ser entendida como a etapa final da movimentação do sedimento, que se iniciou com o processo erosivo.

A sedimentação em rios constitui-se como uma séria e problemática consequência da erosão. Os reservatórios de água de usinas hidrelétricas são dimensionados de forma que uma parte de seu conteúdo destina-se ao acúmulo de sedimentos, são chamados de zonas mortas, porém em muitos casos a taxa de sedimentação é tão elevada que o reservatório chega a perder 5% de sua capacidade de armazenamento de água por ano (SILVA, 2003). As constantes perdas de capacidade aumentam os custos de implantação e operação de uma usina hidrelétrica, além do risco de torná-la obsoleta depois de longos períodos de alta sedimentação.

A sedimentação também tem destaque importante para outra área: a saúde pública. Como já foi dito anteriormente, os sedimentos configuram-se como poluentes ou carreadores e fixadores de outros poluentes; assim, em áreas onde há depósito de sedimentos em contato com a população humana, corre-se o risco de haver contaminação e agravamento de doenças.

A poluição e eutrofização dos corpos de água causados pela erosão e as formações de áreas pantanosas originadas pela sedimentação são os principais obstáculos para o efetivo controle de doenças como a malária, encefalite e outras doenças transmitidas por vetores que necessitam de água parada para se desenvolver. O movimento de poluentes para açudes, tanques, rios, lagos e reservatórios geram problemas de saúde pública na medida em que a água reservada nestes locais for destinada ao consumo humano (SILVA, 2003).

3.2 SEDIMENTOMETRIA

Para utilização dos recursos hídricos do Brasil, país com umas das maiores redes fluviais do mundo, é necessário o conhecimento do regime fluvial, que se dá através da rede sedimentométrica e de estudos a partir desta. A operação e manutenção da rede inclui informações a respeito dos níveis d'água, da descarga líquida e sólida e de parâmetros de qualidade de água. Estas informações são obtidas por meio de observações locais e diárias e periodicamente por equipes de hidrometria, devendo ser criteriosa e honesta, pois um erro de medição torna difícil ou mesmo impossível sua correção.

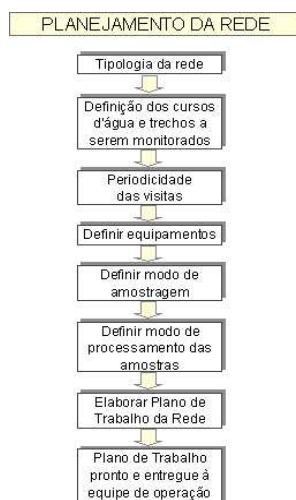
3.2.1 Planejamento da Rede Sedimentométrica

Uma Rede Sedimentométrica é constituída pelos postos sedimentométricos e seus diversos equipamentos instalados em uma bacia hidrográfica, com a função de monitoramento e medição do fluxo de sedimentos nos cursos d'água. A figura 1.0 a seguir mostra as etapas de planejamento da Rede Sedimentométrica.

Rede primária é definida como um mínimo de postos operados por alguma entidade encarregada da rede hidrométrica nacional ou estadual, destinada a diversas finalidades para uso dos recursos hídricos de longo prazo.

Rede secundária opera para fins específicos sendo limitada a uma bacia hidrográfica ou área de drenagem.

Figura 1.0 – Planejamento da Rede Sedimentométrica



Fonte: Protocolo ANEEL, Carvalho *et al.*, 2000.

Os postos sedimentométricos devem ser planejados de forma que permitam o estudo da erosão, transporte e depósito dos sedimentos em rios e reservatórios. A medição do

sedimento é feita na seção transversal de medição de vazão. Para escolha do trecho do rio onde será instalado o posto dá-se preferência para locais com margens altas, declividades moderadas, leito firme e uniforme. Nestas condições, a calha pode conter todas as variações de vazão, o escoamento é mais uniforme a velocidade é distribuída na seção transversal, condições necessárias para uma boa amostragem.

A frequência de amostragem depende do escoamento da bacia. Intensificam-se as medições em períodos úmidos em oposição aos períodos secos. Durante as enchentes, recomenda-se medição da carga em suspensão com frequência horária enquanto que as outras amostragens podem ser diárias ou semanais.

Para medições de descarga em suspensão, do leito ou total há diversos métodos. As descargas em suspensão e do leito podem ser medidas separadamente com métodos específicos, diretos ou indiretos, ou podem ser medidos ao mesmo tempo, como descarga sólida total. Serão apresentados na figura 2.0 os métodos diretos e indiretos para a medição da *descarga em suspensão*, sendo esta o objeto de estudo deste trabalho.

Figura 2.0 – Métodos de medição da descarga sólida em suspensão.

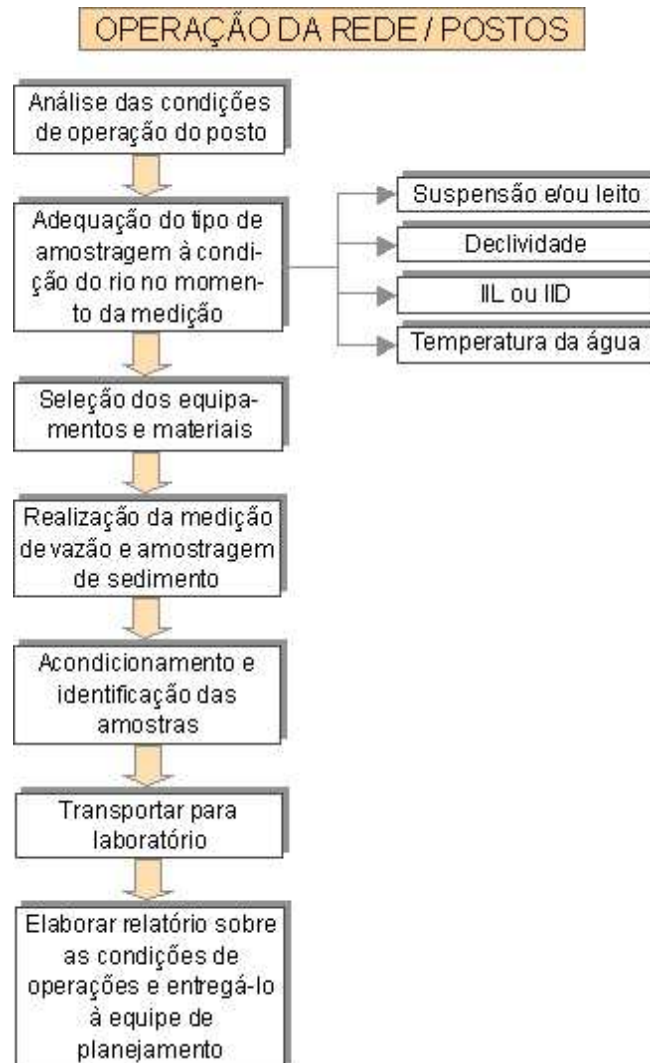
Descarga sólida	Medição	Descrição	Equipamentos ou metodologia de medida
Descarga sólida em suspensão	Direta	Usa equipamentos que medem diretamente no curso d'água a concentração ou outra grandeza como a turbidez ou ultra-som	Medidor nuclear (portátil ou fixo), Ultra-sônico ótico, Ultra-sônico Doppler de dispersão, Turbidímetro, ADCP (Doppler)
		Por acumulação do sedimento num medidor (proveta graduada)	Garrafa Delft (medição pontual e concentração alta)
	Indireta	Coleta de sedimento por amostragem da mistura água-sedimento, análise de concentração e granulometria e cálculos posteriores da descarga sólida	Diversos tipos de equipamentos: – de bombeamento, equipamentos que usam garrafas ou sacas, sendo pontuais instantâneos, pontuais por integração e integradores na vertical (no Brasil usa-se principalmente a série norte-americana – U-59, DH-48, DH-59, D-49, P-61 e amostrador de saca)
		Uso de fotos de satélite e comparação com medidas simultâneas de campo para calibragem, em grandes rios	São estabelecidas equações que correlacionam as grandezas de observação das fotos com as concentrações medidas

Fonte: Protocolo ANEEL, Carvalho *et al.*, 2000.

3.2.2. Operação da Rede Sedimentométrica

A operação da Rede Sedimentométrica consiste em visitas técnicas que avaliam as condições de operação dos postos sedimentométricos e realizam medições com equipamentos levados a campo, a fim de promover a melhoria contínua do funcionamento da rede.

Figura 3.0 – Operação da Rede Sedimentométrica



Fonte: Protocolo ANEEL, Carvalho *et al.*, 2000.

3.2.3 Técnicas de Amostragem

Os métodos ou técnicas de amostragem podem ser: pontual instantâneo, pontual por integração e integração na vertical ou em profundidade. A escolha destes métodos depende do objetivo que se pretende com a análise.

Não devem ser realizadas amostragens em local de água paradas, devendo considerar apenas a largura de água corrente. Evita-se amostragens atrás de bancos de areia e pilares de pontes.

Durante o processo de amostragem é necessário medir a temperatura da água para obtenção da viscosidade cinemática, que é um valor utilizado em diversas fórmulas de transporte de sedimentos. Além da necessidade de fazer amostragens em verticais ao longo de toda a seção transversal, tanto em largura quanto em profundidade, deve-se ter o cuidado de coletar amostras com quantidade suficiente para que sejam realizadas análises com a precisão desejada (CARVALHO, 2000).

Para o sedimento em suspensão faz-se análise de concentração e, quando necessário, também de granulometria. A quantidade e características dos sedimentos, bem como qualidades químicas de componentes presentes na água influenciam o processamento das amostras. Amostras com pequena quantidade de sedimento podem não oferecer condição de boa análise com a precisão desejada, porque conduzem a erros de pesagem. Ao contrário, grandes quantidades requerem bipartição da amostra ou causam problemas de pesagem, ambos conduzindo a erros indesejáveis (CARVALHO, 2000).

CARVALHO (2000) recomenda que deverá sempre existir um entendimento entre hidrometristas, laboratoristas e equipe de processamento para garantir que os trabalhos sejam realizados dentro das normas.

3.2.4 Rede Hidrossedimentológica Brasileira

O Brasil possui uma rede fluviométrica básica ou primária de 1.581 postos fluviométricos dos quais 415 com medições de descarga sólida em suspensão. Devido à dificuldades operacionais ou financeiras a obtenção e frequência de medição das descargas sólidas estão em número abaixo do desejável para o bom conhecimento do meio natural.

Segundo o Inventário das Estações Fluviométricas (ANA, 2006), as estações hidrológicas são codificadas, de acordo com a sua localização, em estações “nos cursos d’água” e “fora dos cursos d’água”.

Entende-se por “estação no curso d’água” ao elemento de controle, localizado na seção transversal do curso d’água ou diretamente a ele conectado e que tem por finalidade a avaliação de dados hidrológicos característicos do referido curso, como, por exemplo, dados concernentes à descarga líquida, descarga sólida, qualidade de água, dentre outros.

Entende-se por estação “fora do curso d’água” ao elemento de controle, localizado em qualquer ponto de uma área, cuja finalidade é a coleta de dados não relativos diretamente aos cursos d’água, como, por exemplo, dados referentes à pluviometria, evaporimetria, águas subterrâneas, dentre outros.

Outra forma de classificação das estações hidrológicas, que será adotada neste trabalho, nomeia as estações “no curso d’água” de estações fluviométricas e as estações “fora do curso d’água” de estações pluviométricas.

A codificação das estações fluviométricas no Brasil foram feitas através da divisão hidrográfica estabelecida pelo antigo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

(DNAEE), que dividia o País em 9 (nove) bacias ou regiões hidrográficas, cada uma delas subdivididas em 10 (dez) sub-bacias, sendo:

Bacia 1 – Bacia do rio Amazonas

Bacia 2 – Bacia do rio Tocantins

Bacia 3 – Bacia do Atlântico – Trecho Norte/Nordeste

Bacia 4 – Bacia do rio São Francisco

Bacia 5 – Bacia do Atlântico – Trecho Leste

Bacia 6 – Bacia do rio Paraná

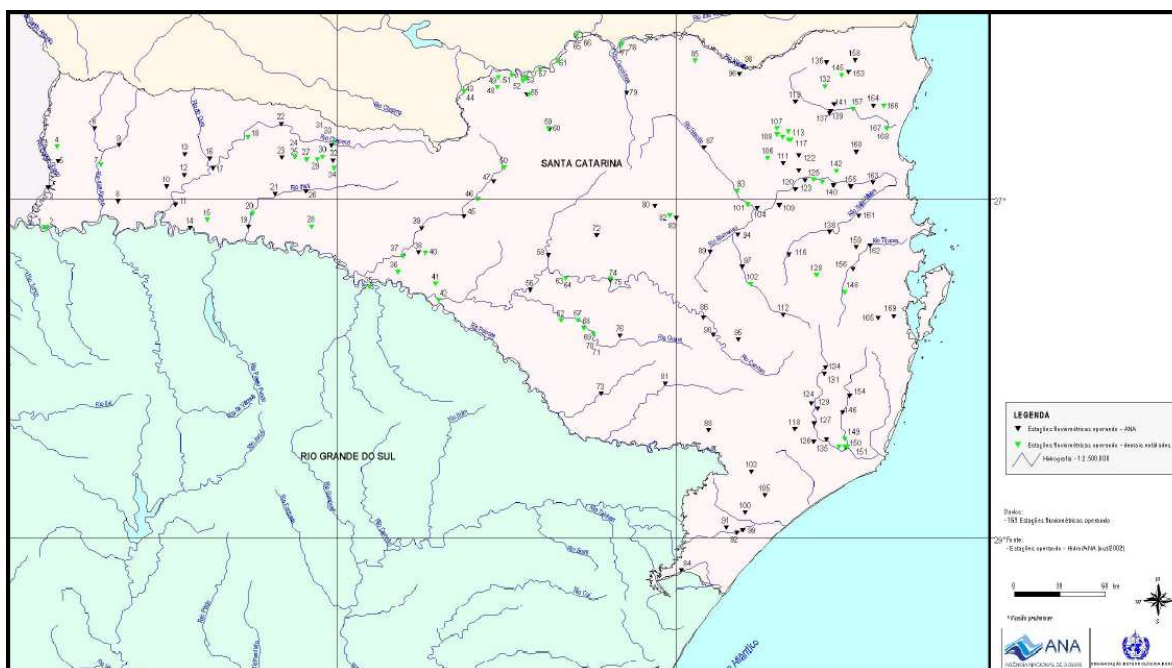
Bacia 7 – Bacia do rio Uruguai

Bacia 8 – Bacia do Atlântico – Trecho Sudeste

As estações, conforme apresentadas pelo Inventário das Estações Fluviométricas (ANA, 2006), contém as seguintes informações: código de identificação, nome da estação, tipo, código do curso d'água no qual está instalada a estação, curso d'água (nome do rio), unidade da federação, região hidrográfica, entidade responsável pela estação, localização geográfica, área de drenagem (km²) e período de observação.

4.0 ÁREA DE ESTUDO

Santa Catarina situa-se no Sul do Brasil, bem no centro geográfico das regiões de maior desempenho econômico do país, Sul e Sudeste, e em uma posição estratégica no Mercosul. O Estado faz fronteira com a Argentina na região Oeste. Florianópolis, a Capital, está a 1.850 km de Buenos Aires, 705 km de São Paulo, 1.144 do Rio de Janeiro e 1.673 de Brasília. Sua posição no mapa situa-se entre os paralelos 25°57'41" e 29°23'55" de latitude Sul e entre os meridianos 48°19'37" e 53°50'00" de longitude Oeste. Este território divide-se entre três regiões hidrográficas, conforme estabelecida pelo antigo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), são elas: Bacia do Rio Paraná, Bacia do Rio Uruguai e Bacia do Atlântico – Trecho Sudeste.



Fonte: ANA - Agência Nacional de Águas.

5.0 METODOLOGIA

Através de uma “triagem”, serão buscadas estações fluviométricas com boa representatividade para análise. A metodologia consiste em:

- Coleta dos dados de vazão líquida e concentração de sedimentos em suspensão no material disponível na Agência Nacional de Águas;

- Preenchimento de falhas existentes, efetuando-se a média dos valores vizinhos a falha;

- Cálculo das descargas sólidas diárias em suspensão pela fórmula abaixo:

$$Q_{SS} = 0,0864 \times Q \times C_{SS}$$

Onde: Q_{SS} = descarga sólida de sedimentos em suspensão (t/dia); Q = vazão líquida média (m^3/s); C_{SS} = concentração de sedimentos em suspensão (ppm) e a constante 0,0864 é um fator de transformação de unidades;

- Determinação das curvas-chave de sedimentos com a utilização do programa EXCELL 2007. As equações de curva-chave serão obtidas plotando-se os valores de vazão sólida em suspensão no eixo das ordenadas e os valores de vazão líquida no eixo das abscissas. Através da regressão linear serão obtidas as equações correspondentes as curvas. As opções de regressão são: linear, logarítmica, polinomial, potencial e exponencial. Será escolhida o tipo de regressão para cada equação segundo critérios subjetivos de adequação visual e também, considerando o valor de R^2 ;

- Análise dos coeficientes de correlação (R^2) e seleção das curvas-chave com R^2 maior ou igual a 0,6;

- Análise das séries históricas dos dados de vazão líquida diária e determinação de dois período de anos igual para as estações selecionadas.

- Aplicação das curvas-chave selecionadas à séries de vazões líquidas diárias para obtenção das descargas sólidas em suspensão diárias;

- Acumulação das descargas sólidas em suspensão diária para estimativa da deflúvio sólido em suspensão nos períodos considerados.

- Cálculo das produções específicas de sedimento ($\text{ton}/\text{km}^2.\text{ano}$) para cada período considerando possibilitando uma comparação entre eles;

- Breve e preliminar comentário sobre o cálculo do item anterior.

6.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

As medições dos dados fluviométricos necessários para este estudo não foram realizadas pelo autor, pois estão disponíveis na Internet, através do banco de dados hidrológicos, HIDRO, da Agência Nacional de Águas. Portanto, para início deste trabalho, efetuou-se um levantamento de dados.

O Estado de Santa Catarina conta com 342 estações fluviométricas instaladas nos cursos d'água. Os dados necessários para o estudo do transporte de sedimentos são: série histórica de vazão líquida diária (m^3/s) e concentração de sedimentos em suspensão (ppm).

A primeira etapa na escolha das estações que serão analisadas é verificar se a estação realiza ou não medição da concentração de sedimentos. Constatou-se que a grande maioria das estações catarinenses não realizam esta medição. Do total de **342** estações, em apenas **51** foram realizadas medições de concentração de sedimentos. Isto significa que do total de estações fluviométricas instaladas nos rios catarinenses, aproximadamente 15% realizam medição de concentração de sedimentos. As curvas chaves que serão aplicadas às vazões líquidas diárias dependerão, inicialmente dos dados de concentração de sedimentos e vazão líquida média, portanto, somente 51 estações fluviométricas foram pré-selecionadas para análise. Segue abaixo a tabela 1 que lista as 51 estações fluviométricas que realizam medição de concentração de sedimento, com o nome e o código das estações.

Tabela 1 – Lista das 51 Estações Fluviométricas com medição da concentração de sedimentos em suspensão (ppm) pré-selecionadas.

Nº	Código	Nome da Estação	Nº	Código	Nome da Estação
1	83500002	APIÚNA	27	73550000	PASSO CAXAMBU
2	83500000	APIÚNA NOVA RÉGUA	28	71498000	PASSO MAROMBAS
3	84600000	ARMAZÉM CAPIVARI	29	73850000	PASSO NOVA ERECHIM
4	83675000	ARROZEIRA	30	82270050	PIRABEIRABA
5	65094500	AVENCAL	31	84100000	POÇO FUNDO
6	73350000	BARCA IRANI	32	71383000	PONTE ALTA DO SUL
7	73970000	BARRA DO CHAPECÓ	33	74320000	PONTE DO SARGENTO
8	73960000	BARRA DO CHAPECÓ AUX.	34	82770000	PONTE SC 301
9	83345000	BARRA DO PRATA	35	73730000	PORTO ELVINO
10	83800002	BLUMENAU	36	73770000	PORTO FAE NOVO
11	73300000	BONITO	37	84970000	PRAIA GRANDE
12	83900000	BRUSQUE	38	71300000	RIO BONITO
13	71800000	COLÔNIA SANTANA	39	84580000	RIO DO POUSO
14	82769800	ESTRADA DOS MORROS	40	83300200	RIO DO SUL NOVO
15	84150100	ETA - CASAN MONTANTE	41	65095000	RIO PRETO DO SUL
16	65220000	FLUVIOPÓLIS	42	72980000	RIO URUGUAI
17	84820000	FORQUILHINHA	43	83892990	SALSEIRO
18	65260000	FOZ DO CACHOEIRA	44	65180000	SALTO CANOINHAS
19	84853000	FOZ DO MANUEL ALVES	45	65295000	SANTA CRUZ DO TIMBÓ
20	83440000	IBIRAMA	46	84095500	SÃO JOÃO BATISTA
21	83690000	INDAIAL	47	84800000	SERRINHAS JUS. 200 m CASAN
22	83250000	ITUPORANGA	48	83050000	TAIÓ
23	82350000	JARAGUÁ DO SUL	49	72810000	TANGARA
24	84095000	NOVA TRENTO	50	84950000	TAQUARUÇU
25	84249998	ORLEANS MONTANTE	51	83677000	TIMBÓ NOVO
26	71550000	PASSO CARU			

6.2 ANÁLISE PRELIMINAR DE CONSISTÊNCIA DE DADOS

6.2.1 Preenchimento de Falhas

Observou-se que algumas estações apresentavam falhas nos valores de medição de vazão líquida e concentração de sedimentos para datas específicas. Tendo em vista a importância de uma série histórica completa, as vazões líquidas mensais faltantes foram completadas com a média das

vazões anteriores e posteriores. Para os dados de concentração de sedimentos faltantes não foi realizado a média devido ao erro acumulativo maior, e as respectivas datas foram excluídas da série histórica.

As estações que apresentaram falhas diárias nas medições de vazão líquida mensal foram: Apiúna com 01 falha; Apiúna – Nova Régua com 01 falha; Barca Irani com 01 falha; Barra do Chapecó com 03 falhas; Passo Nova Erechim com 10 falhas e Porto Fae Novo com 03 falhas. As estações que apresentaram falhas nas medições de concentração de sedimentos foram: Apiúna com 03 falhas, Barra do Prata com 01 falha, Brusque com 03 falhas, Indaial com 04 falhas, Rio do Pouso com 01 falha, Rio do Sul – Novo com 01 falha. As datas relativas a estas falhas foram excluída da série histórica.

6.2.2 Seleção das Estações para Obtenção da Curva-Chave

Para a obtenção de curva-chave de sedimento com boa representatividade é necessário uma série de dados com um quantidade mínima de dados. Quanto maior a quantidade de dados, maior será a precisão nos cálculos. Portanto, determinou-se como critério na seleção de estações, as estações que apresentassem dez ou mais medições de concentração de sedimento. As estações com menos de 10 medições de sedimentos foram descartadas por terem dados insuficientes. Segundo este critério as estações selecionadas para obtenção da curva-chave foram 29: Apiúna, Apiúna Nova Régua, Armazén Capivari, Avencal, Barca Irani, Barra do Chapecó Aux., Barra do Prata, Bonito, Brusque, Ibirama, Indaial, Ituporanga, Jaraguá do Sul, Nova Trento, Orleans Montante, Passo Caru, Passo Caxambu, Passo Marombas, Ponte Alta do Sul, Porto Fae Novo, Praia Grande, Rio Bonito, Rio do Pouso, Rio do Sul novo, Rio Preto do Sul, Rio Uruguai, Salto Canoinhas, São José

Batista e Taió. A Tabela 2.1 lista somente as 29 estações com mais 10 medições de concentração de sedimentos, das quais foram obtidas as equações de curva-chave.

Tabela 2.1 – Lista das 29 Estações com mais de 10 medições de concentração de sedimentos.

Nº	Código	Nome da Estação
1	83500002	APIÚNA
2	83500000	APIÚNA NOVA RÉGUA
3	84600000	ARMAZÉM CAPIVARI
4	65094500	AVENCAL
5	73350000	BARCA IRANI
6	73960000	BARRA DO CHAPECÓ aux.
7	83345000	BARRA DO PRATA
8	73300000	BONITO
9	83900000	BRUSQUE
10	83440000	IBIRAMA
11	83690000	INDAIAL
12	83250000	ITUPORANGA
13	82350000	JARAGUÁ DO SUL
14	84095000	NOVA TRENTO
15	84249998	ORLEANS MONTANTE
16	71550000	PASSO CARU
17	73550000	PASSO CAXAMBU
18	71498000	PASSO MAROMBAS
19	71383000	PONTE ALTA DO SUL
20	73770000	PORTO FAE NOVO
21	84970000	PRAIA GRANDE
22	71300000	RIO BONITO
23	84580000	RIO DO POUSO
24	83300200	RIO DO SUL NOVO
25	65095000	RIO PRETO DO SUL
26	72980000	RIO URUGUAI
27	65180000	SALTO CANOINHAS
28	84095500	SÃO JOÃO BATISTA
29	83050000	TAIÓ

A Tabela 2.2 reproduz a Tabela 1, onde são listadas as estações que realizam medições de sedimentos, e inclui uma coluna na qual discrimina-se as estações que apresentam mais de 10 medições como **OK** e as que têm menos de 10 medições de sedimento como **Dados insuficientes**. Isto significa que do total de estações que realizam medição de concentração de sedimentos, 56,86% têm dados suficientes para análise da curva-chave.

Em Apêndice I, encontra-se uma tabela com os números de medições de concentração de sedimentos em suspensão realizadas entre os anos de 1972 a 2008. Esta tabela foi construída com base nos dados disponibilizados pela Agência Nacional de Águas, no site HidroWeb. Uma das grandes dificuldades em se trabalhar com dados fluviométricos reside no fato de que as medições de sedimentos realizadas no Brasil não seguem uma rotina padronizada, e o número de medições de sedimentos em suspensão realizadas é muito baixo para que se assegure uma boa confiabilidade nos cálculos. Conforme a variação das estações fluviométricas, variam-se também o número de medições dos dados.

Tabela 2 – Discrimina as estações com mais de 10 medições de concentração de sedimentos classificadas para obtenção da curva-chave para análise da curva-chave.

Nº	Código	Nome da Estação	CLASSIFICAÇÃO	Nº	Código	Nome da Estação	CLASSIFICAÇÃO
1	83500002	APIÚNA	OK	27	73550000	PASSO CAXAMBU	OK
2	83500000	APIÚNA NOVA RÉGUA	OK	28	71498000	PASSO MAROMBAS	OK
3	84600000	ARMAZÉM CAPIVARI	OK	29	73850000	PASSO NOVA ERECHIM	Dados insuficientes
4	83675000	ARROZEIRA	Dados insuficientes	30	82270050	PIRABEIRABA	Dados insuficientes
5	65094500	AVENCAL	OK	31	84100000	POÇO FUNDO	Dados insuficientes
6	73350000	BARCA IRANI	OK	32	71383000	PONTE ALTA DO SUL	OK
7	73970000	BARRA DO CHAPECÓ	Dados insuficientes	33	74320000	PONTE DO SARGENTO	Dados insuficientes
8	73960000	BARRA DO CHAPECÓ aux.	OK	34	82770000	PONTE SC 301	Dados insuficientes
9	83345000	BARRA DO PRATA	OK	35	73730000	PORTO ELVINO	Dados insuficientes
10	83800002	BLUMENAU	Dados insuficientes	36	73770000	PORTO FAE NOVO	OK
11	73300000	BONITO	OK	37	84970000	PRAIA GRANDE	OK
12	83900000	BRUSQUE	OK	38	71300000	RIO BONITO	OK
13	71800000	COLÔNIA SANTANA	Dados insuficientes	39	84580000	RIO DO POUSO	OK
14	82769800	ESTRADA DOS MORROS	Dados insuficientes	40	83300200	RIO DO SUL NOVO	OK
15	84150100	ETA - CASAN MONTANTE	Dados insuficientes	41	65095000	RIO PRETO DO SUL	OK
16	65220000	FLUVIOPÓLIS	Dados insuficientes	42	72980000	RIO URUGUAI	OK
17	84820000	FORQUILHINHA	Dados insuficientes	43	83892990	SALSEIRO	Dados insuficientes
18	65260000	FOZ DO CACHOEIRA	Dados insuficientes	44	65180000	SALTO CANOINHAS	OK
19	84853000	FOZ DO MANUEL ALVES	Dados insuficientes	45	65295000	SANTA CRUZ DO TIMBÓ	Dados insuficientes
20	83440000	IBIRAMA	OK	46	84095500	SÃO JOÃO BATISTA	OK
21	83690000	INDAIAL	OK	47	84800000	SERRINHA JUS. 200 m CASAN	Dados insuficientes
22	83250000	ITUPORANGA	OK	48	83050000	TAIÓ	OK
23	82350000	JARAGUÁ DO SUL	OK	49	84950000	TAQUARUÇU	Dados insuficientes
24	84095000	NOVA TRENTO	OK	50	72810000	TANGARA	Dados insuficientes
25	84249998	ORLEANS MONTANTE	OK	51	83677000	TIMBÓ NOVO	Dados insuficientes
26	71550000	PASSO CARU	OK				

6.3 CURVAS-CHAVE

Por meio dos dados de vazão líquida diária, Q_L (m³/s), e concentração de sedimentos em suspensão, C (ppm), obteve-se a curva-chave de sedimentos de cada estação segundo a metodologia apresentada por Carvalho et al, 2000. Com a utilização da equação abaixo que correlaciona descarga líquida (Q_L) e descarga sólida (Q_{ss}), efetuou-se a transformação das

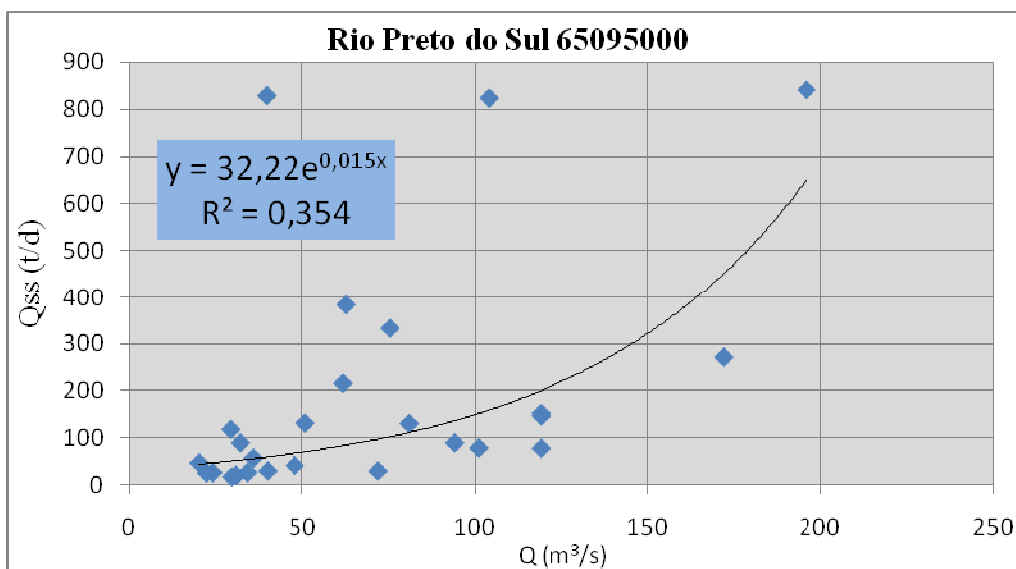
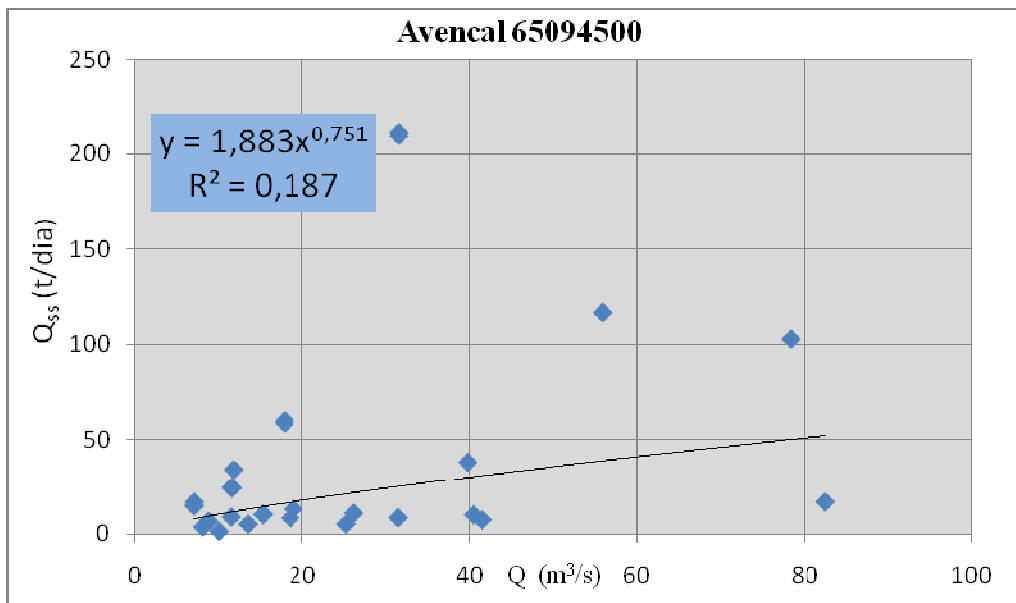
séries de vazões líquidas diárias (Q_L) de cada estação em fluxo de sedimentos em suspensão (Q_{ss}):

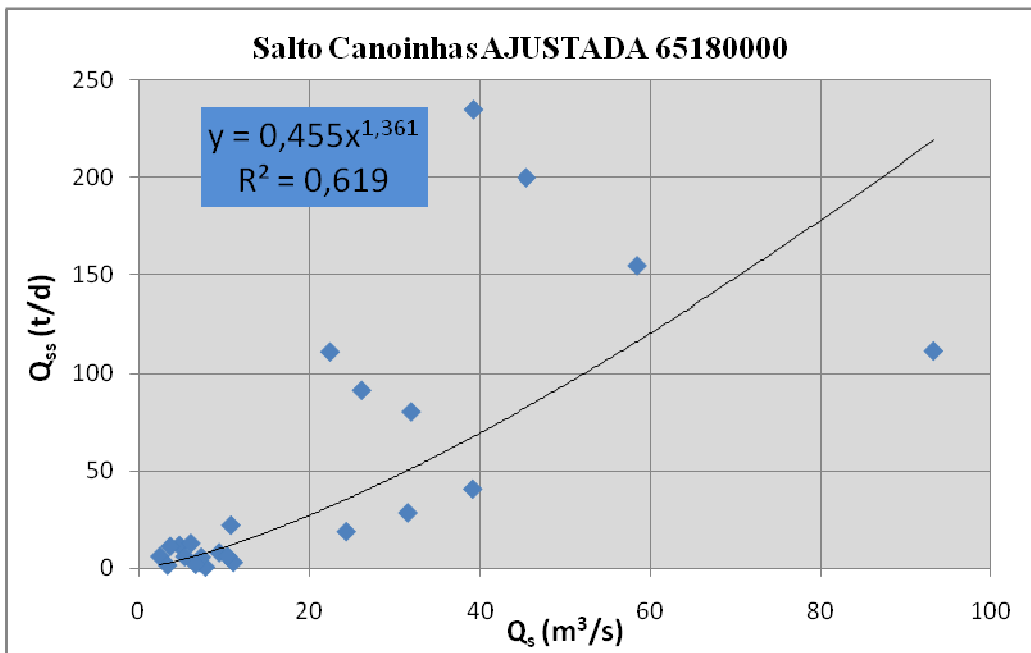
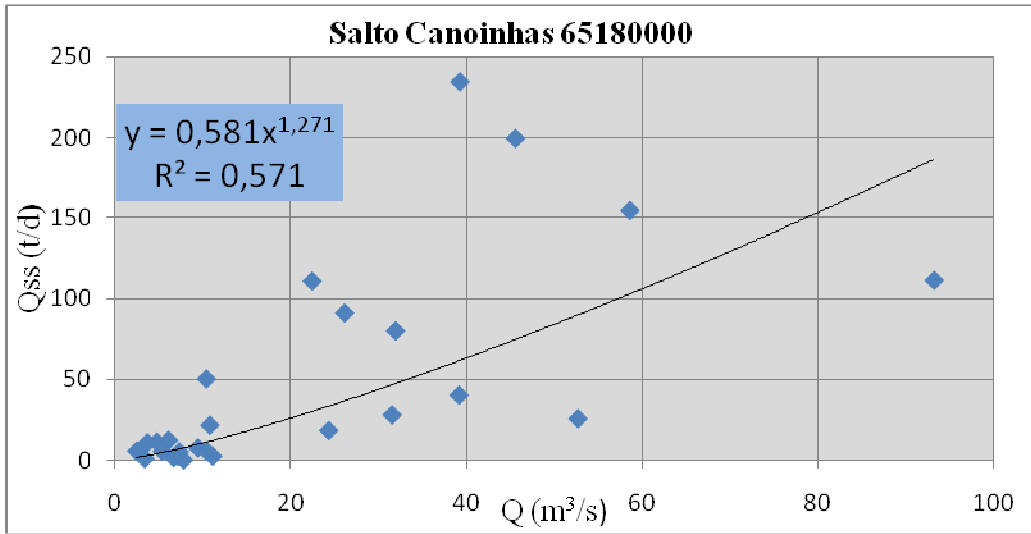
$$Q_{ss} = 0,0864 * Q_L * C$$

Após a obtenção das curvas chaves, por meio do programa Microsoft Excell 2007, foi observado que algumas estações apresentavam o coeficiente de correlação, R^2 , muito baixo devido a um ponto discrepante. Este ponto pode ter sua origem em erros de medição, que segundo o Guia de Prática Sedimentométrica (CARVALHO, 2000) podem ocorrer em consequência de: má escolha do equipamento, equipamento defeituoso, erro de operação na amostragem, erro devido à medição da vazão que incidirá no cálculo e na amostragem, erro de análises do sedimento ou até mesmo erros na colocação da vírgula ou do ponto. Ao extrair estes pontos discrepantes (que consistiam em 1 ou 2 pontos) do conjunto de dados, obteve-se um R^2 superior a 0,6. As estações que passaram por este procedimento foram chamadas de **Estações Ajustadas**.

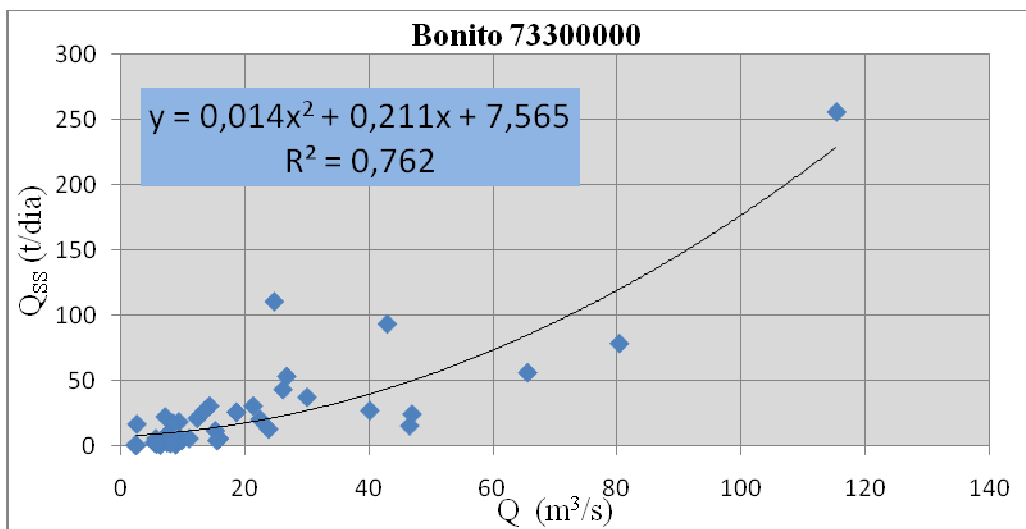
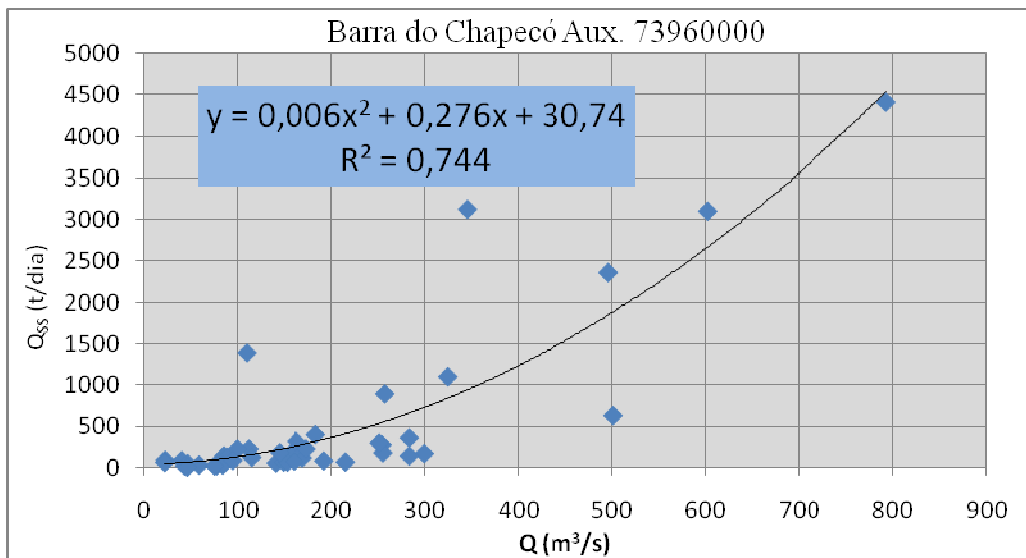
Segue-se abaixo os gráficos de curva-chaves para 29 estações fluviométricas classificadas no item 6.2.2., separadas por bacias hidrográficas e ordem crescente de código de identificação. Algumas estações possuem dois gráficos, um apresetando a curva-chave com o conjunto de dados original e outro apresentando a curva-chave depois de extraído os pontos isolados.

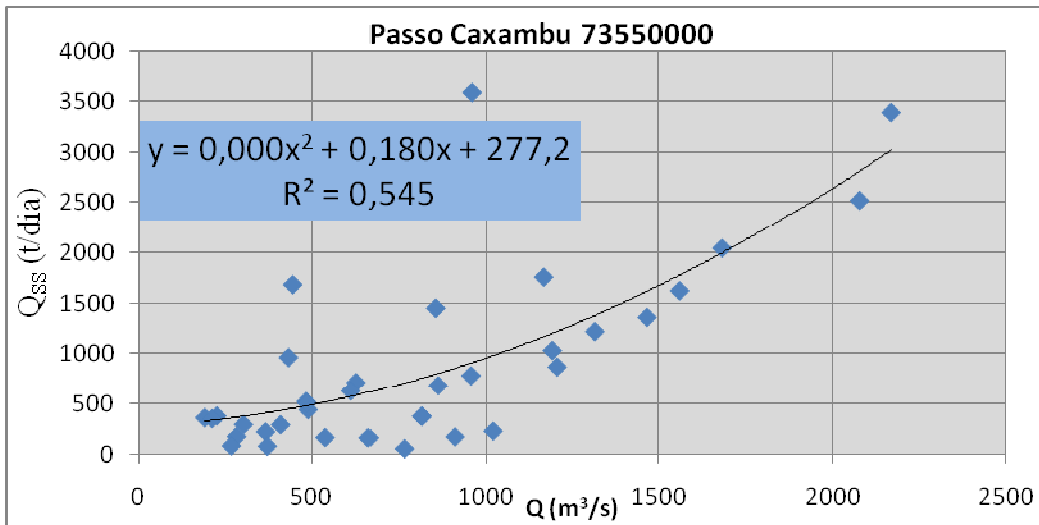
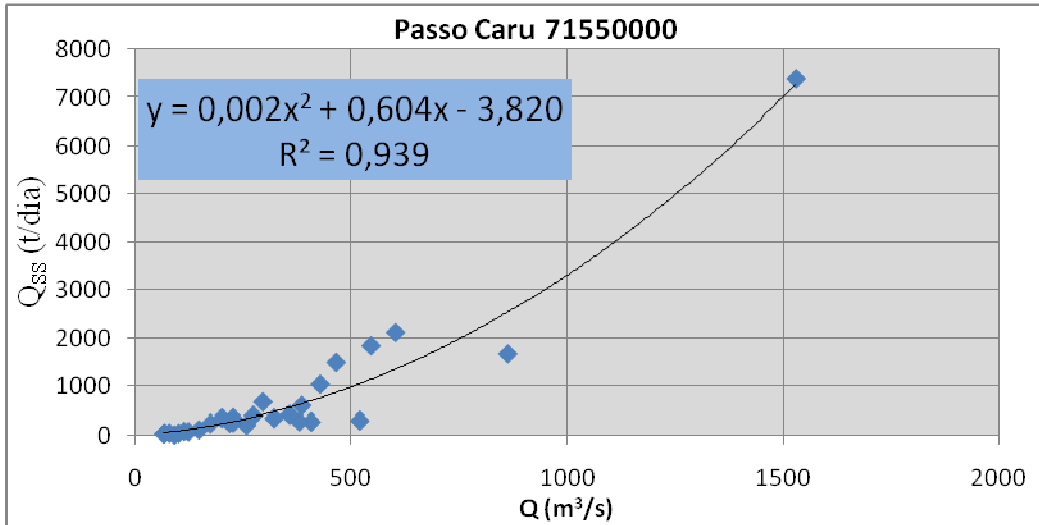
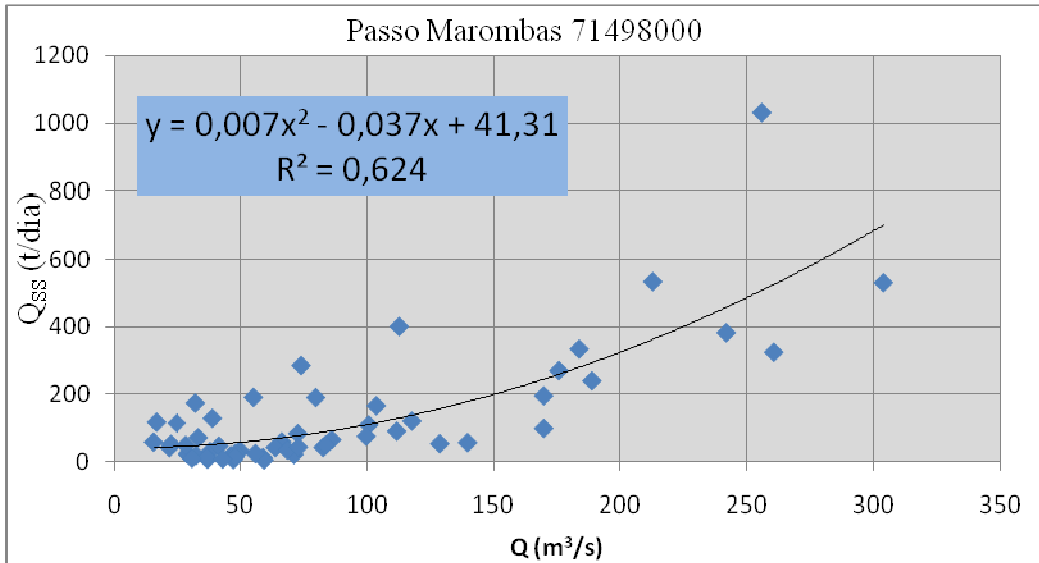
6.3.1 Bacia do Rio Paraná

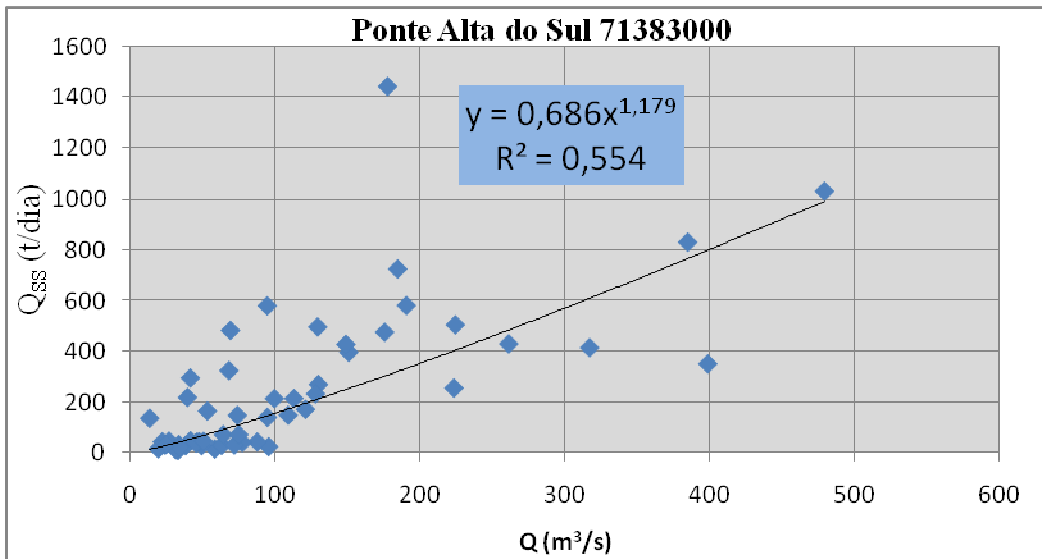
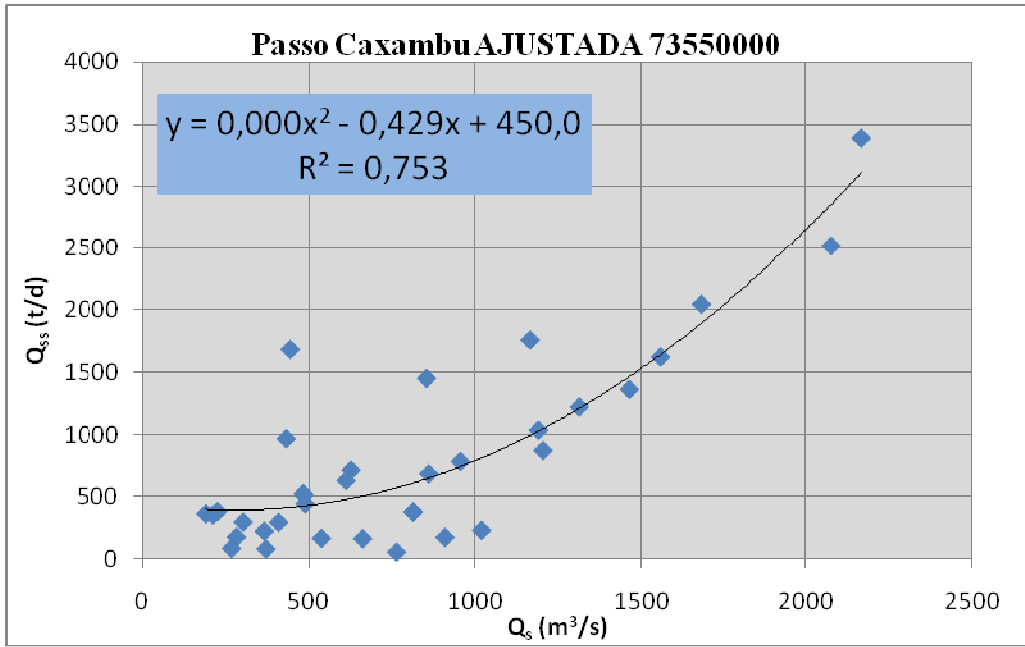


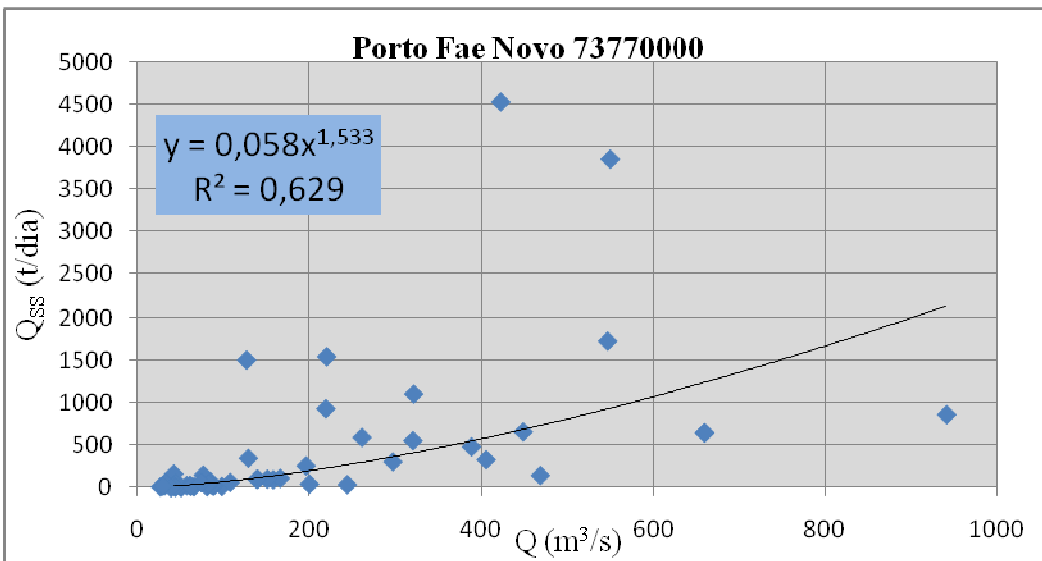
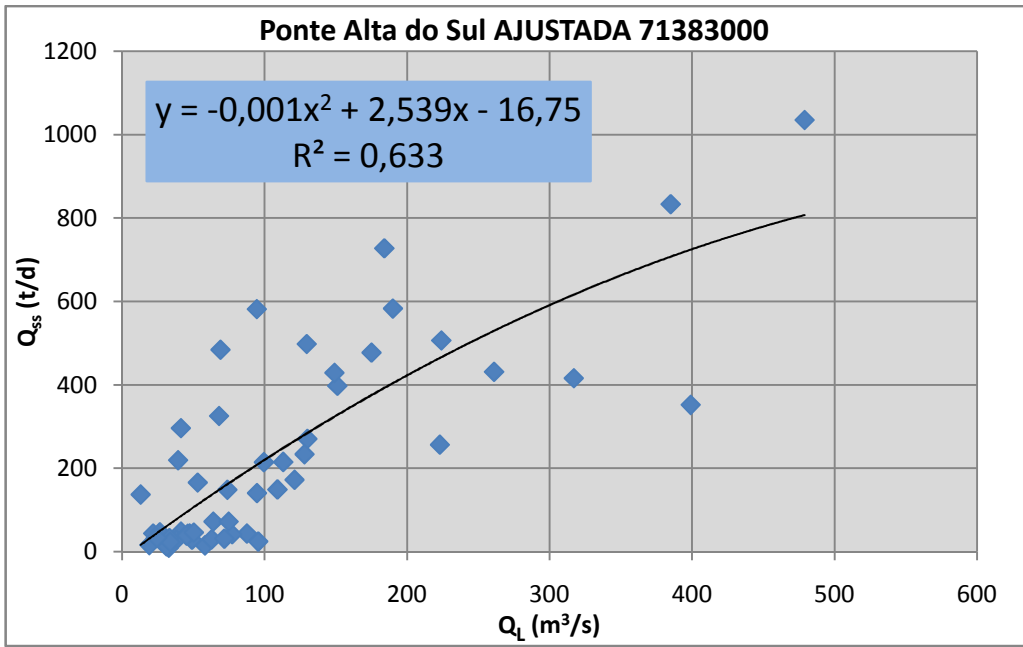


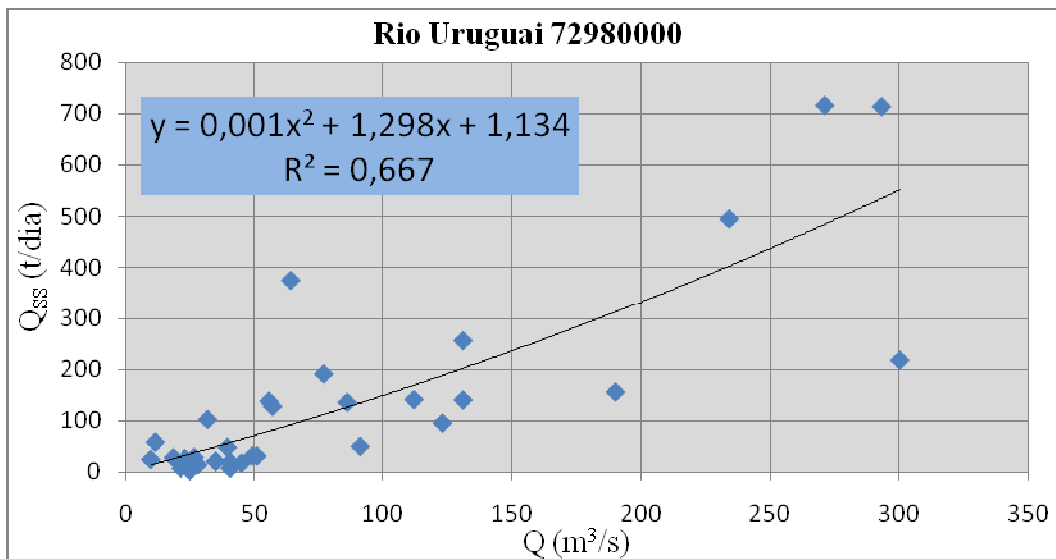
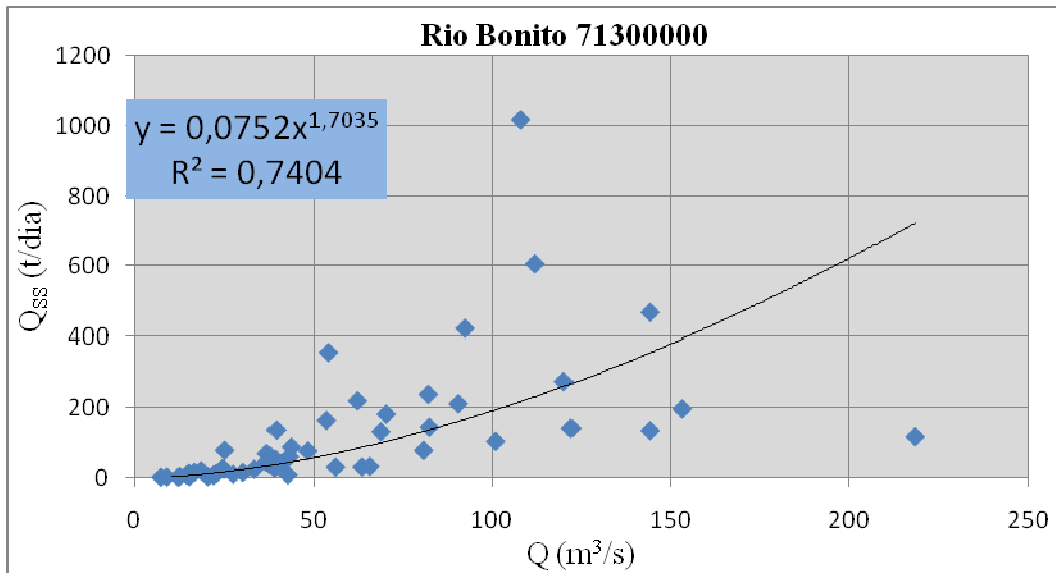
6.3.2 Bacia Rio Uruguai

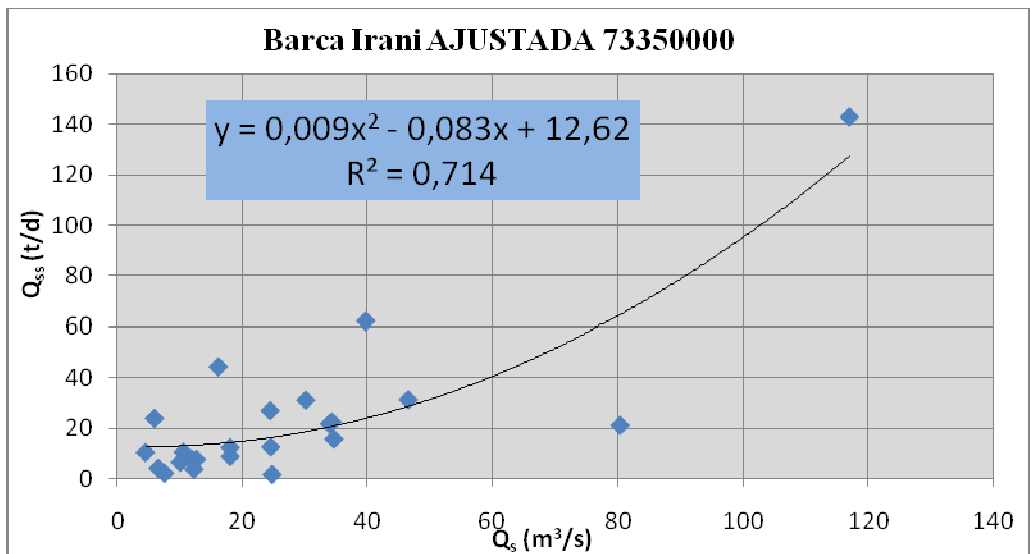
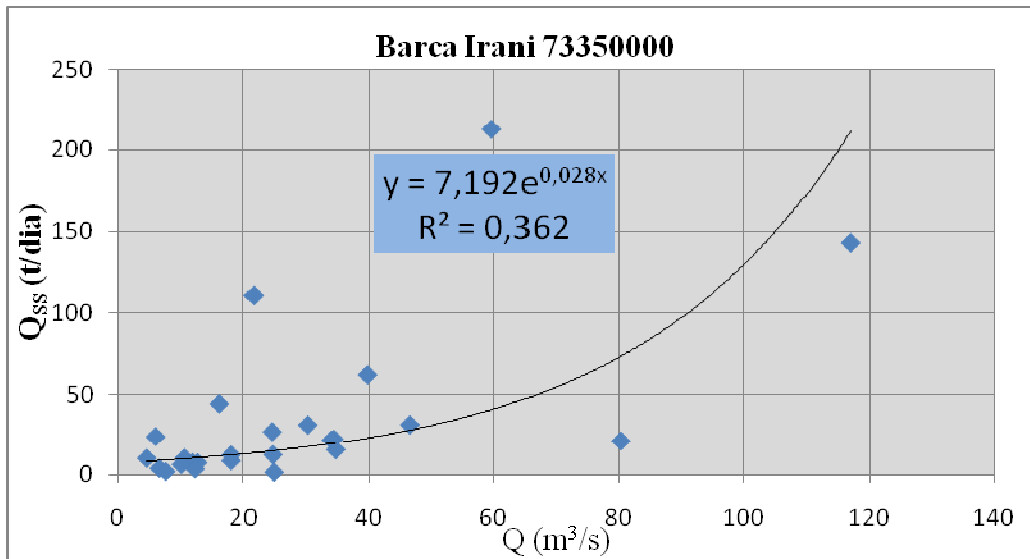




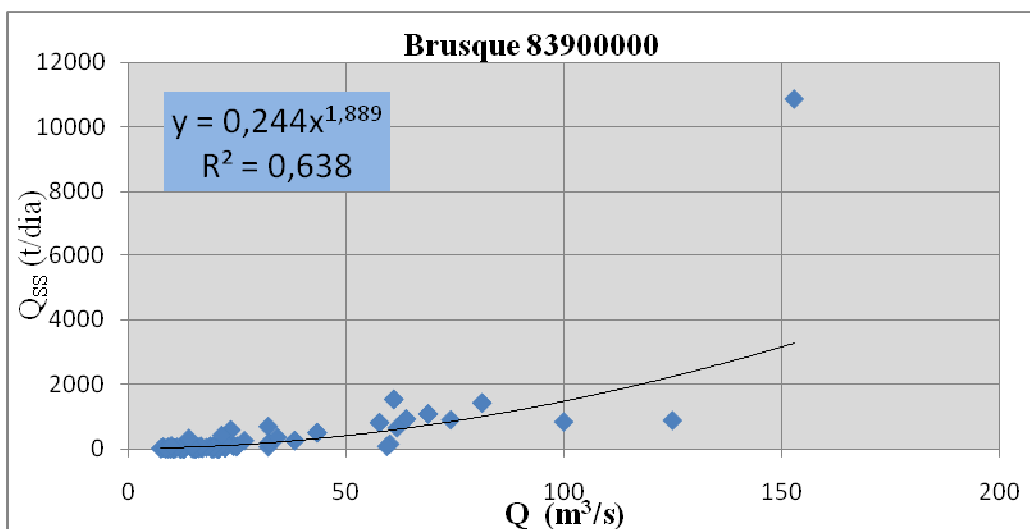
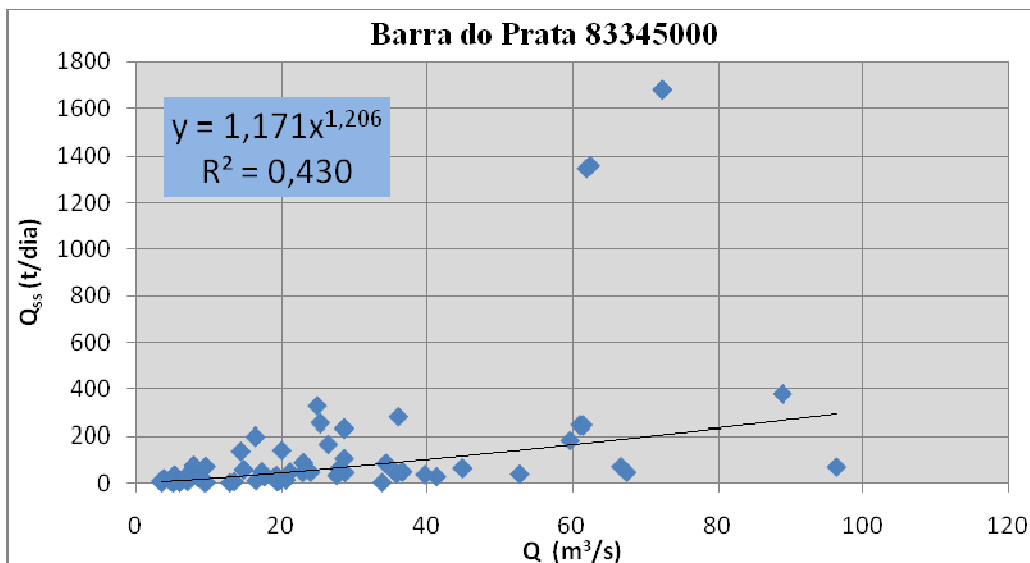


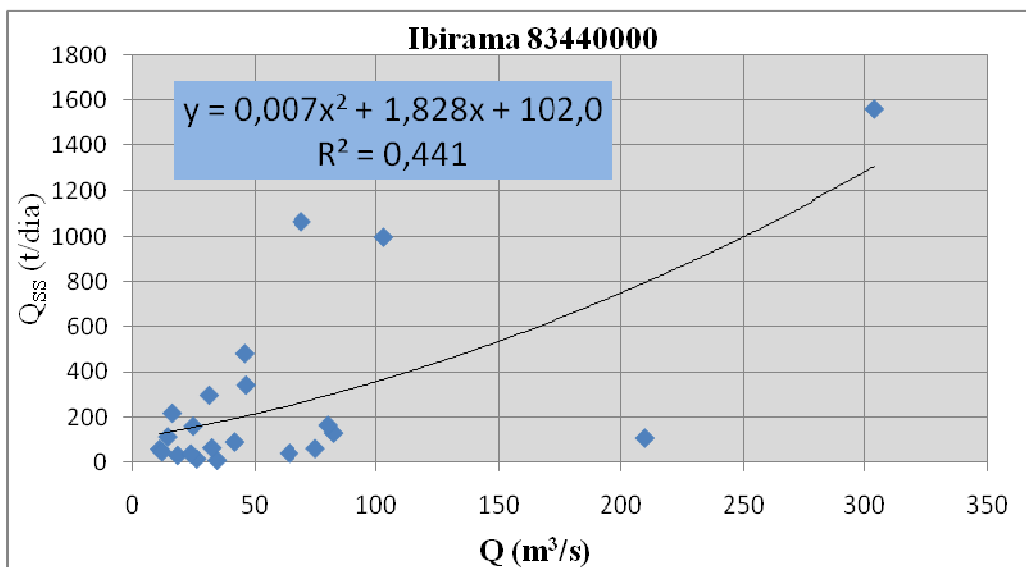
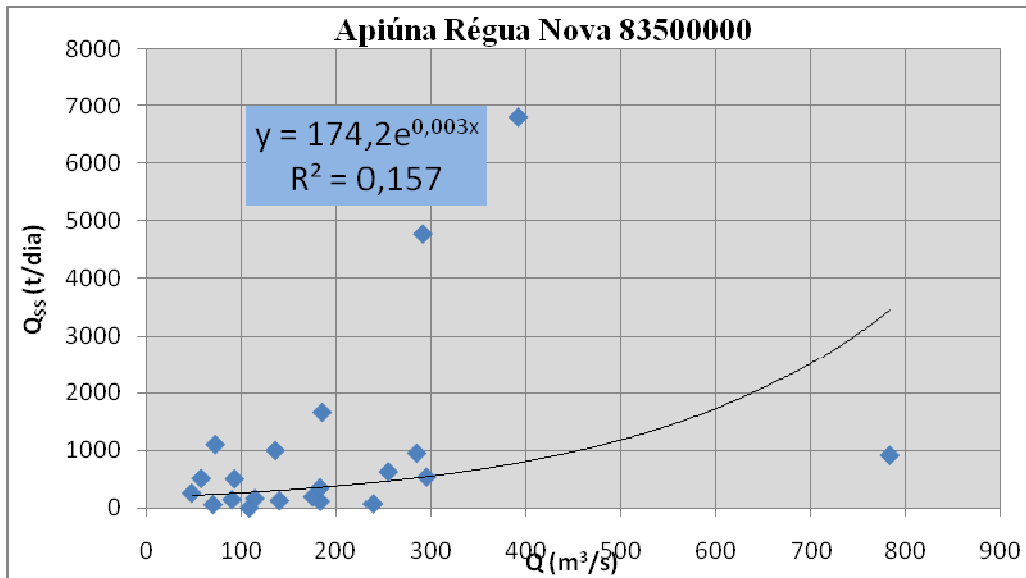


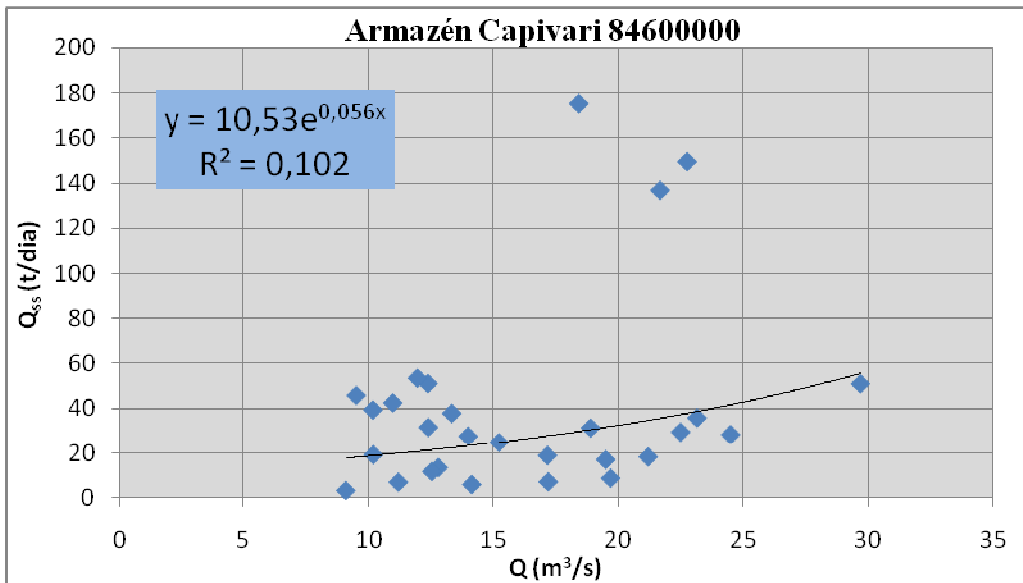
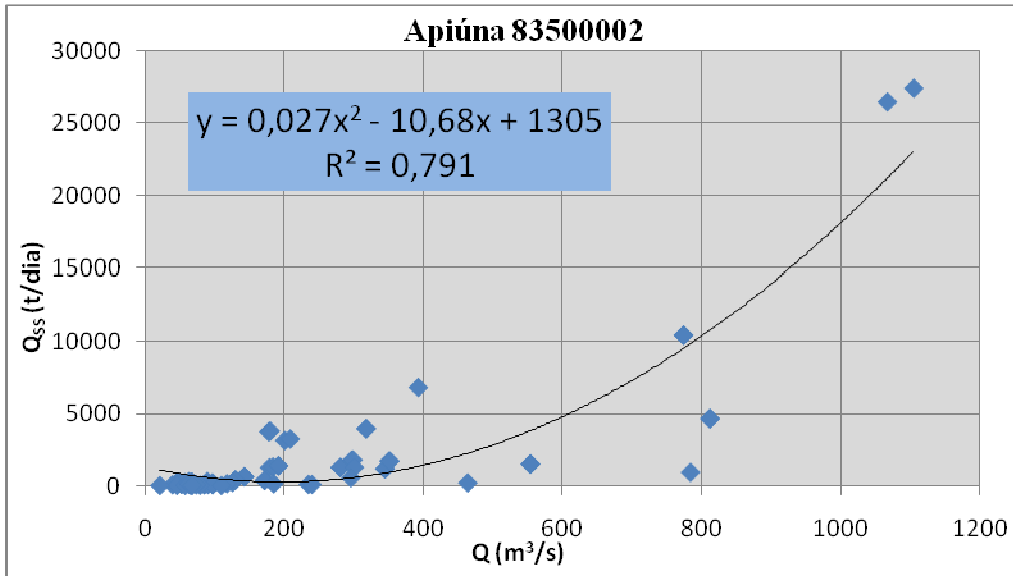


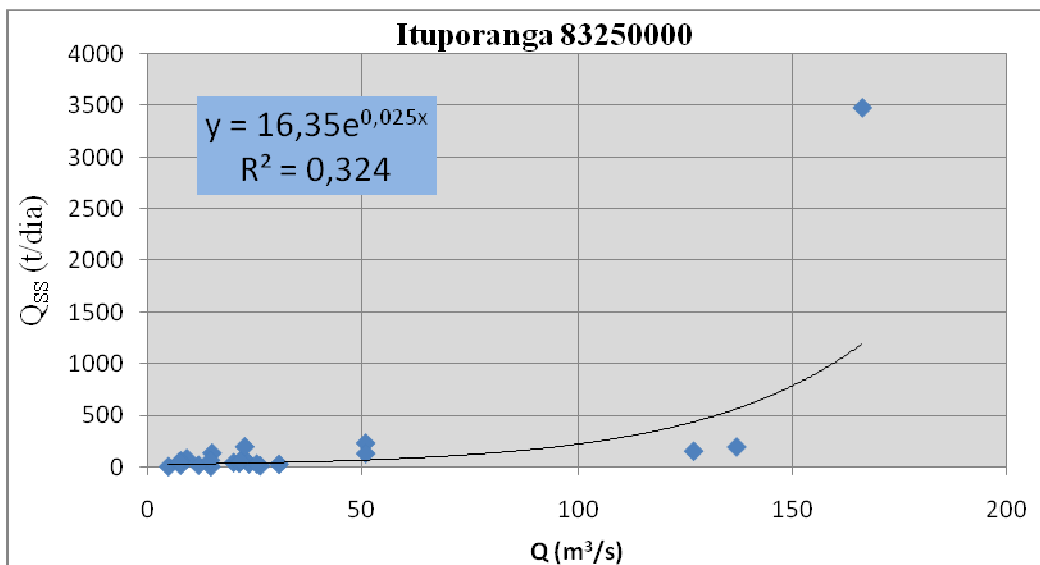
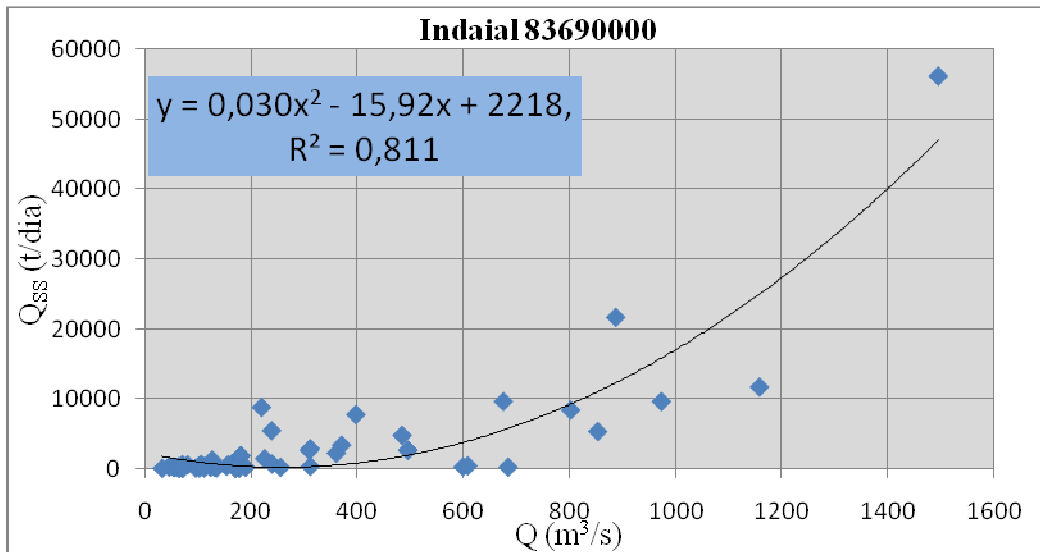


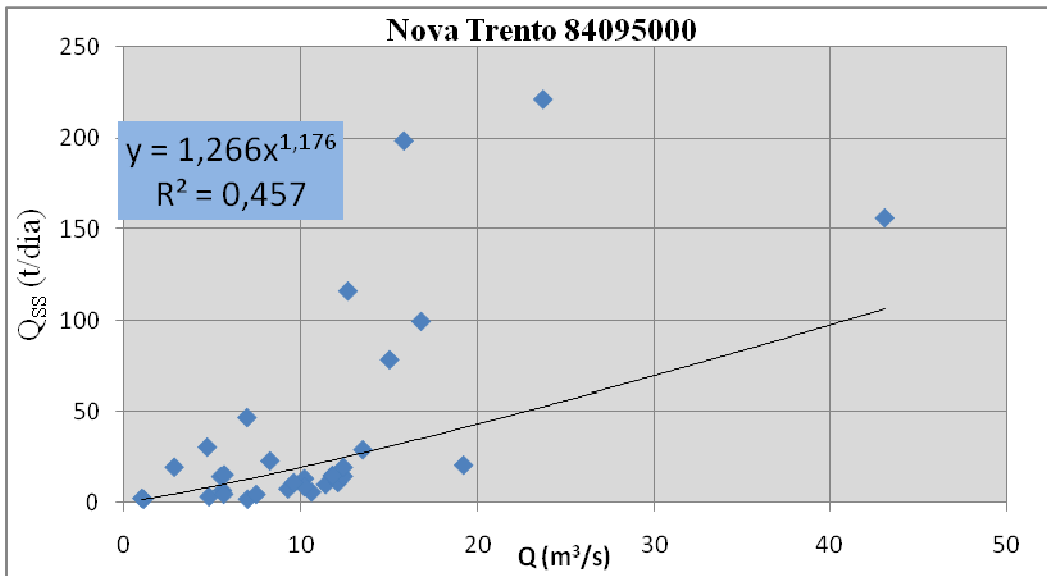
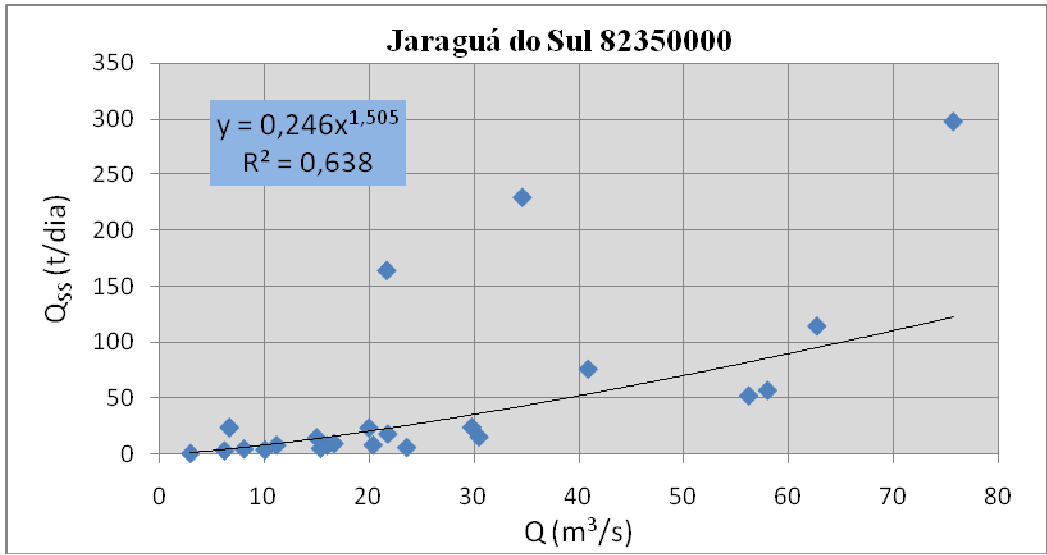
6.3.3. Bacia Atlântico – Trecho Sudeste

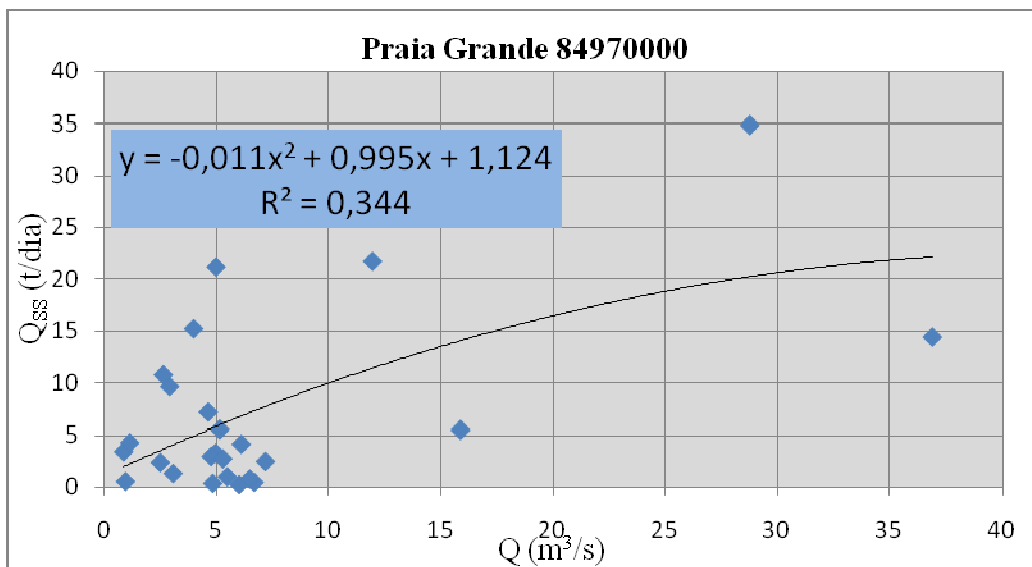
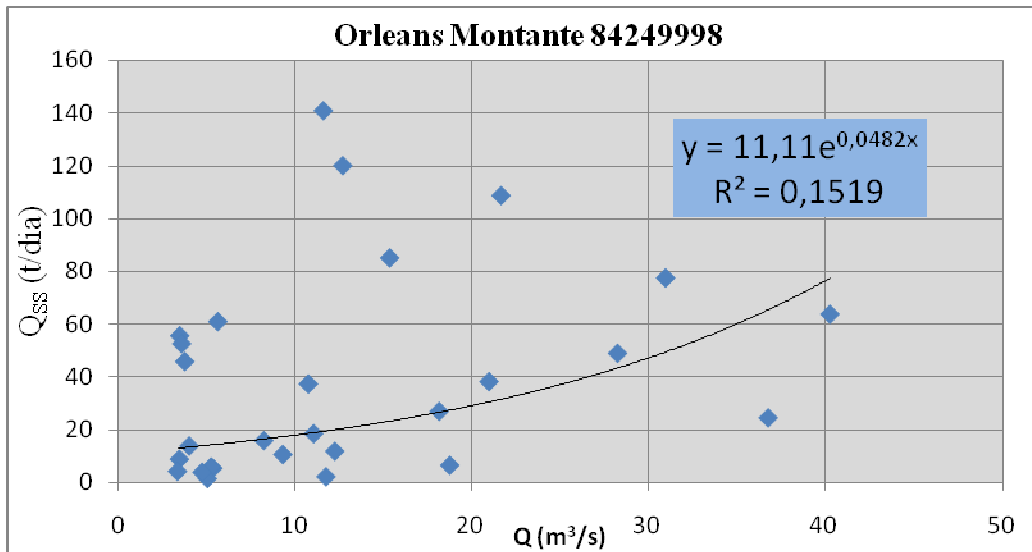


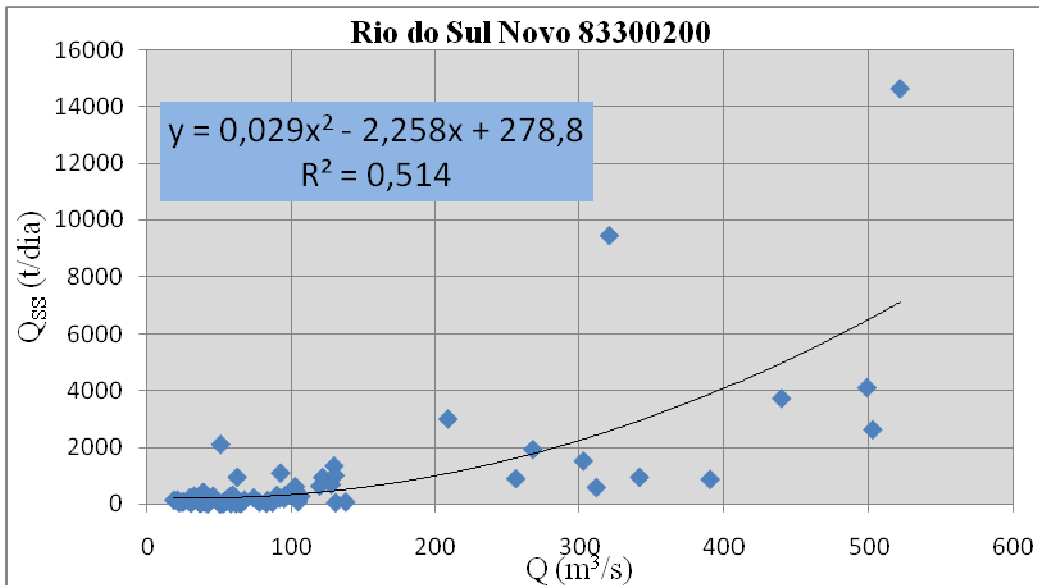
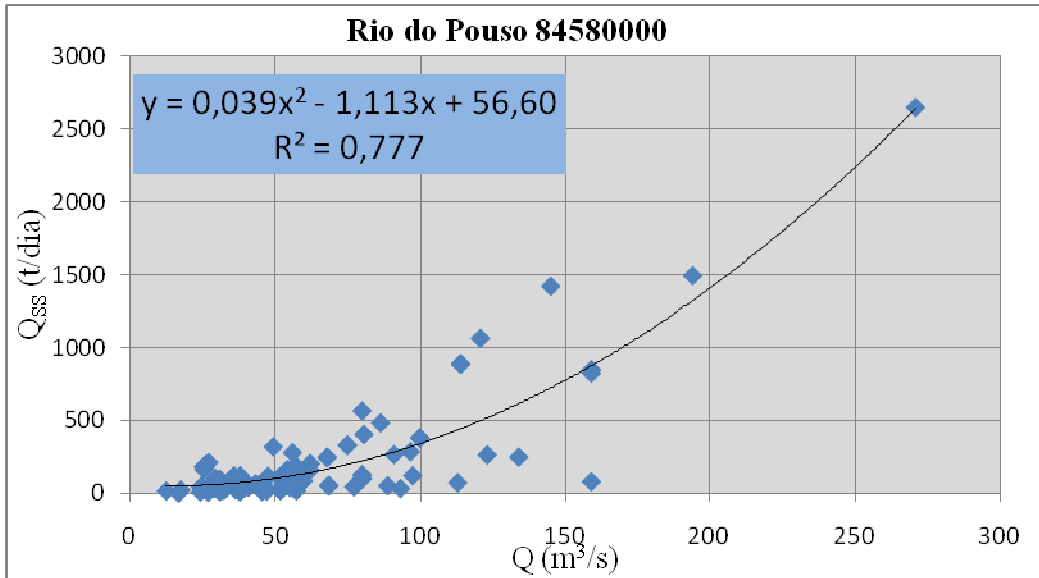


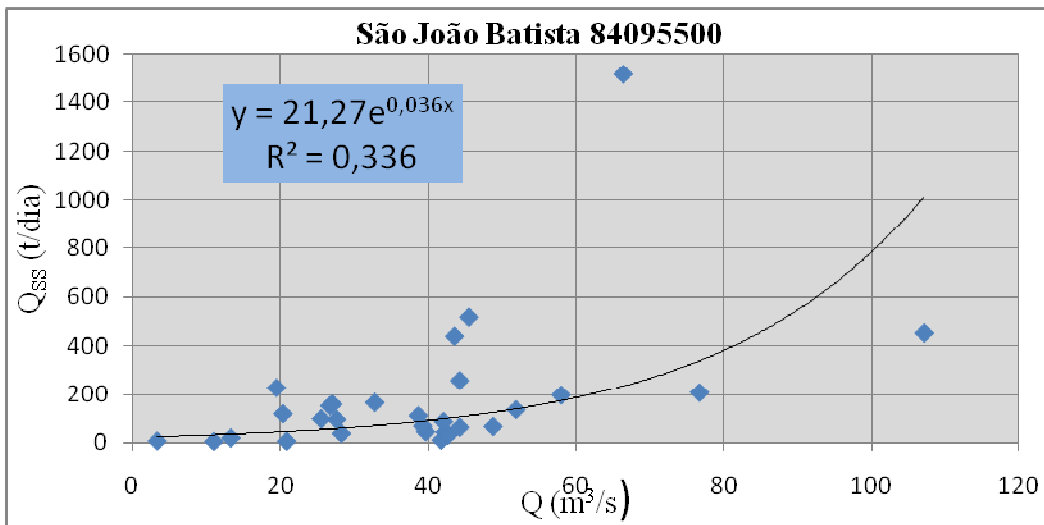
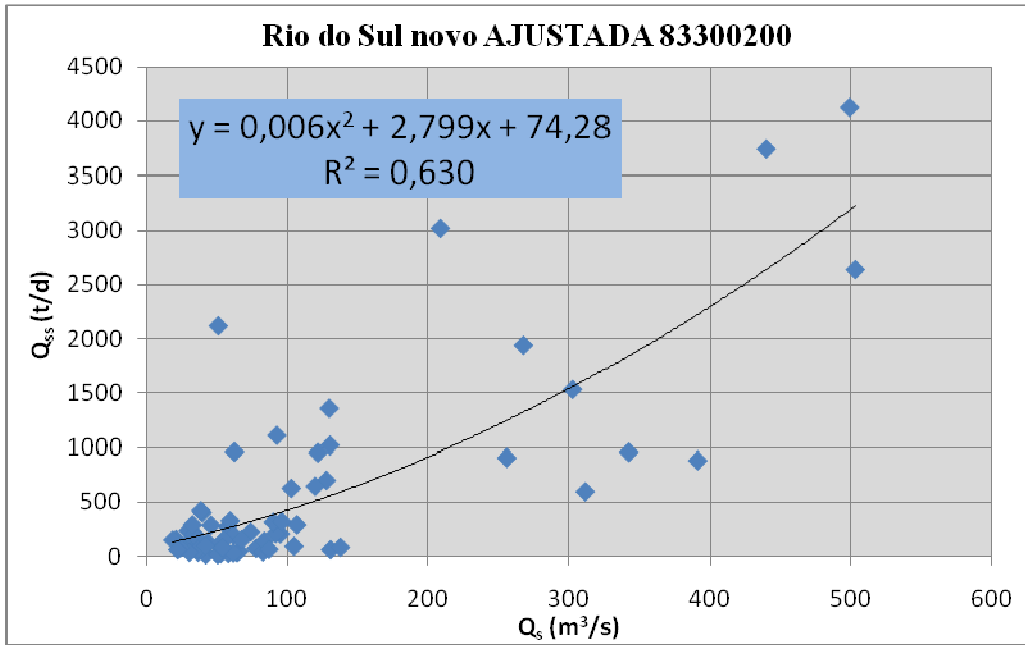


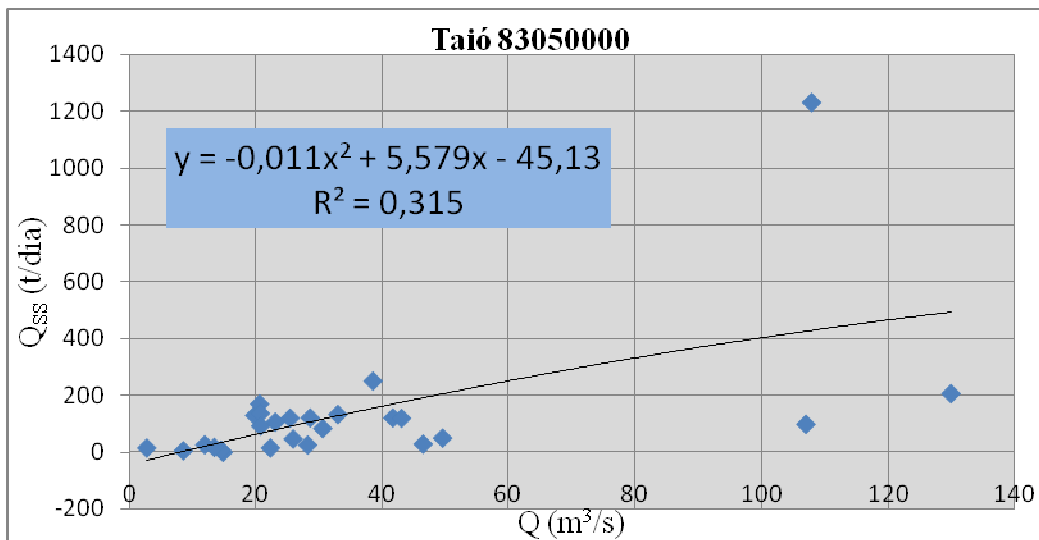












6.3.1 Classificação das Curvas-Chave

Apenas as estações que apresentaram curva-chave com coeficiente de correlação (R^2) maior ou igual a 0,6 foram selecionadas para a etapa seguinte. Este critério foi adotado para evitar a utilização de curvas-chaves com baixa correlação entre as descargas sólidas e líquidas, na tentativa de minimizar a acumulação de erros. Veja na Tabela 3 abaixo as 17 estações com R^2 maior que 0,6.

Tabela 3 – Estações classificadas conforme o Coeficiente de Correlação da Curva-chave (R²)

Código	Nome	Curva-chave	R ²
65180000	Salto Canoinhas Ajustada	$y = 0,455x^{1,361}$	0,619
71300000	Rio Bonito	$y = 0,075x^{1,703}$	0,74
71383000	Ponte Alta do Sul Ajustada	$y = -0,001x^2 + 2,539x - 16,75$	0,633
71498000	Passo Marombas	$y = 0,007x^2 - 0,037x + 41,31$	0,624
71550000	Passo Caru	$y = 0,002x^2 + 0,604x - 3,820$	0,939
72980000	Rio Uruguai	$y = 0,001x^2 + 1,298x + 1,134$	0,667
73300000	Bonito	$y = 0,014x^2 + 0,211x + 7,565$	0,762
73350000	Barca Irani Ajustada	$y = 0,009x^2 - 0,083x + 12,62$	0,714
73770000	Porto Fae Novo	$y = 0,058x^{1,533}$	0,629
73550000	Passo Caxambu Ajustada*	$y = 0,000x^2 - 0,429x + 450,0$	0,753
73960000	Barra do Chapecó Aux.	$y = 0,006x^2 + 0,276x + 30,74$	0,744
82350000	Jaraguá do Sul	$y = 0,246x^{1,505}$	0,638
83300200	Rio do Sul novo Ajustada	$y = 0,006x^2 + 2,799x + 74,28$	0,63
83500002	Apiuna	$y = 0,027x^2 - 10,68x + 1305$	0,791
83690000	Indaial	$y = 0,030x^2 - 15,92x + 2218$	0,811
83900000	Brusque	$y = 0,244x^{1,889}$	0,638
84580000	Rio do Pouso	$y = 0,039x^2 - 1,113x + 56,60$	0,777

*A equação Ajustada da Estação Passo Caxambu não foi utilizada para o cálculo da erosão específica média, pois quando se utilizou a curva-chave as descargas sólidas em suspensão resultaram com sinal negativo. Portanto, esta estação foi excluída das análises seguintes, mesmo tendo o R² maior que 0,6.

6.4 PERÍODOS DE ANÁLISE

A Tabela 4 foi construída para visualização dos períodos em anos durante os quais houve medição diária de vazão líquida. Estas medições são importantes porque foram utilizadas como dados de entrada na aplicação das curvas-chaves às séries históricas.

Pode-se verificar na Tabela 4, em folha A3, que as estações têm períodos diversos de medições de vazão líquida diária. Por exemplo, as medições de Apiúna começaram em

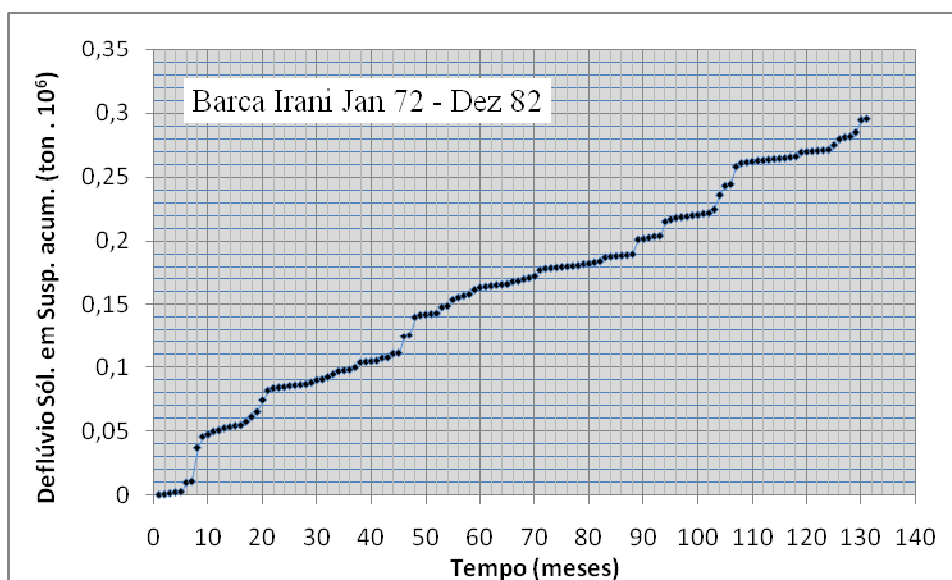
1934 e foram até 1997, enquanto que Barca Irani iniciou suas medições apenas em 1969 indo até 2006. Para dar continuidade no cálculo do deflúvio sólidos em suspensão, foi necessária a escolha de um período uniforme. Esta escolha representou uma grande dificuldade, algumas estações não puderam fazer parte da análise pois seus dados não encontravam uniformidade com as outras. Pode-se notar, na tabela apresentada, que a década de 1990 concentra grande parte das falhas nas medições, ou seja, um período difícil de análise. Então, decidiu-se excluir a década de 1990 e dividir o período de análise em dois blocos: o primeiro bloco abrange os anos de Janeiro de 1972 a Dezembro de 1982 e o segundo abrange os anos de Janeiro de 1996 a Dezembro de 2006. Portanto, foi obtido para cada estação dois gráficos de deflúvios sólido em suspensão acumulado, um para cada período, permitindo assim uma análise comparativa do transporte de sedimentos entre duas décadas.

A3

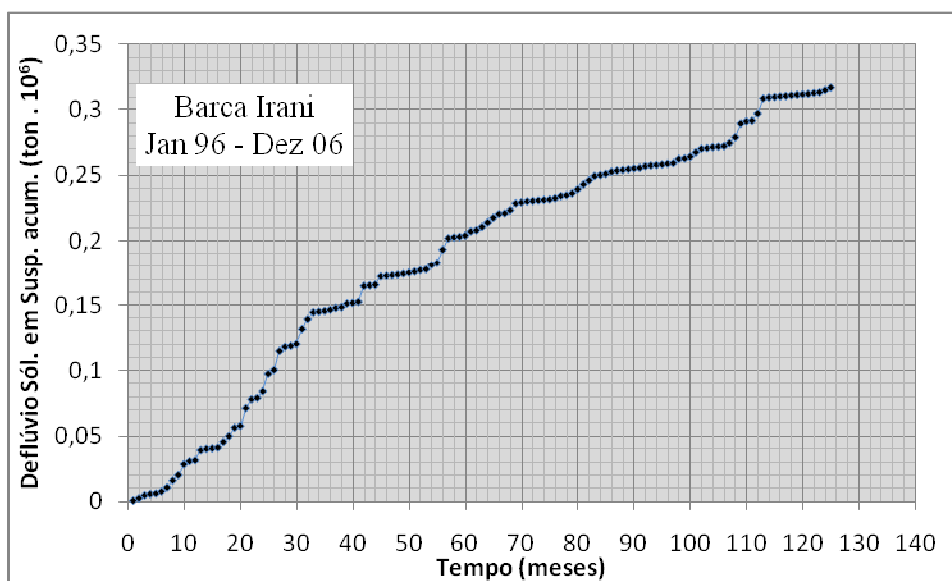
6.5 DEFLÚVIO SÓLIDO EM SUSPENSÃO ACUMULADO

No item anterior, as curvas-chave selecionadas com R^2 maior que 0,6 foram aplicadas às séries históricas de vazões líquidas diárias das estações selecionadas. O eixo das abcissas (eixo X) representa o tempo em meses. Por consequência de haver dois períodos selecionados para análise: 1972-1982 e 1996-2006, serão apresentados abaixo dois gráficos de deflúvio sólido em suspensão acumulado para cada estação. O eixo das coordenadas (eixo Y) representa os valores de deflúvios sólidos em suspensão acumulados, com unidade de $\text{ton} \cdot 10^6 / \text{dia}$. Em algumas estações faltavam dados para alguns meses, não completando, exatamente, 11 anos (132 meses). Por conta disto, padronizou-se 140 meses no eixo do tempo. Segue abaixo os gráficos de deflúvio sólido em suspensão acumulado obtidos.

6.5.1. Estação Barca Irani



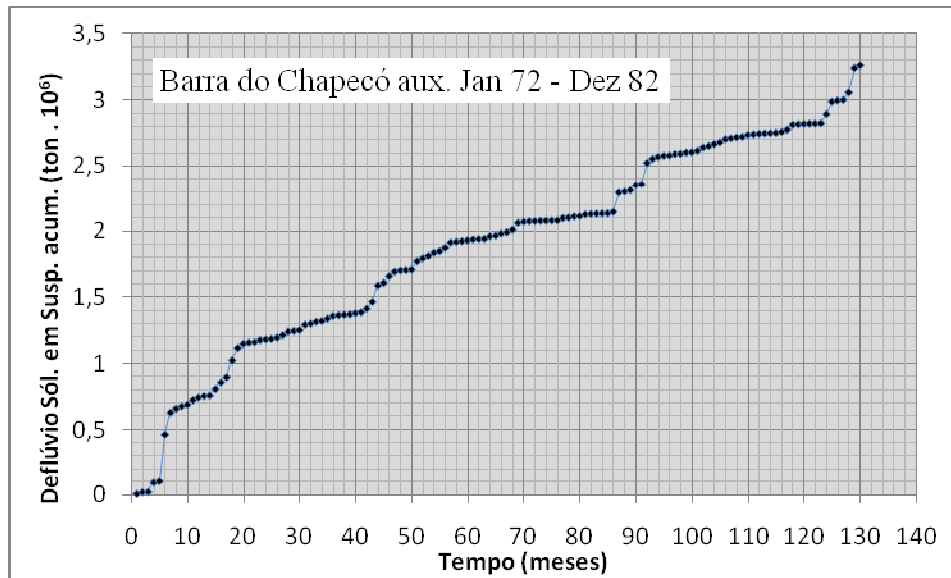
A erosão específica média calculada para os anos de 1972 a 1982 resultou em 17,95 ton/km².ano. Nota-se um aumento na descarga sólida mensal no início da curva. Este aumento pode sinalizar a ocorrência de enchentes, entre outros fatores. De forma geral, a taxa mensal de descarga sólida foi, à grosso modo, aproximadamente constante nestes 11 anos.



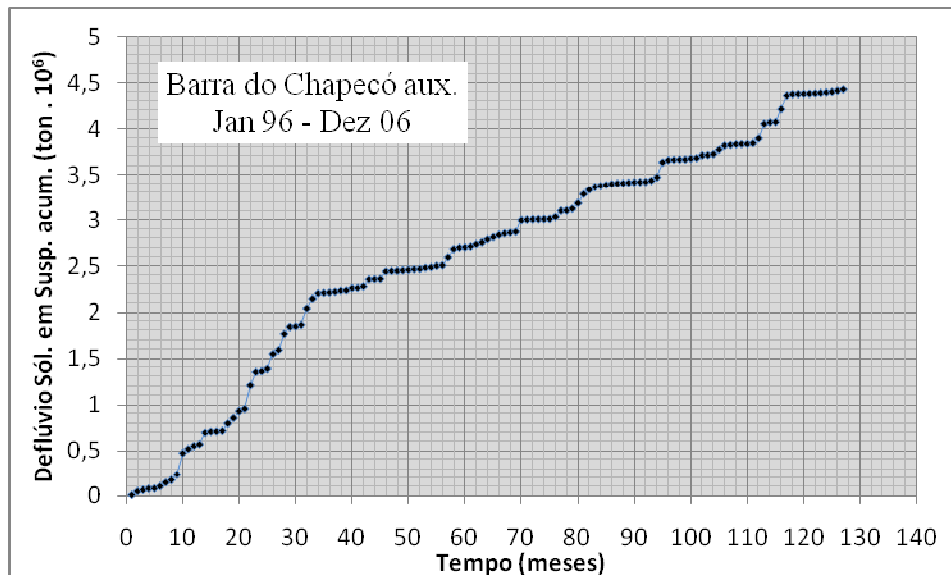
A erosão específica média calculada para os anos de 1996 a 2006 resultou em 19,25 ton/km².ano. Visualmente pode-se notar no gráfico acima, duas inclinações médias diferentes: a taxa de descarga sólida mensal do mês “zero” (Jan/96) ao mês 32(Set/98) foi maior que a taxa dos meses seguintes.

Comparando os valores da erosão específica média da década mais antiga (1972-1982) em relação a mais recente (1996-2006), verifica-se um aumento de, aproximadamente, 7,24%. Portanto, a estação fluviométrica Barca Irani apresentou resultados crescentes de erosão específica média.

6.5.2. Estação Barra do Chapecó aux.



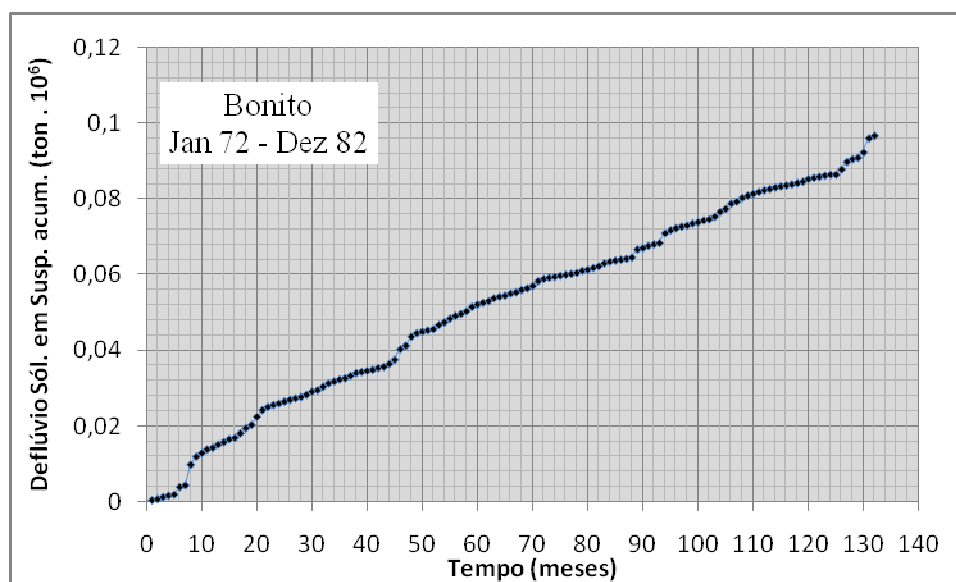
A erosão específica média calculada para os anos de 1972 a 1982 da Estação Barra do Chapecó aux., resultou em 36,43 ton/km².ano. No ano de 1972, nota-se um forte aumento no fluxo de sedimentos em suspensão, que saltou de aproximadamente 0,2 x 10⁶ toneladas para 0,5 x 10⁶. Este salto representa, provavelmente, um período marcado por enchentes.



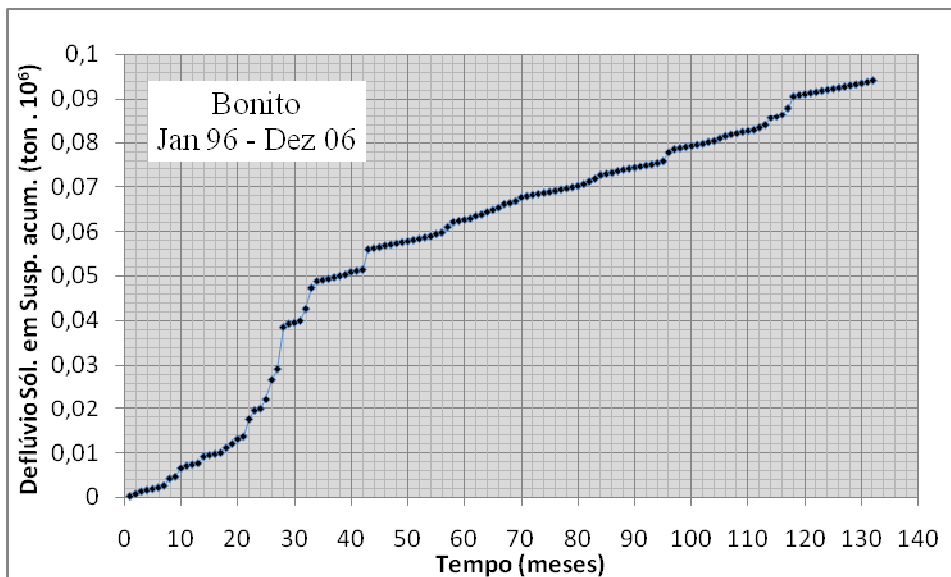
A erosão específica média calculada para os anos de 1996 a 2006 resultou em 51,15 ton/km².ano. Aparentemente nota-se duas inclinações médias diferentes indicando maior erosão do mês “zero” ao mês 34.

Em comparação com a década anterior, houve um aumento de 40,4%. Portanto, a estação fluviométrica Barra do Chapecó aux. Apresentou erosão específica média crescente.

6.5.3. Estação Bonito



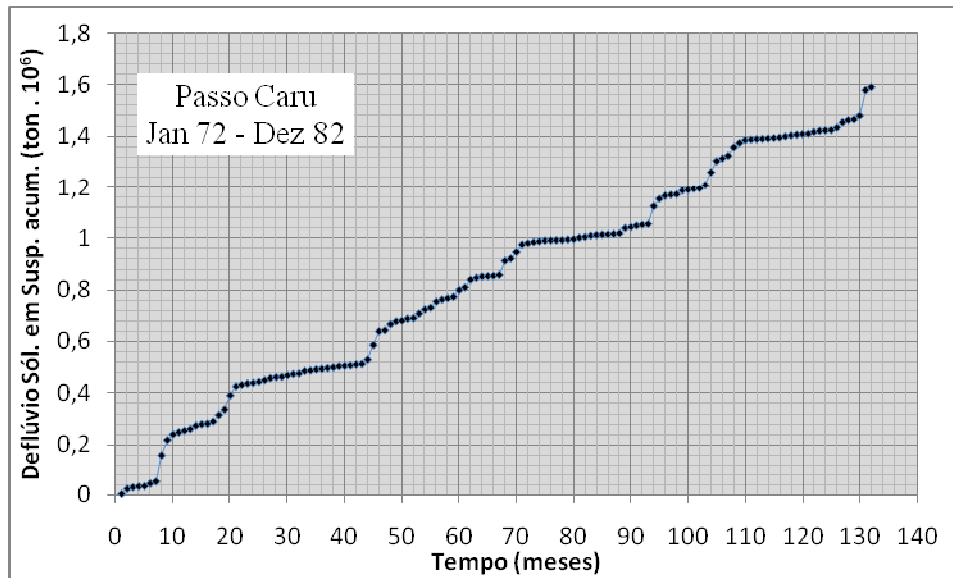
A erosão específica média calculada para os anos de 1972 a 1982 da Estação Bonito, resultou em 10,65 ton/km².ano. Através da análise visual da curva, representada no gráfico acima, verifica-se que a taxa de descarga sólida mensal foi aproximadamente constante aos longos dos 11 anos analisados, que vai de Janeiro de 1972 a Dezembro de 1982.



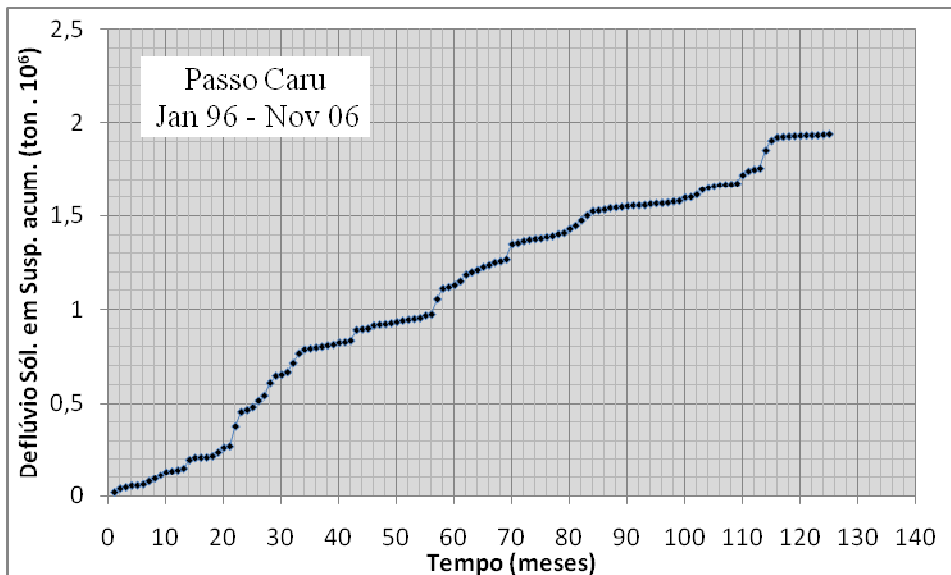
A partir da análise do gráfico acima (96-06) da Estação Bonito verifica-se que nos meses situados entre 20 (Agosto/1997) e 40 (Abril/1999) houve um aumento significativo no fluxo de sólidos em suspensão. Este aumento sinaliza ocorrência de enchentes.

Enquanto que para a década de 1972 a 1972 o resultado foi de 10,65 ton/km².ano, para o período de 1996 a 2006 foi de 10,38 ton/km².ano. Neste caso, houve uma pequena redução da erosão específica média, em torno de -2,53%.

6.5.4. Estação Passo Caru

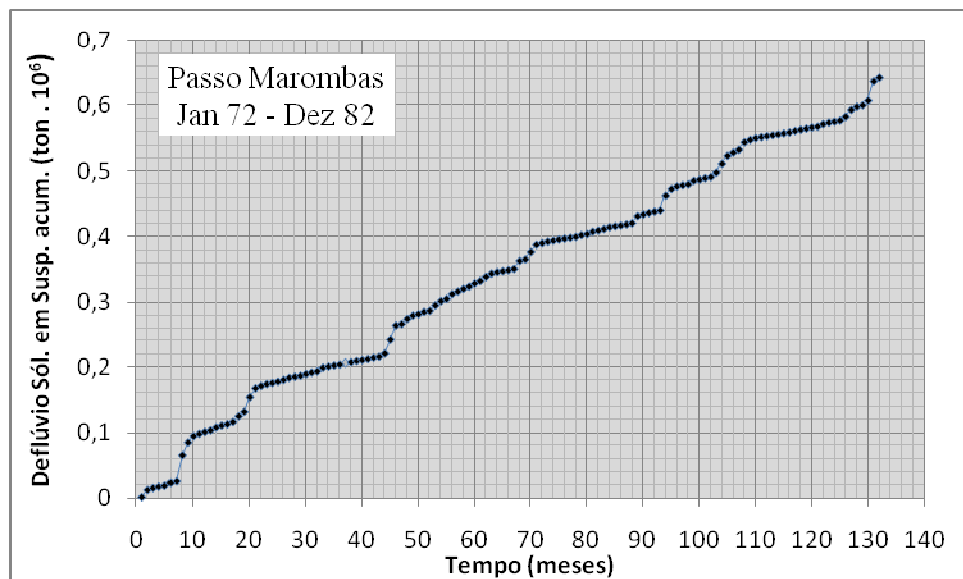


A erosão específica média calculada para os anos de 1972 a 1982 da Estação Passo Caru, resultou em 14,67 ton/km².ano. No gráfico acima, nota-se que a taxa mensal de descarga sólida foi, à grosso modo, aproximadamente constante nestes 11 anos que vão de Janeiro de 1972 a Dezembro de 1982.

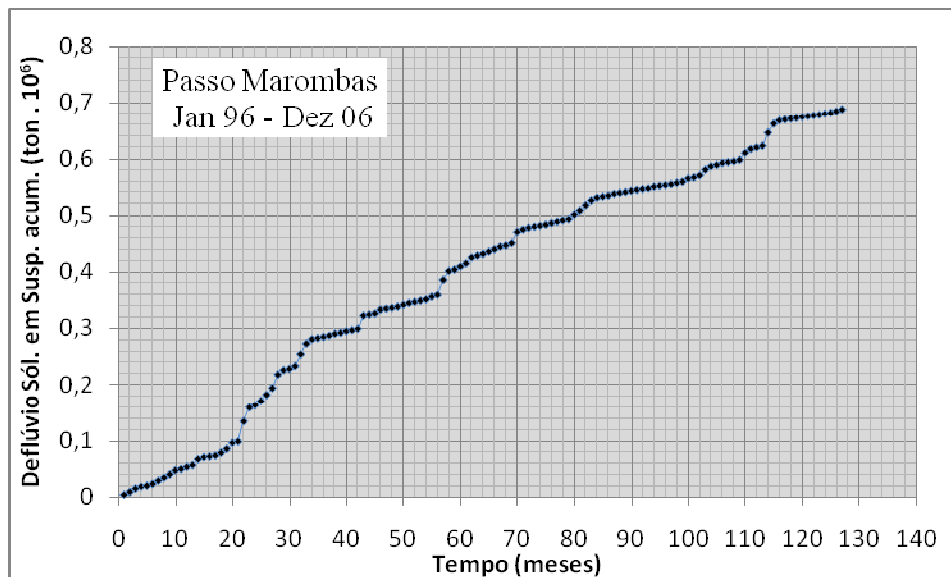


A erosão específica média calculada para os anos de 1996 a 2006 resultou em 18,88 ton/km².ano. Em comparação com a década mais antiga (72-82) houve um aumento na erosão específica média de 28,7%.

6.5.5. Estação Passo Marombas

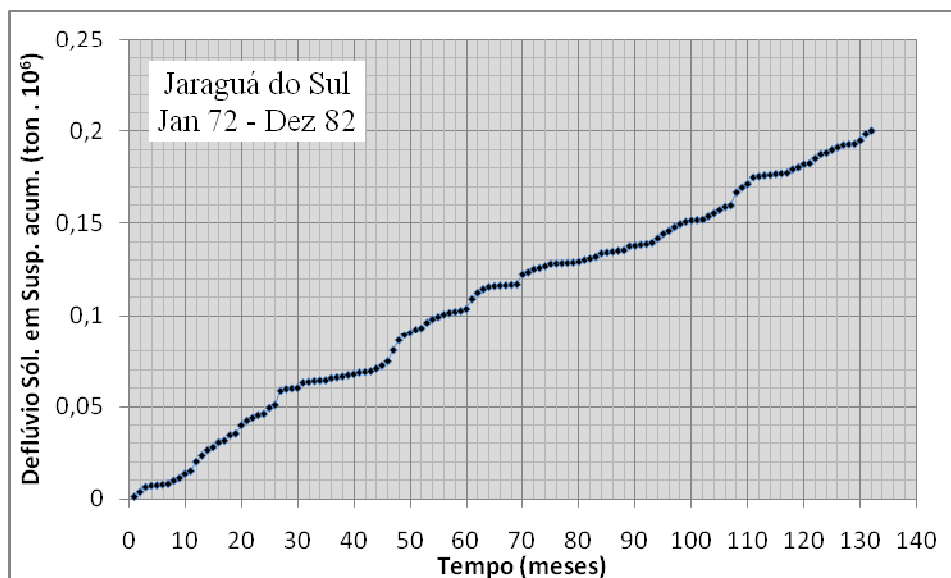


A erosão específica média calculada para os anos de 1972 a 1982 da Estação Passo Marombas, resultou em 15,97 ton/km².ano.

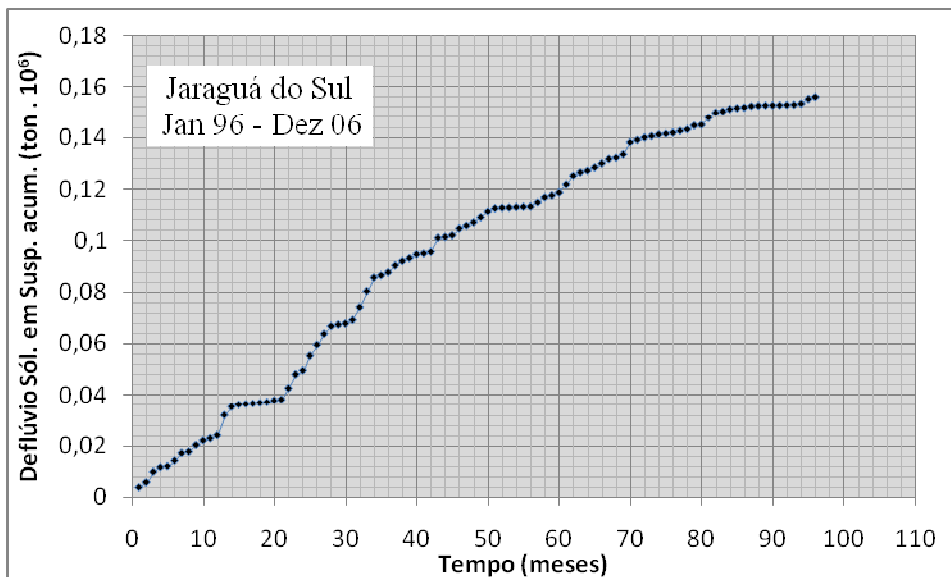


A erosão específica média calculada para os anos de 1996 a 2006 resultou em 17,95 ton/km².ano. Em comparação com a década antiga (72-82) houve um aumento na erosão específica média de 12,4%.

6.5.6. Estação Jaraguá do Sul

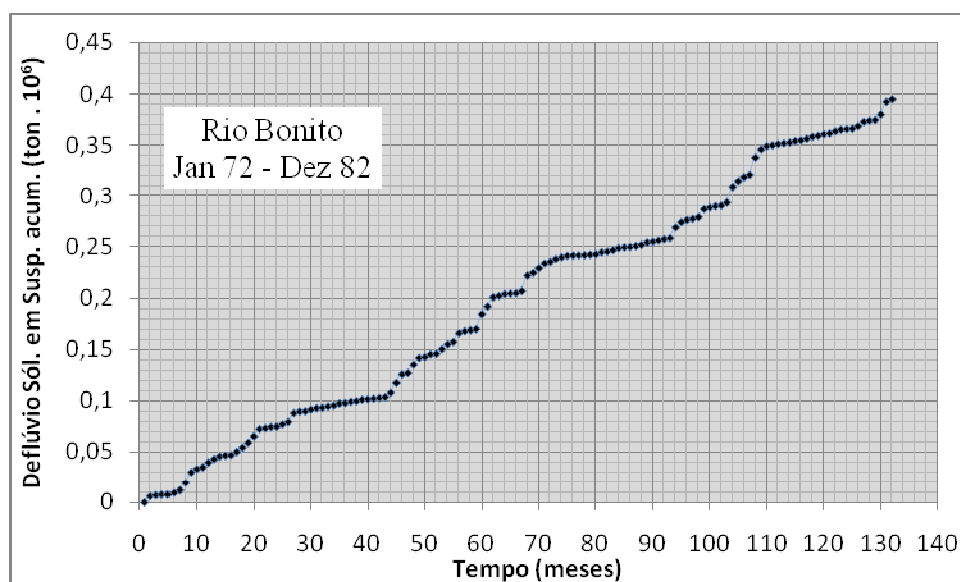


A erosão específica média calculada para os anos de 1972 a 1982 da Estação Jaraguá do Sul, resultou em 22,89 ton/km².ano.

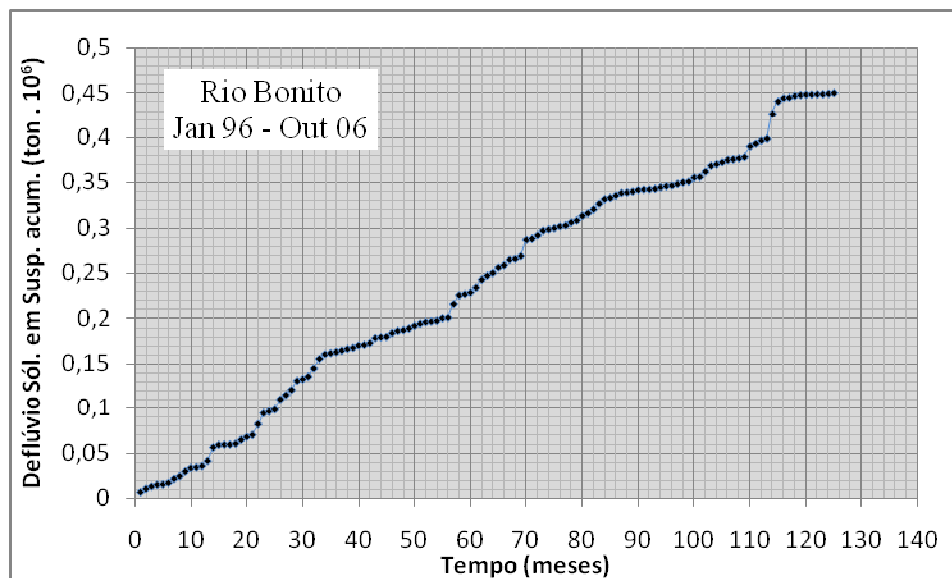


A erosão específica média calculada para os anos de 1996 a 2006 resultou em 24,55 ton/km².ano. Em comparação com o período de 11 anos compreendido entre 1972 a 1982 houve um aumento na erosão específica média de 7,25%.

6.5.7. Estação Rio Bonito



A erosão específica média calculada para os anos de 1972 a 1982 da Estação Rio Bonito, resultou em 323,11 ton/km².ano.



A erosão específica média calculada para os anos de 1996 a 2006 resultou em 386,32 ton/km².ano. Em comparação com o período de 11 anos compreendido entre 1972 a 1982, houve um aumento na erosão específica média de 19,56 %.

6.6 EROSÃO ESPECÍFICA MÉDIA

6.6.1 Erosão Específica Média para os Períodos de 72/82 e 96/06

Os dados de todas as estações apresentadas acima foram organizados em duas tabelas: na Tabela 5.1 lista-se as estações com ordem decrescente de valor de erosão específica média e seus respectivos valores de diferença percentual entre as erosões específicas calculada para os dois períodos considerados. A diferença percentual foi calculada conforme a seguinte fórmula:

$$\text{Dif. Porc. (em\%)} = \frac{\text{E.E.2} - \text{E.E.1}}{\text{E.E.1}} \times 100$$

Onde:

E.E.2 = Erosão Específica Média para o período de 1996-2006,

E.E.1 = Erosão Específica Média para o período de 1972-1982.

Tabela 5. – Erosão Específica Média para os Períodos 1972-1982/1996-2006

Bacia	Código	Estação	Área	Erosão espec. Méd. 1972 - 1982	Erosão espec. Méd. 1996 - 2006	Diferença Porcentual
	Nº	Nome	Km ²	ton/km ² .ano	ton/km ² .ano	%
Rio Uruguai	71300000	Rio Bonito	111	323,11	386,32	+19,56
Rio Uruguai	73960000	Barra do Chapecó aux.	8267	36,43	51,15	+40,4
Atlântico	82350000	Jaraguá do Sul	796	22,89	24,55	+7,25
Rio Uruguai	73350000	Barca Irani	1498	17,95	19,25	+7,24
Rio Uruguai	71498000	Passo Marombas	3654	15,97	17,95	+12,4
Rio Uruguai	71550000	Passo Caru	9868	14,67	18,88	+28,7
Rio Uruguai	73300000	Bonito	825	10,65	10,38	-2,53

A observação desta tabela mostra-nos que no caso da estação Passo Caru, apesar de sua baixa erosão específica média (14,67 ton/km².ano para década de 72-82 e 18,88 ton/km².ano para a década de 96-06), é uma estação que apresenta um aumento significativo da taxa de erosão ao longo do período considerado, calculados em 28,7%.

A Tabela também mostram que a estação Rio Bonito representa um caso crítico em matéria de erosão. Tendo o maior valor de erosão específica média dentre as estações analisadas (323,11 ton/km².ano para década de 72-82 e 386,32 ton/km².ano para década 96-06), também apresentou uma alta taxa de aumento, 19,56%.

Vale a pena ressaltar que esta análise comparativa da erosão específica média, entre dois períodos de tempo, permite-nos perceber que a maioria das estações estão aumentando sua taxa de erosão ao longo dos anos, o que significa um processo crescente de erosão.

Provavelmente, as ações humanas estão interferindo neste processo. A única estação que apresentou uma diminuição da erosão específica média entre os dois períodos considerados foi Bonito, com uma diferença de -2,53%. Esta diferença negativa da taxa de erosão específica média para os dois períodos considerados podem ter causas diversas, no entanto não foi objetivo deste trabalho buscar estas respostas.

6.6.2. Erosão Específica Média para as Estações do item 6.3.1

Para a determinação da erosão específica média inicialmente efetua-se o somatório das descargas sólidas em suspensão diárias, e posterior somatório das descargas sólidas em suspensão mensais. O valor total do deflúvio sólido em suspensão obtido, dividido pela área da bacia de contribuição (km²) e pelo número de anos do intervalo considerado, resultou nos valores de erosão específica médias de cada estação. Neste item, optou-se em realizar o cálculo da erosão específica média para todas as estações fluviométricas que tiveram sua curva-chave determinadas e com R² maior que 0,6 (estações fluviométricas listadas na Tabela 3). Não foi considerado, neste caso, um período de tempo comum à todas as estações, visto que a erosão calculada é específica (dividida pelo número de anos).

Considerando a classificação de CARVALHO (2000), como parâmetro para análise dos valores do fluxo de descarga sólida em suspensão específica (Q_{ss} específico), segue abaixo a tabela 5.0. As estações listadas foram listadas por ordem decrescente de valores de erosão específica média.

Classificação	Qss esp. (t/km ² .ano)
baixa	< 70
moderada	70 a 175
alta	175 a 300
muita alta	> 300

Fonte: adaptado de Werneck Lima et al, 2001.

Tabela 5. – Erosão Específica Média

Código	Estação	Área	Período	Erosão Específica Média	Classificação
nº	nome	Km ²	Nº de Anos	(ton/km ² .ano)	Carvalho, 2000
71300000	Rio Bonito	111	62	323,73	muito alta
83900000	Brusque	1240	71	86,86	moderada
83690000	Indaial	11151	75	84,60	moderada
83500002	Apiúna	9242	63	62,36	baixa
73960000	Barra do Chapecó aux.	8267	33	54,70	baixa
84580000	Rio do Pouso	2740	64	49,06	baixa
83300200	Rio do Sul novo (ajustada)	5100	25	46,09	baixa
82350000	Jaraguá do Sul	796	64	21,71	baixa
73350000	Barca Irani (ajustada)	1498	36	20,81	baixa
71383000	Ponte Alta do Sul (ajustada)	4631	49	19,81	baixa
71550000	Passo Caru	9868	55	18,86	baixa
73770000	Porto Fae Novo	5880	23	16,14	baixa
71498000	Passo Marombas	3654	66	15,23	baixa
72980000	Rio Uruguai	5114	59	14,79	baixa
65180000	Salto Canoinhas (ajusatada)	793	30	14,36	baixa
73300000	Bonito	825	53	11,00	baixa

Devido as falhas encontradas no banco de dados somando-se com o fato de que o próprio processo natural de transporte de sedimentos é bastante difícil de ser medido e controlado, visto as inúmeras variáveis envolvidas; é preciso esclarecer que os valores de erosão específica média apresentados na tabela acima não revelam com exatidão a realidade. São resultados aproximados. No entanto, esta análise preliminar permite uma identificação das bacias que apresentam erosão muito elevada. Este é o caso da estação Rio

Bonito que, segundo a classificação conceitual de CARVALHO (2000), está muito alta no período observado.

Através dos gráficos de deflúvio sólido em suspensão acumulado e da comparação entre os valores de erosão específica média referentes a dois diferentes períodos de anos, pode-se definir algumas bacias como pontos críticos de erosão crescente. São os casos das bacias: Rio Bonito e Barra do Chapecó aux.

Uma das maiores dificuldades encontradas na realização deste trabalho foi encontrar um período de tempo comum entre as estações fluviométricas para análise do deflúvio sólido em suspensão acumulado, de forma que incluísse o maior número de estações possíveis. Algumas estações tem um histórico de medições de vazão e sedimentos bastante completa, iniciando suas medições nos anos 1930 ou 1940. No entanto, outras estações começaram suas medições mais tardiamente, nos anos 1960 e 1970. A década de 1990 apresentou-se como o pior período para análise, pois ali se concentra a maior parte das falhas.

Neste trabalho optou-se por utilizar o banco de dados hidrossedimentológico da Agência Nacional de Águas. Este banco de dados apresenta irregularidades nas medições, seja pelas lacunas de dados (dados faltantes) ou pelos erros de medição (valor duvidoso). No entanto, deve-se reconhecer o enorme esforço, tanto da ANA quanto de outros órgãos responsáveis, pela sua construção e manutenção. Deve-se reconhecer também a importância deste conjunto de dados para a produção científica brasileira: realizar as medições de vazão e sedimentos custam tempo, dinheiro e trabalho. Portanto, o banco de dados hidrossedimentológicos disponibilizado pela ANA na *Internet* facilita o trabalho de estudantes e pesquisadores, fato que contribui para o avanço do conhecimento na área.

6.6.3 Recomendações

A estação Rio Bonito merece um olhar mais detalhado sobre as causas de uma taxa de erosão tão alta. Nesta busca, provalmente, encontraríamos uma intervenção humana excessiva e insustentável. Encontrar os fatores que determinam tal erosão não não é objetivo deste trabalho, porém, cabe como uma recomendação para estudos posteriores.

A estação Barra do Chapecó aux. foi a estação que apresentou o maior aumento na taxa de erosão específica média ao longos dos dois períodos de tempo analisados, calculados em 40,4%. Este caso merece um olhar mais crítico e profundo a respeito das causas e fatores que interferem neste aumento, sendo portanto uma sugestão para próximos trabalhos.

7.0 CONCLUSÕES

O fenômeno da erosão e o conseqüente transporte de sedimentos configuram-se como um processo de extrema complexidade física. Na natureza, diversas variáveis interferem no processo, porém a quantificação de cada uma delas tornaria este trabalho extenso demais. Neste caso, utilizou-se fórmulas e hipóteses simplificadoras que viabilizassem sua conclusão. Este trabalho de caráter preliminar possibilitou que a estudante se deparasse com as dificuldades encontradas no campo das pesquisas científicas, que são: dificuldade em criar um modelo matemático que reproduza fielmente o fenômeno natural e dificuldade em trabalhar com um enorme conjunto de dados.

Considerando-se as simplificações do método e as falhas e erros de medição do banco de dados, os resultados obtidos revelam uma análise preliminar, apenas aproximada dos valores reais. Não por conta disto o trabalho perde importância, pois a partir de um olhar mais geral sobre a questão da erosão e transporte de sedimento no Estado de Santa Catarina, pode-se definir focos principais e pontos críticos para aprofundamento da análise. Como é o caso da Estação Rio Bonito, que apresentou uma taxa de erosão específica média muito alta, sinalizando uma prioridade em estudos posteriores.

Dada a importância de um banco de dados hidrossedimentológicos confiável e completo, é necessário unir esforços tanto do governo como das instituições acadêmicas brasileiras no sentido de melhoramento e aperfeiçoamento das técnicas laboratoriais que manipulam os dados medidos. É necessário maior investimento nas estações fluviométricas já instaladas, capacitando e incentivando o compromisso das pessoas envolvidas nas medições. O resultado de uma pesquisa científica depende não só do aluno que a realiza,

mas também da dedicação de grupos e pessoas que atuam desde o início do processo, ou seja, no rio onde são feitas as medições, nos laboratórios onde se processam as informações, nos órgãos que as divulgam, etc.

A análise preliminar resultante deste Trabalho de Conclusão de Curso, juntamente com outro conjuntos de dados, pode servir para estudos sobre:

- cálculo da altura da perda de solo;
- assoreamento e cálculo da perda de capacidade hidráulica de reservatórios;
- investigação do uso e ocupação do solo para avaliação das ações humanas que estão interferindo na taxa de erosão das bacias em questão;
- análise da distribuição temporal de chuvas mensais como auxílio na interpretação dos gráficos de deflúvio sólido e na obtenção de melhoramentos das curvas-chave.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. (2009). *Hidroweb*. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso diversos de Março a Junho de 2009.

ANEEL (2000). Guia das Práticas Sedimentométricas, ANEEL, PNUD, OMM, Brasília.

CARVALHO, Newton de Oliveira, *Hidrossedimentologia Prática*, Eletrobrás, CPRM, Rio de Janeiro, 1994.

ELETROBRÁS, *Diagnóstico das Condições Sedimentológicas dos Principais Rios Brasileiros*, Rio de Janeiro, 1991.

RIG HETTO, A. M. *Hidrologia e recursos hídricos*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - EESC - Universidade de São Paulo - USP, 1998.

LUIZ, B. V., *Erosão e Transporte de Sedimentos em rios de Santa Catarina*. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC, Florianópolis, 2006.

MEDEIROS, P. A., CORDERO, A., *Transporte de Sedimentos em Suspensão em 3 Postos Sedimentométricos da Bacia do Rio Itajaí-Açú*, VIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 2008.

MME. Inventário das Estações Fluviométricas, DNAEE, CGRH, Brasília, 1996.

SILVA, A. M., *Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas*, 2003.

SOUZA, C. F.; DORNELLES, A. M.; ACIOLI, L. A.; MERTEN, G.; *Comparação dentre Estimativas de Produção de Sedimentos na Bacia do Rio Potibiru*, VII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 2007.

APÉNDICE I

A3