

A1.1.3 - Análise de processos associados à dinâmica fluvial¹

a) Processos sedimentológicos

A bacia do rio Itajaí apresenta características próprias que favorecem o transporte de partículas sólidas para os cursos de água. Quando este processo ocorre naturalmente, se estabelece um estado de equilíbrio natural, porém, se esta condição de alguma forma for perturbada, ocorrem problemas mais ou menos graves, principalmente em áreas urbanas. Considera-se erosão do solo um processo acelerado de desagregação, transporte e deposição das partículas de solo pela ação da chuva, vento ou gelo, fortemente influenciado pela ação do homem. A erosão causa sérios danos à agricultura e ao manejo dos recursos hídricos. Os sedimentos carreados no processo erosivo provocam alterações nas condições da fauna e flora dos rios, além de causar uma perda da fertilidade dos solos agrícolas. Os rios da bacia do Itajaí vêm sofrendo diversas intervenções, como dragagens no talvegue e nos leitos dos rios para fins de extração de areia. A dragagem, sem controle, deixa aberta uma lacuna no que se refere à relação entre a produção e a extração de sedimentos do rio.

Pinheiro et al. (2002) estabeleceram as curvas-chave de sedimentos para as diversas estações fluviométricas instaladas na bacia do Itajaí, bem como quantificaram a produção de sedimentos. Os dados fluviométricos e sedimentológicos utilizados foram fornecidos pela Agência Nacional Energia Elétrica (ANEEL) e obtidos através de coletas realizadas em um trecho do rio Itajaí-açu, em Blumenau. As equações das curvas-chave são apresentadas na Tabela A1.21. A precisão de uma curva chave é dada pelo valor do seu coeficiente de determinação (R^2). Os autores constataram que na estação de Blumenau, na qual foi realizada a amostragem sistemática, o ajuste da curva-chave apresentou um coeficiente de determinação aceitável.

Tabela A1.21 - Curvas-chave ajustadas e coeficiente de determinação para cada estação fluviométrica (C é a concentração, em mg/L e Q é a vazão, em m³/s)

Estação	Sub-bacia	Equação	R^2	n
Brusque	Itajaí Mirim	$C = 2,9314Q - 1,3463$	0,462	66
Indaial	Itajaí-açu	$C = 0,2576Q + 12,777$	0,378	91
Blumenau	Itajaí-açu	$C = 0,2452Q + 173,59$	0,656	24
Timbó	Benedito	$C = 0,3818Q^{1,041}$	0,999	4

Fonte: Pinheiro et al (2002)

¹ Texto elaborado por Neudi Bordignon e atualizado por Sheila Goddhosi

As séries históricas de concentração de sólidos em suspensão apresentam grande dispersão. Isto é evidenciado nos coeficientes de determinação obtidos. Para o caso específico de Timbó, existe um número reduzido de valores, ou seja, três dados da série histórica da ANEEL e um realizado na enchente de outubro de 2001. Estes pontos alinharam-se segundo uma reta, produzindo um coeficiente de determinação próximo de 1. As curvas-chave de sedimentos de Indaial e Brusque resultam em coeficientes de determinação baixos. Entretanto, verifica-se que a distribuição dos pontos amostrais pode ser utilizada com nível de significância superior a 1%.

Utilizando-se as séries históricas das vazões médias diárias e as equações das curvas-chave de sedimentos, foram determinadas as produções médias anuais de sedimentos nas sub-bacias contribuintes das estações fluviométricas de Indaial, Blumenau, Timbó e Brusque. Os valores de produção específica de sedimentos, para os períodos 1980-1989 e 1990-1999, são apresentadas na Tabela A1.22. A produção específica média de sedimentos nas sub-bacias variou entre 0,15 e 3,32 ton/ha/ano.

Tabela A1.22 - Produção específica de sedimentos

Estação	Área (km ²)	Produção média de sedimentos (ton/ha/ano)	
		1980-1989	1990-1999
Brusque	1240	1,21	1,38
Indaial	11.151	1,45	1,27
Blumenau	11.803	2,94	3,32
Timbó	1342	0,44	0,15

Fonte: Pinheiro et al (2002)

As sub-bacias consideradas apresentam diferentes aspectos naturais e sócio-econômicos, sendo possível observar que em regiões onde houve crescimento populacional elevado na área urbana, como no município de Blumenau, registram-se incrementos significativos na quantidade de sedimentos produzidos. Este padrão é influenciado pela impermeabilização do solo por edificações, retirada da vegetação para a construção civil e as inúmeras formas inadequadas de ocupação e manejo dos solos.

Sobre os processos sedimentológicos no estuário do Rio Itajaí-açu, foi verificado que as características dos sedimentos varia em função do tempo, respondendo ao regime de descarga fluvial do rio Itajaí-açu. Durante os períodos de descargas mais baixas os sedimentos de fundo do estuário são dominados por siltes e argilas, ao passo que durante períodos de descargas mais elevadas (e.g. 700 m³/s) aumenta o teor de areia nos sedimentos de fundo decorrente do transporte fluvial. Embora variável espacial e temporalmente, os

sedimentos na bacia estuarina são dominados pela fração argila até sete quilômetros à montante da barra.

A principal fonte de sedimentos para o estuário do rio Itajaí-açu é a drenagem através da descarga sólida por suspensão de sedimentos finos e a tração e saltação de sedimentos arenosos. Apesar da intensa atividade de extração de areia ao longo do estuário, ainda não há estudos para quantificar o aporte de sedimentos arenosos, bem como seu transporte através do estuário para a zona costeira. É possível que a contínua atividade de extração de areia durante as últimas décadas esteja afetando o balanço sedimentar ao longo da costa, sendo que atualmente observa-se regiões onde está havendo problemas com erosão.

A descarga sólida por suspensão no rio Itajaí-açu vêm sendo monitorada diariamente na estação limnimétrica de Indaial, desde novembro de 1998. A concentração de sedimentos em suspensão observada varia em função das condições de descarga fluvial, podendo ser tão baixas quanto 7 mg/L, durante períodos de baixa descarga, ou superiores à 500 mg/L, durante períodos de extremos de descarga, acima de 1000 m³/s.

Eventos de alta descarga fluvial são responsáveis pela maior parte da descarga sólida por suspensão. Durante o período de novembro de 1998 até novembro de 1999, a descarga sólida por suspensão total foi de 760.000 toneladas de sedimentos finos. Durante este período de um ano ocorreram somente três eventos hidrológicos extremos, resultando em um total de 9 dias, ou 2,5% do tempo, com descarga superior à 1000 m³/s. A descarga sólida por suspensão destes dias totalizou 312.000 toneladas, representando 41% do total de sedimentos finos carregados pelo rio. Durante períodos prolongados de baixa descarga fluvial, e.g., mais de 60 dias, o estuário do Rio Itajaí-açu pode apresentar importação residual de sedimentos da plataforma interna através das correntes de fundo.

Estuários do tipo cunha salina, como é o caso deste, são preferencialmente exportadores de sedimentos para a plataforma continental adjacente. Em função da condição altamente estratificada e dominância dos processos advectivos de transporte, a mistura da água doce com a água marinha não é muito intensa, e a maior parte dos sedimentos que aportam pelo alto estuário passa pelo estuário sendo diretamente exportados para a plataforma adjacente. Isto pode ser observado pela distribuição de sedimentos em suspensão no estuário, onde as isolinhas de concentração tendem a acompanhar a distribuição de salinidade ao longo do estuário.

Os sedimentos em suspensão que aportam no estuário a partir da descarga fluvial são na sua maior parte argilosos, apresentando carga elétrica negativa e ocorrendo na forma de flocos e agregados de material inorgânico e matéria orgânica. Acredita-se que a advecção

fluvial seja a principal responsável pelo balanço de material no estuário. A ausência de uma zona de turbidez máxima no estuário é um fato que corrobora com a hipótese da dominância da advecção no transporte de sedimentos em suspensão.

Há registros de dragagens no Rio Itajaí-açu desde 1895. No entanto, estas se tornaram mais frequentes e significativas após os anos 60 com o incremento do comércio marítimo. Em 1978 foi realizada a primeira dragagem de aprofundamento do canal de acesso ao Porto de Itajaí, com a cota de -6,5 m, sendo esta posteriormente reduzida para -8,0 em 1983, e para -9,5 em 1996. Com o aumento da profundidade e alteração da área da seção transversal, o volume de material dragado para manutenção da profundidade desejada aumentou de 50.000 m³ nos anos 70, para 250.000 m³ nos anos 80 e para 840.000 m³ nos anos 90, representando um aumento exponencial do volume dragado em função da diminuição da cota operacional.

Desde 1998, a dragagem de manutenção da bacia de evolução e do canal de acesso ao Porto de Itajaí vem sendo realizada por uma draga que utiliza um sistema de injeção de água. Este sistema funciona pelo princípio de que quando se fluidiliza o sedimento fino que constitui o fundo, este diminui sua densidade pelo ganho de volume e adquire energia potencial pela elevação em relação ao seu estado inicial. A energia potencial, por sua vez, converte-se em energia cinética criando uma corrente de gravidade, levando o material para regiões mais baixas. Em termos práticos, esta técnica vem funcionando adequadamente, porém observa-se que quando é utilizada durante períodos de baixa descarga ocorre o transporte de parte do material da corrente de turbidez para montante, possivelmente devido ao intrusão deste material na corrente de fundo.

Segundo Schettini (2001), o estuário apresenta uma dualidade de processos dominantes, com situações denominadas de “Marinha”, com dominância das marés sobre a descarga fluvial, e “Fluvial”, com dominância da descarga fluvial sobre as marés. Estas situações caracterizam-se como mostra a Tabela A1.23.

Tabela A1.23 – Processos dominantes no estuário do rio Itajaí-açu

<i>Situação Marinha</i>	<i>Situação Fluvial</i>
baixa descarga fluvial (< 200 m ³ /s)	alta descarga fluvial (> 1.000 m ³ /s)
baixa descarga sólida em suspensão (< 10 ton/dia)	alta descarga sólida em suspensão (>10.000 ton/dia)
alta taxa de retenção de sedimentos	baixa taxa de retenção de sedimentos
erosão e deposição durante sizígia nos picos de corrente	erosão acentuada independente da fase da maré
transporte residual de sedimentos para montante	transporte unidirecional para jusante
importação de sedimentos da plataforma interna e diminuição do volume estuarino	exportação de sedimentos para plataforma interna e aumento do volume estuarino

Fonte: Schettini (2001)

b) Processos erosivos

Sabe-se que a erosão é um processo dinâmico (todos os dias o solo urbano e o rural estão sendo alterados) e sazonal (mais intenso na primavera/verão pela maior precipitação), principalmente no meio rural devido ao preparo do solo para as culturas de verão.

No meio rural a tendência é de estabilização, uma vez que a expansão das áreas de cultivo vem se tornando mais restrita, motivada pelas leis ambientais que não permitem a derrubada de florestas e os programas de incentivo à conservação de solo através de práticas mecânicas e culturais. No meio urbano, a crescente urbanização, representada pelo aumento no número de loteamentos e a terraplanagem de lotes em áreas marginais e ainda a pouca preocupação com a manutenção da vegetação, sugerem um incremento de focos atuais e potenciais de erosão, o que é confirmado pelos dados da Tabela A1.22.

Com relação à tipologia, a erosão no meio rural da bacia se dá pela retirada da vegetação nativa arbórea arbustiva e sua substituição por uma vegetação de pequeno porte, levando à maior exposição do solo, que passa a ser mais suscetível aos agentes erosivos, com sua consequente desestruturação e perda da capacidade de absorção de água. O resultado desse processo é o aumento na taxa de escoamento superficial que, por sua vez, intensifica a erosão. O escoamento superficial, basicamente laminar é caracterizado pela remoção de camadas delgadas da superfície do solo e pela formação de sulcos. As estradas rurais e urbanas sem pavimentação têm contribuído para agravar o problema. Em áreas urbanas, apesar do alto grau de impermeabilização do solo promovido pelas edificações e pavimentos, o problema da erosão também ocorre de forma intensa, devido, como já foi dito, à terraplanagem e aos aterros de áreas destinadas à construção civil. A erosão sob a forma de voçorocas é de baixa ocorrência na Bacia.

De acordo com Pinheiro *et al.* (2002), a erosão do solo é evidente em áreas urbanas devido às modificações das características naturais do ecossistema. O destino final dos sedimentos erodidos em uma vertente e transportados na superfície do solo é o curso d'água, sendo que este possui ainda a capacidade de erodir suas próprias margens.

Os estudos das relações entre as características das chuvas e as perdas de solo em Santa Catarina são recentes e não permitem a apresentação de dados conclusivos. Para o cálculo do índice de erosividade da chuva (potencial da chuva em causar erosão) e a determinação das linhas de isoerosividade, foi utilizado o coeficiente Elm^2 (FOURNIER 1960, apud PINHEIRO, 2002). Somando-se os valores médios mensais de Elm para um local, obtém-se o valor anual do índice de erosividade da chuva. Desta forma, o índice de erosividade isoladamente não permite inferir sobre a perda potencial de solo de cada região, pois este é apenas um dos parâmetros que determinam a erosão hídrica. A erodibilidade do solo, o comprimento e grau de declividade da superfície, a cobertura e manejo do solo e a utilização de práticas conservacionistas complementares em um determinado local, devem ser considerados quando se pretende estimar o risco potencial de erosão. No Vale do Itajaí o índice de erosividade é considerado médio.

c) Escorregamentos de encostas

O desastre ambiental que ocorreu em novembro de 2008 em Santa Catarina teve como agente principal o evento pluviométrico excepcional. Os movimentos rápidos de solo em encostas estão relacionados a épocas de fortes chuvas em áreas de relevo acidentado e solos profundos. Os escorregamentos de encostas podem ultrapassar 100 km/hora, devido a força gravitacional que age com a presença de água subterrânea no subsolo (KARMANN, 2009).

As encostas presentes na bacia são compostas, geralmente, por materiais inconsolidados que possuem uma estabilidade controlada pelo atrito entre as partículas. Os materiais inconsolidados como solos, acumulações sedimentares e aterros podem manter-se durante muitos anos em equilíbrio, e de um minuto para outro, movimentar-se declive abaixo com conseqüências catastróficas.

Os escorregamentos ocorrem no momento em que o atrito é vencido pela força gravitacional, a massa de solo entra em movimento, encosta abaixo. A diminuição de atrito entre as partículas é causada principalmente pela adição de água ao material. Embora a água aumente a coesão entre as partículas do solo quando presente em pequena quantidade, a

² $Elm = p^2/P$, onde Elm = índice de erosividade da chuva, p = precipitação média mensal (mm) e P = precipitação média anual (mm).

saturação do solo acaba envolvendo a maioria das partículas por um filme de água, diminuindo o atrito entre elas e permitindo seu movimento pela força gravitacional, no processo conhecido como “solifluxão”. Portanto, fortes chuvas podem representar um decréscimo nas forças de resistência, devido a perda de coesão do solo.

A saturação em água aumenta o peso da cobertura, o que contribui à instabilização da encosta. Os escorregamentos são processos naturais que contribuem para a evolução da paisagem, modificando vertentes. Esses movimentos podem ser induzidos ou acelerados pela retirada da cobertura florestal, acarretando o aumento da infiltração da água das chuvas, lubrificação das partículas e seu movimento vertente abaixo. Portanto, obras ou atividades agrícolas no alto e meio de encostas podem representar, também, peso adicional exercido pelo maquinário ou a perda da resistência por trepidação.

Os escorregamentos que ocorreram em novembro de 2008 têm como possíveis fatores as fortes chuvas, solos profundos, morfologia do terreno e as ações humanas, como apontam Frank e Sevegnani (2009). Provavelmente a combinação destes fatores é que desencadeou os inúmeros escorregamentos.