Pesquisas em Geociências

http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias

Evolução Hidrodinâmica e Processos Erosivos Marginais nos Canais do Sistema de Inundação do Alto Rio Paraná, Região Centro-Sul do Brasil

Paulo Cesar Rocha, Edvard Elias de Souza Filho, Éder Comunello, Geraldo Terceiro Correa

Pesquisas em Geociências, 28 (2): 161-170, maio/ago., 2002.

Versão online disponível em:
http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/20283

Publicado por

Instituto de Geociências

Portal de Periódicos

UFRGS

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

Informações Adicionais

Email: pesquisas@ufrgs.br
Políticas: http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/editorialPolicies#openAccessPolicy
Submissão: http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#onlineSubmissions
Diretrizes: http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#authorGuidelines

Data de publicação - maio/ago., 2002.
Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

Pesquisas em Geociências, 28(2): 161-170, 2001
ISSN 1518-2398

Instituto de Geociências, UFRGS
Porto Alegre, RS - Brasil

Evolução Hidrodinâmica e Processos Erosivos Marginais nos Canais do Sistema de Inundação do Alto Rio Paraná, Região Centro-Sul do Brasil*

PAULO CESAR ROCHA[1], EDVARD ELIAS DE SOUZA FILHO[2], ÉDER COMUNELLO[3] & GERALDO TERCEIRO CORREA[4]

[1] Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – CEUL*; PEA-UEM(GEMA)* – Av. Ranulpho Marques Leal, 3484. Vila Industrial. Três Lagoas-MS – Cep 79.603-011, Cx. P. 210 (prgrocha@terra.com.br)

[2] Universidade Estadual de Maringá – GEMA/DGE – Av. Colombo, 5790 Campus Universitário – CEP 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil (eesfilho@uem.br)

[3] Universidade Estadual de Maringá – PEA-UEM/GEMA-UEM – Av. Colombo, 5790 Campus Universitário, CEP 87020-900, Maringá, Paraná (ecomunel@yahoo.com.br)

[4] Universidade Estadual de Maringá – PEA-UEM/GEMA-UEM – Av. Colombo, 5790 Campus Universitário, CEP 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil

(Recebido em 10/01. Aceito para publicação em 05/02)

Abstract - This paper intend to contribute on understanding of small part of tropical/subtropical large river fluvial geomorphology: the high Paraná river flood system. The studied area is inserted in Baía River Compartment, characterized of large alluvial plain, in the right margin of high Paraná River, and the greater archipelagoes subdividing the channel in branches with different importance. The intensity of erosive process on the Paraná River banks were studied in four different kinds of channel by 29 points, during a hydrodynamic cycle. The obtained data was still treated with cluster analysis and the correlation through the linear and exponential regression among variables. Results evidenced that the flow velocity and mechanical composition of banks were the main variables of bank erosion rates, and that the another variables, like roots and vegetation., do not had any influence to control the bank erosion. Erosion, accretion and by pass are processes controlled by the Paraná river regime, by shifting of the talweg position and then also controlled by intensity, duration and recurrence of flood.

Keywords - Bank Erosion, Fluvial Geomorphology, Paraná River.

INTRODUÇÃO

A morfologia de um sistema fluvial, dentro da bacia hidrográfica, reflete uma história denudacional e a paisagem do Rio, caracterizado por sua hidrologia, morfologia, carga em transporte e comunidades bióticas, mostra o resultado de todos os processos operativos dentro deste ecossistema (Petts & Foster, 1990). Assim, os sistemas fluviais funcionam como uma conexão entre áreas de produção de sedimentos na bacia de drenagem e áreas deposicionais costeiras, além de importantes ambientes deposicionais de bacias de drenagem "interiores" (Leeder, 1982).

Os processos atuantes em canais aluviais se resumem à erosão, transporte e deposição. Cada um destes processos estão associados a específicas condições geomorfológicas (e hidrodinâmicas), e o conhecimento dos princípios físicos envolvidos em cada caso é importante frente às decisões com relação ao manejo ambiental, no planejamento ou na engenharia (Cooke & Doornkamp, 1990).

Os processos de erosão nas margens estão entre os elementos mais dinâmicos da paisagem e o entendimento dos mecanismos de atuação é fundamental para a explicação da evolução dos diversos elementos da geomorfologia fluvial, que por sua vez é determinante na evolução dos ecossistemas de canais fluviais e das planícies de inundação.

Tendo em vista que a geomorfologia e sedimentologia fluvial estão grandemente embasadas e dependentes de estudos de casos de pequenos cursos de água, em parte por causa das dificuldades logísticas no estudo de grandes Rios e grandes bacias de drenagem, tem-se uma lacuna a ser preenchida pelos estudiosos do ambiente fluvial (Gupta, 1999). Assim, este trabalho visa contemplar o estudo da geomorfologia de grandes Rios, numa tentativa de contribuir para o entendimento dos fatores controladores dos processos erosivos num trecho do sistema de inundação do Alto Rio Paraná, um grande Rio tropical.

Cabe salientar a importância do entendimento funcional dos sistemas fluviais, dos aspectos hidrodinâmicos e das variáveis que mantém o equilíbRio dinâmico, como as que se relacionam com a estabilidade

* Trabalho realizado com apoio do CNPq - Processo no. 522895/1995-6.

Em respeito ao meio ambiente, este número foi impresso em papel branqueado por processo parcialmente isento de cloro (ECF).

das margens, principalmente em ambientes tropicais. Desta forma, este trabalho tem por objetivo central determinar quais são os principais fatores que controlam a intensidade dos processos erosivos nas margens de canais do Rio Paraná e de canais secundários que drenam a sua planície de inundação. Secundariamente, identificar a trajetória erosivo-deposicional do Rio Paraná na área estudada ao longo do século XX, na expectativa de contribuir com os demais estudos ambientais que ali estão sendo realizados.

ÁREA DE ESTUDOS

A área de estudos está situada em um trecho do Alto Rio Paraná, em sua planície aluvial, na região Sudeste do Mato Grosso do Sul, divisa com o Paraná, nas proximidades de Porto Rico-PR (Fig. 1), envolvendo o Rio Paraná, o canal Cortado, o Rio Baía, o canal Corutuba e o Rio Ivinheima. O clima é Tropical Sub-quente, com um a dois meses secos, temperatura média anual de 20^{0}C, e precipitações maiores que 1.500 mm/ano (IBGE, 1990).

Este trecho estudado está inserido no "Compartimento Rio Baía" (Souza Filho & Stevaux, 1997) e é caracterizado por larga faixa de planície fluvial, colocada na margem direita do Rio Paraná, e por grandes arquipélagos que subdividem o canal em váRios ramos de diferentes ordens de importância. Na planície fluvial, desenvolve-se um sistema de canais anastomosados, compreendendo o ***Rio Baía/canal Corutuba*** e o baixo curso do ***Rio Ivinheima***. O canal principal – ***Rio Paraná*** – é caracterizado por um sistema multicanal (entrelaçado), apresentando dois canais principais e vários canais secundários que separam ilhas, como por exemplo o ***canal Cortado***.

A maior parte da área da planície aluvial do Rio Paraná corresponde à planície de inundação (aproximadamente 70%, de acordo com Stevaux, 1994). Esta planície de inundação é uma forma reliquiar de um sistema anastomosado pretérito (Souza Filho, 1993), onde se desenvolvem os sub-ambientes de diques marginais, lagoas e pântanos (*back swamps*), canais e lobos de rompimento de dique marginal, além de canais secundários anastomosados, que mantém maior ou menor contato com o canal principal (padrão entrelaçado) conforme a natureza da sua morfologia e magnitude das cheias. A figura 2 mostra o comportamento hidrométrico dos canais do sistema durante um ciclo hidrodinâmico medido entre 1993/95.

Diversos trabalhos no campo da geomorfologia e sedimentologia fluvial foram desenvolvidos na área de estudos, sendo que os de Souza Filho & Stevaux (1997) e Stevaux *et al.* (1997) resumem os estudos relacionados à geomorfologia, estratigrafia e sedimentologia dos depósitos relativos à calha fluvial do Rio Paraná nesta região. As interações entre os fatores limnológicos e produção primária nos sub-ambientes de canal e planície de inundação com o regime hidrológico e pulsos de inundação também são discutidas em váRios trabalhos, e sua síntese pode ser encontrada no artigo de Thomaz *et al.* (1997).

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Apesar da maioria dos estudos relacionados à estabilidade de margens fluviais feitos até o momento se referirem às regiões de clima temperado e rios de pequenas bacias de drenagem, os aspectos da erosão de margens no Rio Paraná foram inicialmente abordados por Fernandez (1990), Fernandez & Fúlfaro (1993), Fernandez & Souza Filho (1995) e Rocha & Souza Filho (1996), Rocha (1998). Recentemente os trabalhos de Souza Filho & Corrêa e Rocha *et al.* (1999) retomaram as discussões a respeito do estágio erosivo atual do Rio e das interações entre a intensidade dos processos e as variáveis determinantes, respectivamente.

Este trabalho mostra como se comportam os diferentes canais do sistema de inundação do Alto Rio Paraná no que diz respeito às taxas de erosão, as velocidades de fluxo que atuam sobre as margens, e a composição mecânica destas, dentro de uma perspectiva espacial e temporal, com base nos dados de campo de Fernandez (1990) e Rocha (1995). Foram avaliados 4 diferentes segmentos e os pontos estudados foram distribuídos no Rio Paraná (13 pontos), no canal Cortado (6 pontos), no Rio Baía/canal Corutuba (6 pontos), no Rio Ivinheima (4 pontos), conforme a figura 1.

Para a avaliação da taxa de erosão e a identificação dos processos erosivos a partir de medidas diretas no campo, foi utilizado o *método dos pinos*, o *método das estacas* e o de *perfilagens sucessivas*, baseados nos estudos de Wolman (1959), Twidale (1964), Hughes (1977), Hooke (1979, 1980), e conforme descrito por Fernandez (1990) e Rocha & Souza Filho (1996). Outras variáveis estudadas incluíram a composição das margens, as variações de nível das águas, as velocidades de fluxo, e a cobertura vegetal. Posteriormente os dados foram tratados através da análise de agrupamento e correlacionados através de regressão linear simples e múltipla. Os ciclos erosivos e depo-

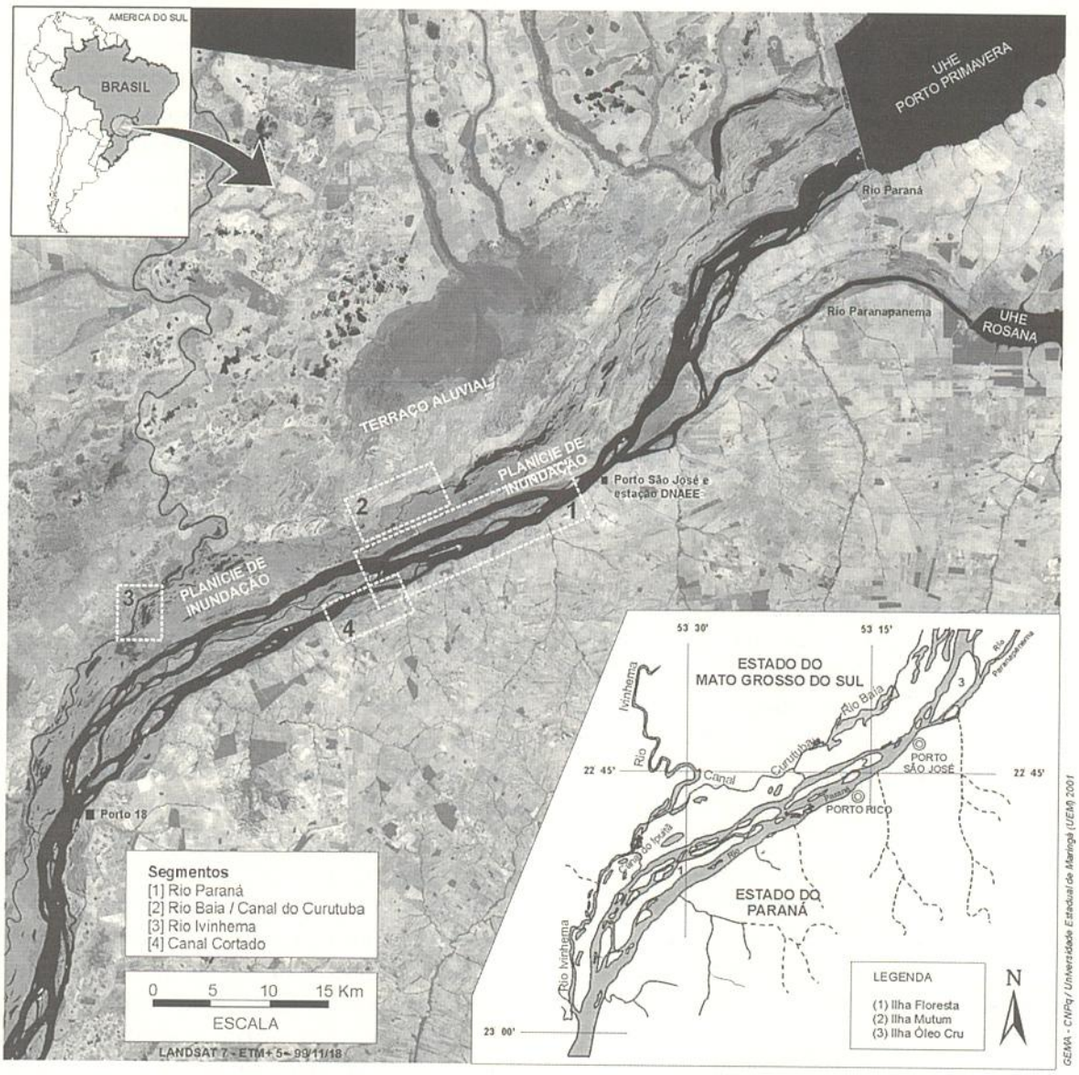

Figura 1 - Localização da área de estudos e dos segmentos estudados no Alto Rio Paraná. Ao fundo: imagem de satélite TM-7 Landsat (banda 5) em período de vazante (18 de novembro de 1999). ***Adquirida na Intersat imagens de satélite S.A., com recursos do CNPq, processo nº 522895/1995-6.***

sicionais numa escala de tempo maior foram obtidos pela delimitação das áreas do canal e das ilhas, medidos a partir do tratamento de fotografias aéreas dos anos de 1953 (1:25000), 1965 (1:60000), 1970 (1:25000), 1980 (1:25000) e 1996 (1:50000).

Os dados hidrodinâmicos foram obtidos a partir da leitura das réguas linimétricas instaladas no sistema e dos dados das estações fluviométricas próximas (P.S. José, no Rio Paraná, e Ivinheima no Rio Ivinheima – DNAEE/ANEEL-BRASIL). Para a avaliação da série histórica do Rio Paraná foram utilizados os valores médios anuais da estação de Porto São José-PR (DNAEE/ANEEL-BRASIL) e posteriormente confrontados com os valores de erosão e/ou deposição na calha principal do Rio Paraná neste trecho.

HIDRODINÂMICA, SEDIMENTOLOGIA E GEOMORFOLOGIA ATUAL

Em Porto São José o Rio Paraná apresenta o evento de cheia entre os meses de dezembro e março, com a vazante entre os meses de abril e novembro. Sua descarga média histórica possui valores próximos a 9.500 m^3/s, e as médias anuais vêm apresentando valores mais elevados desde o início da década de 70. Na parte esquerda do canal principal, as velocidades de fluxo atingem cerca de 1,4 m/s, e a profundidade média do talvegue chega a 13 m, enquanto que na parte direita a velocidade média diminui para 0,9 m/s e profundidade média atinge 5 m. Nos canais secundários ambos os valores são mais baixos. No sistema

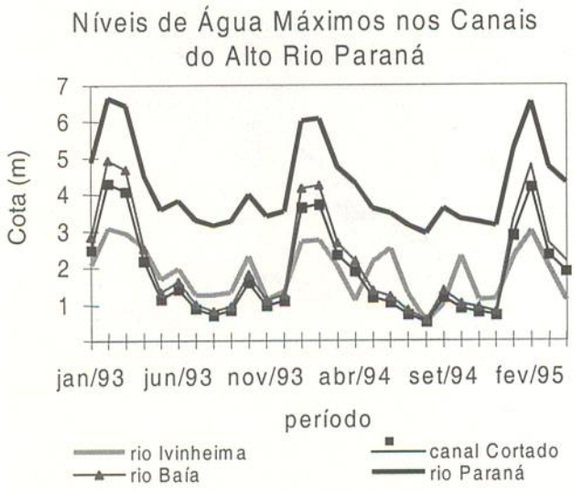

Figura 2 - Hidrometria nos canais do sistema de inundação do Alto Rio Paraná.

anastomosado situado na planície fluvial (Rio Baía, canal Corutuba e baixo Rio Ivinheima), a profundidade dos canais varia de 2 a 6 metros e a velocidade de fluxo pode atingir até 0,9 m/s. Entretanto esta variável depende da relação entre o nível da água do Rio Paraná e o nível da água nesses canais, e dependendo da circunstância a velocidade de fluxo pode ser igual a zero, ou mesmo pode haver inversão no sentido da corrente.

O canal principal é dominado por dunas sub-aquosas e por ondas de areia, de granulação fina a média, que transitam sobre mega-ondulações com granulação mais grosseira (mega-ondas de areia e mega-dunas sub-aquosas) (Souza Filho & Stevaux, 1997). As primeiras formas possuem grande mobilidade, tendo sido verificado deslocamento na ordem de 67 m/mes (Stevaux *et al.*, 1995), enquanto que as formas gigantes mobilizam-se apenas nas grandes cheias, quando então o talvegue é rapidamente reposicionado. O conjunto de formas de leito pode aflorar à superfície formando barras fluviais com centenas ou milhares de metros de extensão, e uma complexa história erosivo-deposicional.

Nos canais secundários do sistema (canal Cortado por exemplo) as formas de leito apresentam menor porte, uma vez que estão limitadas pelas dimensões do segmento fluvial, e possuem dominância de areias finas e médias. O suprimento de carga de fundo nestes locais não é contínuo porque o aporte destes sedimentos ocorre apenas durante as cheias, uma vez que seu fundo está situado acima do leito do canal principal. Nestes locais o trânsito das formas de leito é feito por ondas de areia e dunas de porte métrico e granulação de areia fina e média, de forma que os termos mais grosseiros são concentrados em depósitos residuais, conforme discutido por Rocha *et al.* (1999).

Nos canais secundários do sistema anastomosado (Rio Baía e Canal Corutuba) não ocorre transporte significativo de carga de fundo devido a baixa energia das correntes, e desta forma o escoamento é feito sobre substrato seixoso cimentado por hidróxido de ferro relacionado aos antigos depósitos da calha do Rio. Estes canais apresentam sinuosidade variável (1.2 a 2.1), baixa declividade e pequena erosão marginal, restrita acresção lateral, pouca deposição nos diques marginais.

Pelo exposto, o canal principal corresponde ao ambiente de maior energia. Entretanto, mesmo nele há diferenças quanto às velocidades de fluxo. Fernandez *et al.* (2000) considera que o canal do Rio Paraná pode ser dividido em três setores, a saber: 1 – setor de alta energia – corresponde às faixas de talvegue; 2 – setor de energia moderada – corresponde a áreas mais rasas localizadas entre os talvegues principais, onde evoluem barras centrais de canal; 3 – setor de baixa energia – corresponde a áreas de evolução de barras laterais que se desenvolvem próximas às margens do Rio, onde as condicionantes geomorfológicas geram zonas com elevada taxa deposicional. O trabalho de Souza Filho & Corrêa (1999) apresenta uma outra abordagem, que considera que os estados de energia no sistema são transitórios, uma vez que a velocidade de fluxo depende do talvegue, e este é controlado pelo leito móvel.

De qualquer forma os sítios erosivos e deposicionais no canal principal são controlados pela posição do talvegue. Porém, à medida em que as formas de leito migram o talvegue se desloca, e as maiores mudanças ocorrem nas grandes cheias, quando as maiores formas de leito são reposicionadas.

EROSÃO NAS MARGENS, RESISTÊNCIA MECÂNICA E CONDICIONANTES HIDRODINÂMICAS

Os valores obtidos pelo monitoramento da erosão das margens foram muito baixos nos canais do sistema anastomosado (Rio Baía/canal Corutuba e baixo curso do Rio Ivinheima) e também no canal Cortado (canal secundário do sistema entrelaçado do Rio Paraná), e altos nas margens dos canais principais do Rio Paraná, conforme esperado para os sistemas anastomosados e entrelaçados respectivamente.

O trabalho de Fernandez (1990) considerou que os principais fatores condicionantes da erosão em margens fluviais estão associados à estrutura da margem e às condicionantes hidrodinâmicas nas proximidades destas. Dentre estes últimos, a variação do nível do Rio é considerada como um dos fatores mais importantes para o controle da erosão marginal, pois é responsável pela atuação das forças de origem fluvial sobre os materiais das margens, ou seja as ondas e as correntes. As correntes atuam diretamente nas margens promovendo a corrasão; as ondas criadas pela ação do fluxo e dos ventos geram uma ação mais abrasiva nas margens, podendo provocar processos erosivos avançados. O alcance destrutivo de ambos os processos depende da flutuação do nível do Rio (Fernandez, 1990) e da energia disponibilizada por ambos os processos. Tal energia é proporcional à velocidade de fluxo e à amplitude das ondas, e depende também do posicionamento da margem frente a ação das principais linhas de fluxo ou da linha de crista das ondas.

A velocidade de fluxo aumenta conforme a subida de nível da água, e quanto maior a velocidade, maior a taxa de erosão. Isso ocorre em canais com fluxo livre, mas em canais afluentes pode haver exceção. Rocha & Souza Filho (1996) observaram que existem diferentes comportamentos nos canais secundários da margem direita (sistema anastomosado) no que se refere ao relacionamento entre a variação de nível da água e as velocidades correlatas, como mostra a figura 3. As exceções ocorrem porque quando o Rio Paraná está em regime de cheia os canais secundários ficam afogados e a velocidade de fluxo diminui.

No caso do canal principal há uma clara relação entre a variação de nível e a velocidade de fluxo (Fig. 3) e os valores acumulados da erosão demonstram que no período de cheia a atividade erosiva foi mais intensa (Fig. 4), uma vez que quase toda atividade erosiva foi desenvolvida neste período. O canal Cortado demonstra uma situação diferente, uma vez que a relação entre a subida da água e a variação da velocidade de fluxo não se dão na mesma proporção no período de cheia (Fig. 3), e a erosão marginal é um pouco mais intensa no período de vazante (Fig. 4), embora esta situação deva ser observada com reserva porque os valores de

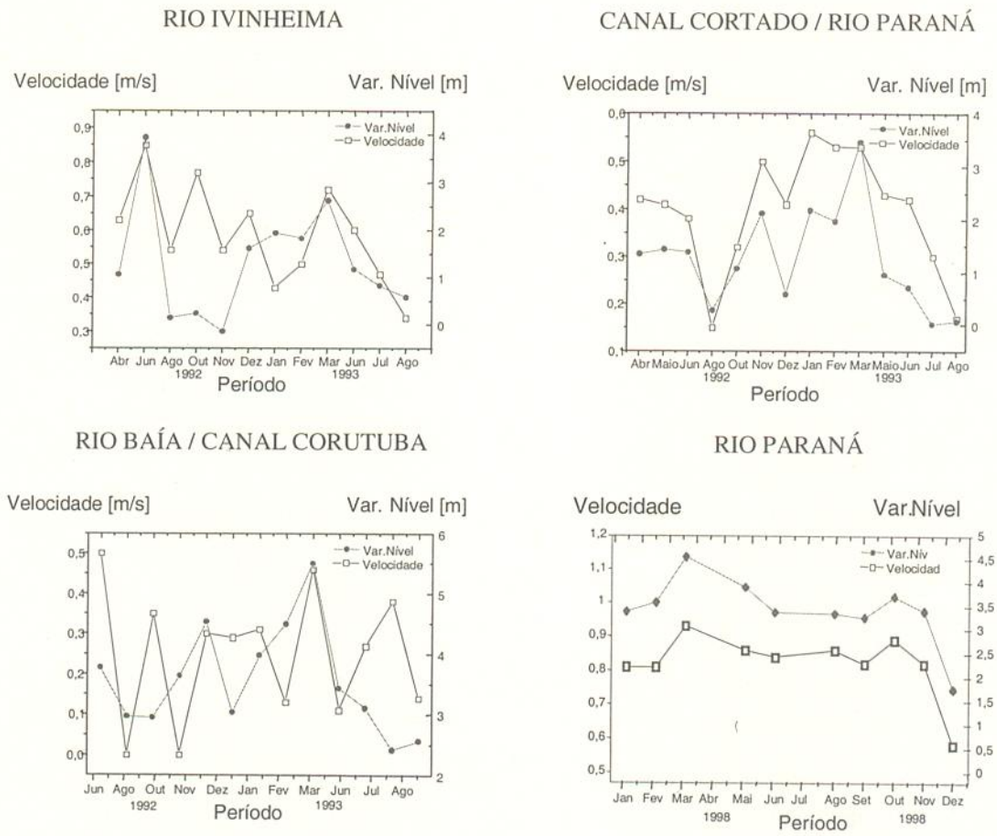

Figura 3 - Relacionamento entre as velocidades de fluxo e os níveis fluviométricos nos canais do sistema de inundação do Alto Rio Paraná.

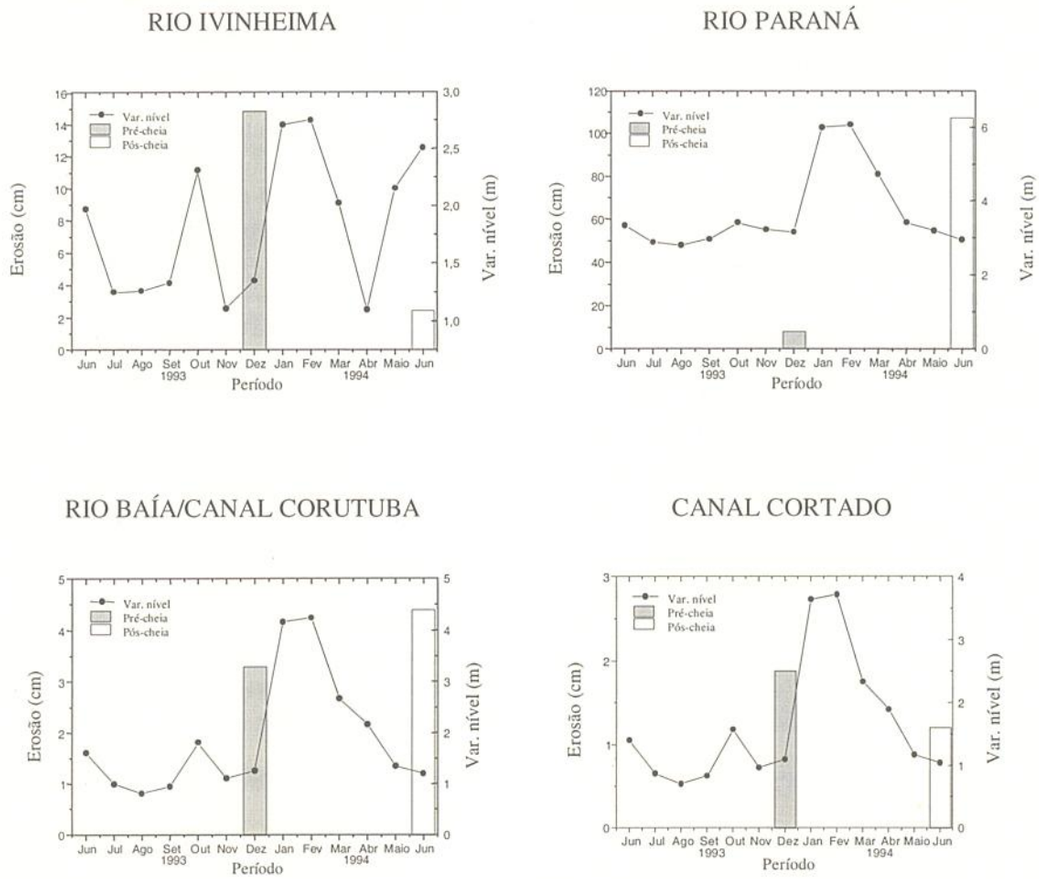

Figura 4 - Aspectos da variação temporal e intensidade dos processos erosivos em diferentes canais no Alto Rio Paraná.

erosão são muito baixos e encontram-se próximos do limite de observação, e também as velocidades variam em valores também muito baixos.

Nos segmentos onde os canais sofrem o efeito de afogamento os valores seguem outro padrão, como no caso do Rio Ivinheima e do Rio Baía. No Rio Ivinheima, a velocidade de fluxo nem sempre aumenta com a elevação do nível da água, e o período de maior erosão é o de junho a dezembro. No Rio Baia as relações entre o nível da água e a velocidade de fluxo são complexas e a erosão nos dois períodos é equivalente, pois a diferença encontra-se dentro do erro amostral.

A comparação entre os valores de recuo de margem nos períodos de cheia e vazante demonstra que a elevação de nível possui relação positiva apenas no canal principal, enquanto nos demais segmentos as taxas de erosão não dependem da subida do nível da água.

Uma vez descartada a influência da elevação de nível sobre a taxa de erosão marginal, procedeu-se à análise do conjunto de variáveis disponíveis. Tal trabalho foi iniciado por meio de análise de agrupamento, para que fosse possível estabelecer o grau de semelhança entre as margens amostradas. Os resultados obtidos por meio do agrupamento das variáveis: ***taxa de erosão, velocidade de fluxo, variação de nível, composição granulométrica da margem, processos erosivos, uso do solo***, obtidos nos 29 pontos de amostragem, demonstraram a existência de dois grupos distintos diferenciados pelos valores da *Composição Granulométrica,* conforme análise da distância das médias de cada agrupamento (Fig. 5).

O grupo de margens arenosas e o grupo de margens argilosas (teores de silte/argila maiores que 35%) possuem componentes situados em todos os segmentos estudados, e com taxas de erosão variadas. Esse resultado demonstrou que as taxas de erosão não são

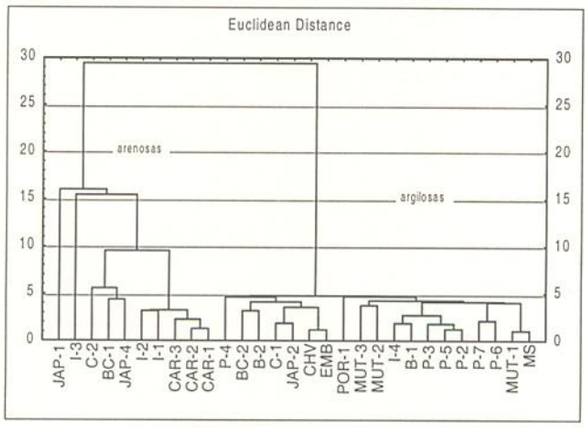

Figura 5 - Gráfico mostrando o resultado da análise de agrupamento entre as 29 seções.

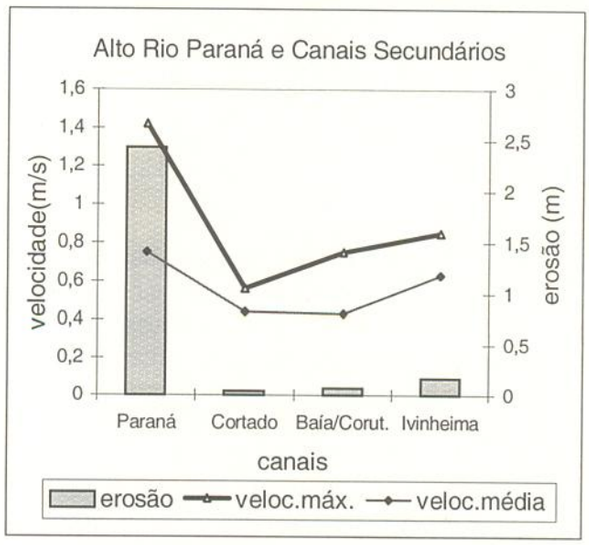

Figura 6 - Relacionamento entre as velocidades de fluxo e a taxa anual de erosão de margens nos canais do sistema de inundação do Alto Rio Paraná.

influenciadas diretamente pela composição das margens, o que, aliás, já era evidenciado pelos pequenos valores encontrados no Rio Ivinheima, onde há domínio de margens arenosas.

Tais resultados exigiram uma outra abordagem, quando então foi realizada uma análise preliminar dos valores médios das variáveis em cada segmento. O procedimento demonstrou que os canais com velocidade de fluxo mais elevada exibiam maiores taxas erosivas (Tab. 1 e Fig. 6).

Tal hipótese foi testada por meio de análise de correlação (regressão linear) entre a taxa de erosão média de cada segmento submetidos a maiores velocidades, e cada uma das outras variáveis (Tab. 2), e demonstram que as velocidades máximas e velocidades médias possuem maiores valores de correlação com as taxas erosivas, e que a composição mecânica não exerce influência.

Entretanto, a análise dos dados obtidos para as margens submetidas a velocidades de fluxo mais baixas, exposta na tabela 3, demonstra que em situação de baixa velocidade a composição da margem passa a ter um elevado controle sobre as taxas do processo erosivo.

Tabela 1 - Valores médios das variáveis obtidos em cada segmento estudado.

Canal	Padrão	Q (m^3/s)	E(m/ano)	Vel(m/s)	N.A.(m)	Sil+Arg %
Paraná	*entrelaçado*	9.000	2.43	1.42	3.86	56.65
Cortado	*Entrelaç. secund*	60	0.04	0.56	3.75	85.28
Baía/Corut.	*anastomosado*	40	0.07	0.75	4.26	63.19
Ivinheima	*anastomosado*	300	0.17	0.85	2.94	32.54

Tabela 2 - Correlação (r) entre a taxa de erosão média e as principais variáveis em margens sob alta velocidade de fluxo.

	Silte/Argila (%)	Vmédia (m/s)	Vmáx (m/s)	N.A. Var. (m)
Erosão	-0.13	0.83	0.96	0.15

Obs. Correlação através de regressão linear entre as variáveis para os 4 segmentos.

Tabela 3 - Correlação (r) entre a taxa de erosão média e as principais variáveis em margens sob baixa velocidade de fluxo.

	Silte/Argila (%)	Vmédia (m/s)	Vmáx (m/s)	N.A. Var. (m)
Erosão	0,97	0,89		

Uma vez que foi observado um duplo controle sobre a taxa de erosão, foi levantada a dúvida a respeito da relação linear entre as três variáveis. Desta forma optou-se pela aplicação da análise de regressão exponencial múltipla (exponential growth model) para a verificação do relacionamento entre a *taxa de erosão marginal*, a *velocidade de fluxo* respectiva e a *composição granulométrica* das margens, e para geração de um modelo preditivo. Os resultados demonstraram baixos índices de ajuste para os dados totais e para os dados provenientes do conjunto de margens argilosas, mas para as margens arenosas o ajuste foi alto (r: 0,992) e tal relacionamento está exposto no gráfico da figura 7, e o modelo preditivo com a equação está apresentada abaixo:

$$E = 0{,}0012822 + e^{(-2{,}5221777+(3{,}9364637\,V\,-0{,}0231509g))}$$

E: taxa de erosão das margens (m); ***V***: velocidade de fluxo nos canais (m/s); ***g***: característica granolométrica das margens (% se silte+argila)

Os resultados demonstram que o aumento da velocidade de fluxo promove um aumento exponencial da taxa de erosão, e que o teor de finos exerce forte influência para a redução desta taxa em velocidades superiores a um metro por segundo. Tal resultado contradiz a análise preliminar onde a análise de correlação indicou que a composição da margem é a principal condicionante da taxa de erosão quando as velocidades de fluxo são baixas. Tal discrepância pode ser devida a atuação de processos que não foram considerados tais como ação da chuva, de animais, ou resistência ao cisalhamento. Uma vez que tais margens apresentam baixos valores de recuo, os fatores com baixa influência no processo erosivo passam a ter maior significância, o que explicaria as baixas correlações obtidas pela análise exponencial múltipla dos dados totais e das margens argilosas.

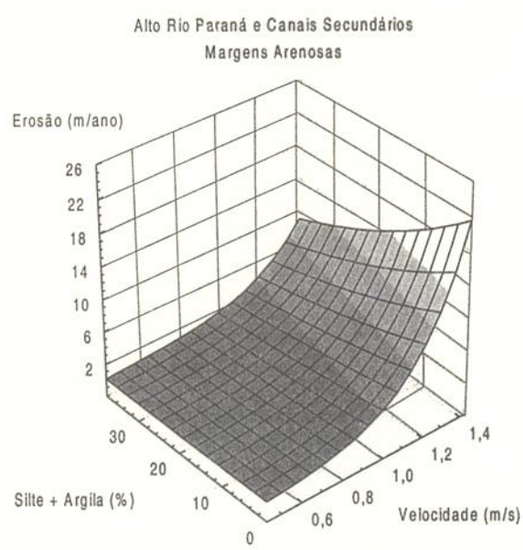

Figura 7 - Gráfico obtido por meio de regressão exponencial múltipla entre taxa de erosão, taxa de finos, e velocidade de fluxo.

Há um outro aspecto a ser considerado a respeito das relações obtidas por meio da análise de regressão múltipla, que é a possibilidade de que possa ser estabelecida uma velocidade crítica de remoção de partículas das margens, que pode ser obtida a partir da equação acima para as diferentes taxas de argila. A equação resultante da análise de regressão múltipla exponencial pode vir a ser uma excelente ferramenta para a previsão do grau de estabilidade de margens, quando associada aos modelos hidrodinâmicos, como o estabelecido por Martoni & Lessa (1999), para este trecho do Rio Paraná.

IMPACTOS NO MEIO FLUVIAL E A EVOLUÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS

Numa escala de tempo maior (últimos 80 anos), a história hidrológica do Rio Paraná parece conduzir a evolução e intensidade dos processos geomórficos na sua calha principal. Os dados da evolução erosivo-deposicional desde a década de 50, obtidos a partir de medidas de sobreposição de fotografias aéreas (Fernandez & Souza Filho, 1995; Souza Filho & Corrêa, 1999) mostraram que os valores se relacionam diretamente com a evolução hidrológica do Rio Paraná neste trecho avaliado, indicando que o Rio teve rápido ajustamento no seu trabalho frente às mudanças na sua hidrologia (Fig. 8).

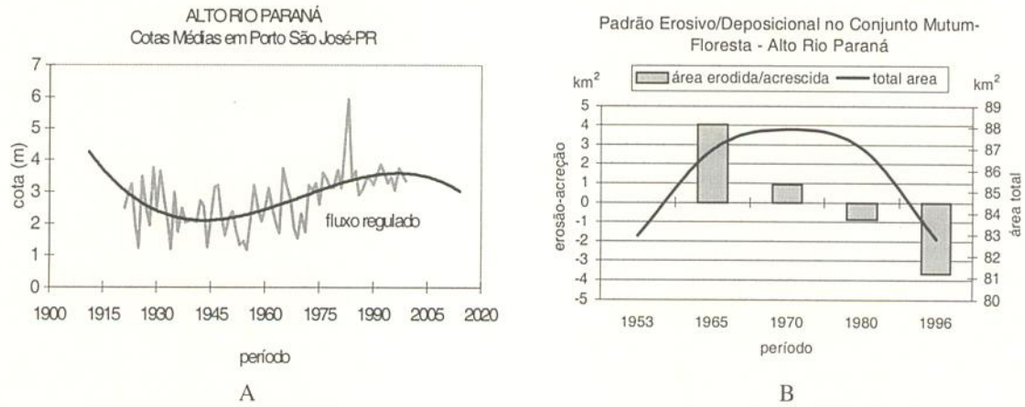

Figura 8 - Hidrologia do Alto Rio Paraná na estação de Porto São José-PR (A) e dinâmica erosivo-deposicional (B) do rio no trecho estudado.

Nota-se que o arquipélago vinha em fase de acresção até a década de 70. A partir desta, iniciou-se um estágio erosivo até a atualidade. Pode-se constatar também que a partir do início da década de 70, houve uma grande mudança no regime hidrológico do Rio nesta região, e que em parte, podem ser responsáveis pela alteração da dinâmica erosivo-deposicional no mesmo período. Tais mudanças hidrológicas, em parte, são diretamente relacionadas com o efeito regulador das grandes barragens em operação a montante, e impõem um grande potencial de controle de débitos ao Rio neste trecho, conforme discutido por Rocha *et al.* (1998; 2001).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Entre os diferentes canais fluviais avaliados, o segmento que apresentou maior instabilidade de margens foi o Rio Paraná, de padrão entrelaçado, e de maior energia. Ainda dentro do sistema entrelaçado, o canal Cortado, de baixa energia, apresentou os menores valores de erosão marginal, mostrando alta estabilidade. Os segmentos Rio Ivinheima e Rio Baía/canal Corutuba, do sistema anastomosado paralelo ao Rio Paraná, também apresentaram alta estabilidade marginal.

O grau de estabilidade das margens está associado à velocidade de fluxo a que elas estão submetidas, conforme mostra o resultado da análise de regressão linear entre a taxa de erosão e cada um dos outros fatores avaliados.

A composição das margens também exerce um papel importante quanto à estabilidade das margens, visto que a análise de regressão linear entre as taxas de erosão e o teor de silte/argila das margens de ambientes de baixa energia mostra um alto valor de correlação positiva, e que o gráfico obtido pela análise de correlação múltipla (modelo de crescimento exponencial) demonstra que a taxa de erosão aumenta conforme a diminuição do teor de silte/argila nas margens arenosas submetidas à mesma velocidade de fluxo.

A equação resultante da análise de regressão múltipla exponencial pode vir a ser uma excelente ferramenta para a previsão do grau de estabilidade de margens, quando associada a modelos hidrodinâmicos. A complementação dos estudos relativos às margens "argilosas" permitirá a obtenção de uma equação válida a todas as situações, e sua aplicação em modelos preditivos.

A cobertura vegetal e o grau de enraizamento não exercem papel significativo no controle da erosão marginal de margens arenosas e/ou àquelas submetidas a muito altas velocidades de fluxo.

A complementação dos estudos exige portanto um melhor conhecimento dos fatores que controlam as taxas de erosão de baixa intensidade, sobretudo em margens argilosas, em especial a influência de raízes nestas margens, e a atuação abrasiva das ondas provocadas por embarcações e sazonalmente pelos sistemas meteorológicos frontais.

Com relação ao aumento dos processos erosivos a partir da década de 70, serão ainda necessárias maiores investigações quanto aos efeitos das alterações hidrológicas do Rio Paraná em relação ao ciclo erosivo identificado, em função da concomitância do aumento das vazões médias e a sua regulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cooke, R. U. & Doornakamp, J.C. 1990. **Geomorphology in Environmental Management**. New York, Oxford University Press, 2. ed., 410 p.

Fernandez, O. V. Q. 1990. **Mudanças no canal fluvial do rio Paraná e processos de erosão nas margens: região de Porto Rico-PR**. Rio Claro, 96 p. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de São Paulo.

Fernandez, O. V. Q. & Fúlfaro, V. J. 1993. Magnitudes e Processos de Erosão Marginal no Rio Paraná, Trecho de Porto Rico-PR. **Geografia, 18**(1):97-114.

Fernandez, O. V. Q. & Souza Filho, E. E. 1995. Efeitos do regime hidrológico sobre a evolução de um conjunto de ilhas no Rio Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências, 43**:161-171.

Gupta, A. 1999. An Introduction to Large Rivers. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GEOMORPHOLOGY AND PALEOHYDROLOGY OF LARGE RIVERS/GLOCOPH-IAG, 1999, Goiânia. **Boletim Goiano de Geografia, Special Issue, 19**(1) 01-02 .

Hooke, J. M., 1979. An Analysis of the Processes of River Bank Erosion. **Journal of Hydrology, 42**:39-62.

Hooke, J. M., 1980. Magnitude and Distribution of Rates of River Bank Erosion. **Earth Surface Processes, 5**:143-157.

Hughes, D. J., 1977. Rates of Erosion on Meander Arcs. In: Gregory, K. J., (ed.). **River Channel Changes**. Chichester, John Wiley & Sons. 193-205.

IBGE, 1990. **Geografia do Brasil**. Região Sul. Rio de Janeiro. Vol. 2:189-218.

Leeder M. R. 1982. River Plains. In: Allen and Unwin (ed.). **Sedimentology, Process and Products**. Massachussets, Winchester. 142-155.

Petts, G. E. & Foster, I., 1990. **Rivers and Landscape**. The Athenaeum Press. 2. (ed.). New Castle, Great Britain. 274 p.

Martoni, A. M., 1999. Modelagem Hidrodinâmica do Canal do Rio Paraná - Trecho P. São José - Porto 18. Parte I: Características físicas do canal. **Acta Scientiarum, 21**(4):961-970.

Rocha, P. C., 1998. Considerações Sobre a Hidrodinâmica e a Estabilidade de Margens no Sistema Rio Baía/Canal Corutuba/Rio Ivinheima, na Planície Aluvial do Alto Rio Paraná, na Região de Porto Rico-PR. **Revista Geosul, 14**(27): 563-568.

Rocha, P. C. & Souza Filho, E. E. 1996, Erosão Marginal em Canais Associados ao Rio Paraná, na Região de Porto Rico-PR. **Boletim Paranaense de Geociências, 44**:97-116.

Rocha, P. C., Souza Filho, E. E. & Fernandez, O. V. Q. 1999. Intensity of Erosive Processes at Channel Banks of the Upper Parana River, Porto Rico Town Area, Parana State (Brazil). In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GEOMORPHOLOGY AND PALEOHYDROLOGY OF LARGE RIVERS – GLOCOPH, 1999,Goiânia,GO. **Boletim Goiano de Geografia, Special Issue, 19**(1): 27-31.

Smith, D. G. 1976. Effect of vegetation on lateral migrations of anastomosed channels of glacier meltwater river. **Geological Society American Bulletin, 87**:857-860.

Souza Filho, E. E., 1993. **Aspectos da Geologia e Estratigrafia dos Depósitos Sedimentares do Rio Paraná entre Porto Primavera (MS) e Guaíra (PR)**. São Paulo. 214p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Souza Filho, E. E. & Stevaux, J. C. 1997. Geologia e Geomorfologia do Complexo Rio Baía, Curutuba, Ivinheima. In: Vazzoler, A. E. A. M., Agostinho, A. A. and Hahnn, N. S. (eds.)., **A Planície De Inundação Do Alto Rio Paraná**. UEM-Nupelia, Maringá-PR, p. 3-46.

Souza Filho, E. E. & Corrêa, G. T. 1999. Comparação Entre as Variações de Área de Dois Arquipélagos do Rio Paraná nas Proximidades de Porto Rico(PR). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 7., 1990, Belo Horizonte. **Anais....** Belo Horizonte, p. 159-160.

Stevaux J.C., 1994. The Upper Parana River (Brazil): Geomorphology, Sedimentology and Paleoclimatology. **Quaternary International, 21**:143-161.

Stevaux, J.C., Souza Filho, E.E. & Jabur, I.C., 1997. A História Quaternária do Rio Paraná em seu Alto Curso. In: Vazzoler, A.E.A.M., Agostinho, A.A. and Hahnn, N.S. (eds.). **A Planície De Inundação Do Alto Rio Paraná**. Maringá, UEM-Nupelia. p. 47-72.

Thomaz, S.M., Roberto, M.C. & Bini, L.M. 1997. Caracterização Limnológica dos Ambientes Aquáticos e Influência dos Níveis Fluviométricos. In: Vazzoler, A.E.A.M., Agostinho, A.A. and Hahnn, N.S. (eds.). **A Planície de Inundação do Alto Rio Paraná**. Maringá, UEM-Nupelia. p. 73-102.

Twidale, C.R. 1964. Erosion of a Alluvial Bank at Birdwood, South Australia. Zeitschrift Fr. **Geomorfologie, 18**:189-211.

Wolman, M.G. 1959. Factors Influencing of a Cohesive River Bank. **American Journal Science, 257**: 204-216.