



Características Hidráulicas e Morfológicas do Rio Paraná na seção Porto Seção José - PR

Débora Pinto MARTINS

José Cândido STEVAUX

Universidade Estadual de Maringá, GEMA – Grupo de Estudos Multidisciplinares do Ambiente - Av.
Colombo, 5790, Bloco 024, 87020-900 Maringá, PR, Brasil.
E_mail: deby.martins@zipmail.com.br, jcstevaux@uem.br

Palavras-chave: formas de leito, morfologia, batimetria

Eixo Temático: Gestão de Bacias Hidrográficas

INTRODUÇÃO

O conhecimento das características e da dinâmica das formas de leito dos rios é de grande interesse não apenas no estudo da geomorfologia e da hidráulica fluvial, mas também em vários problemas concernentes às ciências ambientais. Extração de areia para construção, dragagem para implantação e conservação de hidrovias, assoreamento de barragens, implantação de praias artificiais e portos são algumas das atividades mais frequentes em rios de médio e grande porte que dependem diretamente desse conhecimento.

No alto rio Paraná, na seção Porto São José, a pressão impactante decorrente da represa de Porto Primavera, somada à ativa extração de areia, ressaltam a importância de se desenvolver estudos voltados para a caracterização morfométrica e morfológica bem como para o conhecimento da dinâmica hidrosedimentológica do canal neste setor.

A proposta do presente trabalho é a caracterização da topografia de fundo do rio Paraná, na seção de Porto São José, através da realização de sucessivos levantamentos batimétricos e coleta de material de fundo.

É sabido que as características morfológicas e morfométricas do leito de um canal fluvial estão fortemente relacionadas à dinâmica global do rio de tal forma que seus parâmetros característicos podem ser usados para o entendimento da hidrologia, geomorfologia e outros eventos ambientais que possam ocorrer no rio.



Este trabalho integra-se a um projeto maior, voltado para a aplicação de uma metodologia desenvolvida para medição da carga de fundo em canais aluviais, a qual foi aplicada no mesmo setor deste estudo.

ÁREA DE ESTUDO

O rio Paraná, principal canal fluvial da bacia do Prata, percorre uma distância aproximada de 3.965 km, desde a sua nascente, na confluência dos rios Grande e Paranaíba, até sua foz, no estuário do rio da Prata (OEA, 1971 apud ORFEO & STEVAUX, 2002) (Figura 1).

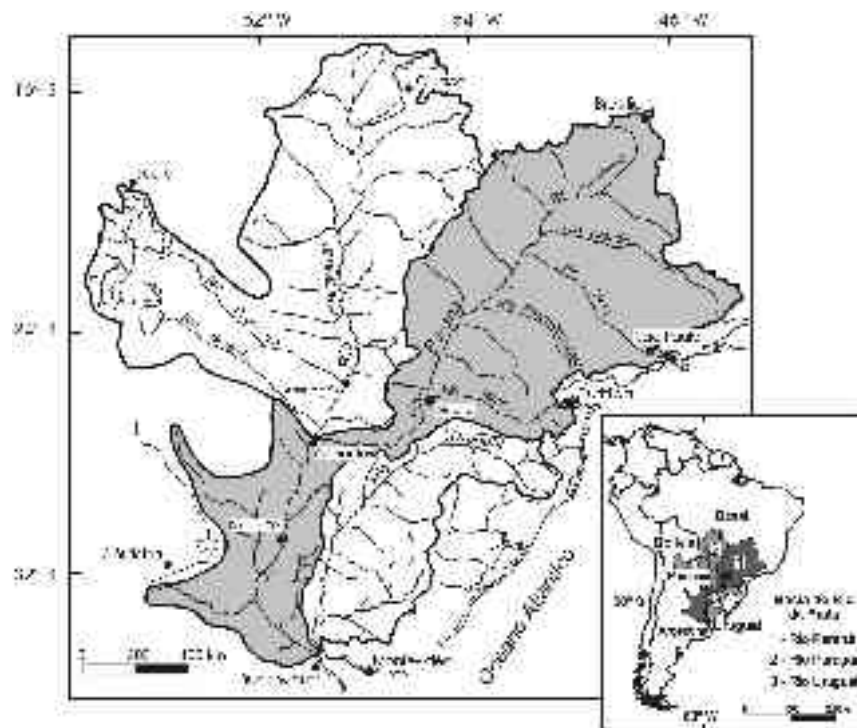


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Paraná na bacia do rio da Prata.

A área deste estudo está inserida na região de Porto Rico, região compreendida entre a foz do rio Paranapanema e a foz do rio Ivinhema. A seção de Porto São José, PR ($22^{\circ}45'52''S$ e $53^{\circ}10'34''W$), apresenta um trecho de canal único, concentrando toda energia do escoamento da água, que se divide ao deparar-se com um trecho entrelaçado a jusante.

Neste setor, o rio sofre a influência direta dos barramentos a sua montante: da represa de Porto Primavera, localizada a uma distância de 35 km, e da represa de Rosana, localizada no rio Paranapanema a 40 km do setor de estudo (Figura 2).

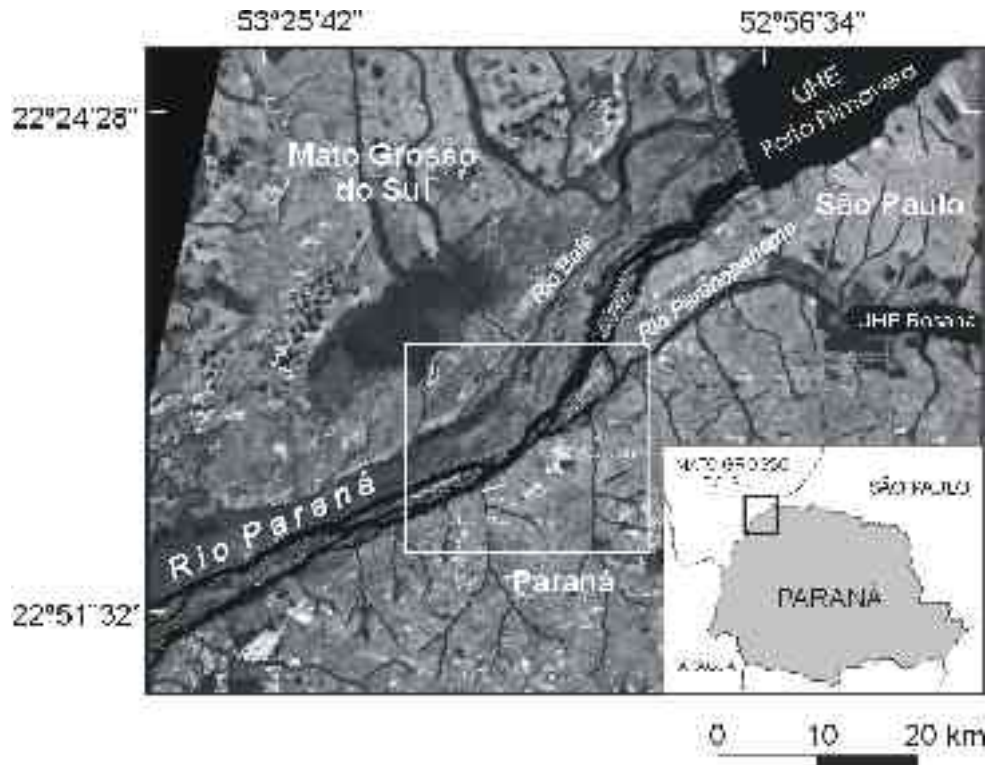


Figura 2 – Área de Estudo em Porto São José – Imagem LANDSAT ETM+7 – 18/11/1999.

METODOLOGIA

Para determinar as características hidráulicas e geométricas da seção de estudo foram realizadas sucessivos levantamentos batimétricos longitudinais e transversais ao longo do canal.

O trecho escolhido para realização dos perfis batimétricos e quantificação da carga de fundo está situado na localidade de Porto São José - PR, a uma distância de 2.232 km da foz do rio Paraná. Neste local o rio Paraná apresenta um canal único, sendo um ponto nodal (*node point*, conforme COLEMAN, 1969) entre dois trechos entrelaçados. Segundo Stevaux (1993), a seção no ponto nodal deve ser sempre utilizada como parâmetro correlativo às seções a jusante. Este local concentra toda a energia do escoamento da água, que se divide ao deparar-se com o trecho entrelaçado a jusante.

Durante este estudo foram realizadas três campanhas de campo, realizadas nos meses de nov/dez de 2002, jun/jul de 2003 e nov/dez de 2003.



No período de realização das campanhas de campo, o rio Paraná, na seção Porto São José, apresentou descargas médias de 6.256,5 m³/s, 7.625,63 m³/s e 7.625,6 m³/s respectivamente.

O sistema utilizado para coleta dos dados batimétricos é constituído de uma ecossonda modelo Furuno GP-1650F (Figura 10) e um *Sistema de Posicionamento Global* (GPS), acoplados a um computador portátil. Com o auxílio dos *softwares Fugawi3*, utilizado na coleta de dados e geração dos perfis, e *Surfer 8.0*, utilizado na interpolação dos pontos batimétricos, foram elaborados perfis ecobatimétricos georreferenciados e mapas batimétricos da seção de estudo.

Feito o levantamento batimétrico e tratamento dos dados, a etapa seguinte consistiu na caracterização e determinação das características morfométricas e morfológicas da seção de estudo.

CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DO CANAL DO RIO PARANÁ NA SEÇÃO PORTO SÃO JOSÉ

Na seção de Porto São José, o rio Paraná, apresenta uma largura média de 1.226 m e o talvegue fortemente desviado para margem esquerda. Ao longo das ilhas, o rio possui dois canais principais, dos quais o esquerdo é o mais profundo (SOUZA FILHO & STEVAUX, 1997). Neste setor, o rio apresenta uma profundidade média de 10,04 m e um raio hidráulico (relação áreas da seção transversal e o perímetro molhado - $R=A/P$) de 9,64 m.

A declividade da linha da água, determinada por Martonni & Lessa (1999), a partir de registros de níveis diários da régua da estação fluviométrica de Porto São José e de uma segunda régua instalada a aproximadamente 7,2 km a jusante da primeira, foi determinada em $2,02 \times 10^{-5}$ m/m.

Na margem esquerda do trecho de estudo encontra-se instalada a Estação Fluviométrica de Porto São José (22°42'38.47" S, 53°11'06.67" W), em operação desde 1964. Durante o período de 1964 a 2003, a vazão média anual registrada nesta estação é de 8.912 m³/s, com desvio padrão de 3.442 m³/s. A vazão mínima registrada foi de 2.551 m³/s (em 22/09/1969) e a vazão máxima 33.740 m³/s (em 18/02/1983).

Tabela 1 – Caracterização Morfométrica do Rio Paraná na Seção Porto São José



RIO PARANÁ – SEÇÃO PORTO SÃO JOSÉ

Largura da Seção	1.226	m
Profundidade Média	10,04	m
Raio Hidráulico	9,64	m
Declividade da linha da água	$2,02 \times 10^{-5}$	m/m
Velocidade de Fluxo	0,90	m/s
Descarga média	8.912	m ³ /s
Cota média	330	m

CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA NO MATERIAL DE FUNDO

Objetivando determinar as características do material sedimentar de fundo foram coletadas amostras de sedimentos ao longo da seção de estudo. Para tanto, utilizou-se um amostrador de fundo do tipo *Van Veen* (amostrador de mandíbulas).

O gráfico resultante das análises sedimentológicas (figura 3) mostra uma gradação decrescente de textura do material de fundo, da margem direita (Mato Grosso do Sul) em direção a margem esquerda (Paraná).

Nos perfis P1 e P2 (margem direita), a distribuição granulométrica do material apresentou maior concentração de areia grossa e muito grossa, com valor acumulado de 48,35 % para o P1 e 73,62 % para o P2. Acredita-se que a concentração de material mais grosseiro neste perfis se deve ao fato destes estarem situados mais próximo a margem direita do rio, onde os processos de erosão marginal contribuem com material de granulometria mais grossa.

Quanto aos perfis P3 e P4 (margem esquerda), observou-se que as classes correspondentes a areia grossa e média foram as que apresentaram maior concentração, com 90,64 % para P3 e 68,74 % para P4.

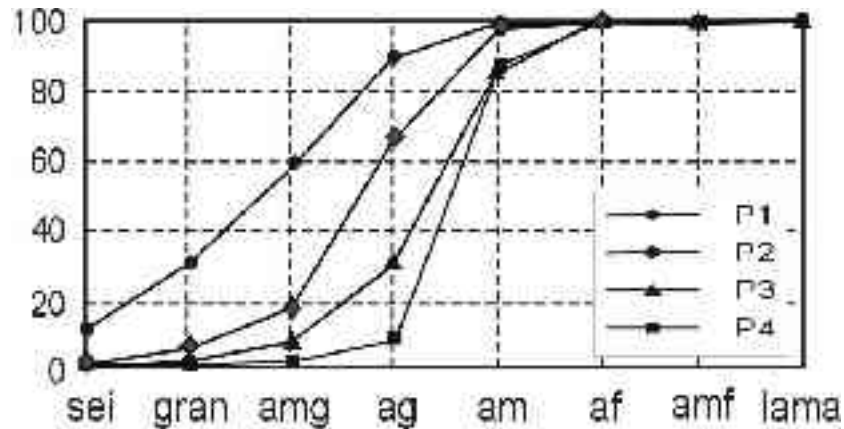


Figura 3 – Distribuição granulométrica dos depósitos de fundo no rio Paraná na seção Porto São José (2003).

CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DA TOPOGRAFIA DE FUNDO NA SEÇÃO DE PORTO SÃO JOSÉ

O canal fluvial é caracterizado pelos seus aspectos morfológicos (padrão, largura, profundidade, sinuosidade) e por sua descarga (períodos de cheia e vazante, tipo de carga sedimentar, tipo de fluxo) (CHRISTOFOLETTI, 1981).

Nos canais fluviais ocorrem diferentes tipos de fluxo. A caracterização do regime de fluxo de um rio é dada pela equação de *Reynolds*, da qual é derivado um coeficiente adimensional, o *número de Reynolds*. No seu cálculo, são consideradas as características do fluxo (velocidade, profundidade e largura) e as propriedades do fluido (densidade e viscosidade).

O *número de Reynolds* é usado para determinar o regime de fluxo de um corpo d'água é *laminar ou turbulento*. Aplicando a equação de *Reynolds* no rio Paraná no trecho deste estudo, para a água a uma temperatura média de 25°C e velocidade de fluxo de 0,90 m/s, obteve-se um valor igual $9,68 \times 10^9$, o que enquadra o rio Paraná na categoria de fluxo turbulento ($Rey > 2500$).

A interação mútua entre o material sedimentar que compõe o leito e o regime de fluxo torna possível o desenvolvimento de uma grande variedade de formas topográficas de leito. Nesta perspectiva, a topografia do leito apresenta uma natureza deformável e de rápida mutabilidade (CHRISTOFOLETTI, 1981). Nos canais aluviais, a rugosidade do fundo e a configuração topográfica do leito oferecem resistência ao fluxo, e os processos morfogenéticos atuantes moldam o fundo quando conseguem superar essa resistência e dar início ao transporte da carga sedimentar.



Martonni & Lessa (1999) determinaram o coeficiente de rugosidade de *Manning* em diferentes seções do canal do rio Paraná a partir de levantamentos batimétricos e medidas sistemáticas de vazão e nível da água. Para a Seção Porto São José os referidos autores obtiveram os valores de 0,012, para rugosidade média observada e 0,022, para a rugosidade média ajustada pelo modelo hidrodinâmico. Neste caso os autores sugerem um valor médio entre o valor experimental e o ajustado pelo modelo hidrodinâmico utilizado.

A representação tridimensional do fundo do canal pode ser utilizada para demonstrar rugosidade do fundo, bem como ilustrar as características morfológicas gerais do canal, dadas em função das variações no fluxo. No caso da seção Porto São José, é possível observar a rugosidade do fundo, dando origem a uma grande variedade de formas topográficas de leito (Figura 4).

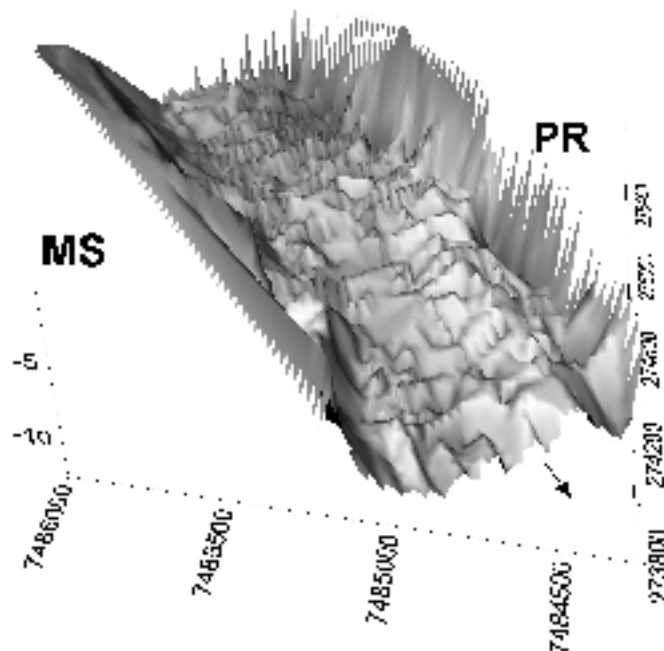


Figura 4 – Modelo 3D do rio Paraná na seção Porto São José (2003).

Analisando os perfis batimétricos levantados, observou-se que as dunas foram as formas de leito predominantes. As dunas são formas assimétricas com declividade suave para montante e íngreme para jusante, podendo apresentar pequenas ondulações superpostas. São geradas sob condições de fluxo tranquilo, em geral apresentam-se para valores de *Froude* $\cong 1$.



O número de Froude (F), é um importante coeficiente nos estudos da dinâmica dos fluídos e nos canais naturais, pode ser definido como a relação entre profundidade média do canal e a força da gravidade. Este número é usado para determinar se um *fluxo turbulento* é *fluvial ou corrente, rápido ou torrencial*.

Com relação ao número de Froude, o rio Paraná, na seção de Porto São José, apresenta regime do tipo fluvial ($F < 1$), uma vez que apresenta número de Froude igual a 0,90, fator este que proporciona o desenvolvimento de dunas ao longo do canal.

A análise comparativa dos perfis ecobatimétricos mostraram que as formas de leito encontradas no trecho de estudo apresentam pequeno aumento na altura das dunas da margem direita (Mato Grosso do Sul) em direção a margem esquerda (Paraná), com alturas variando de 0,60 m a 2,30 m (Figura 5), e comprimentos entre 50 e 150 m.

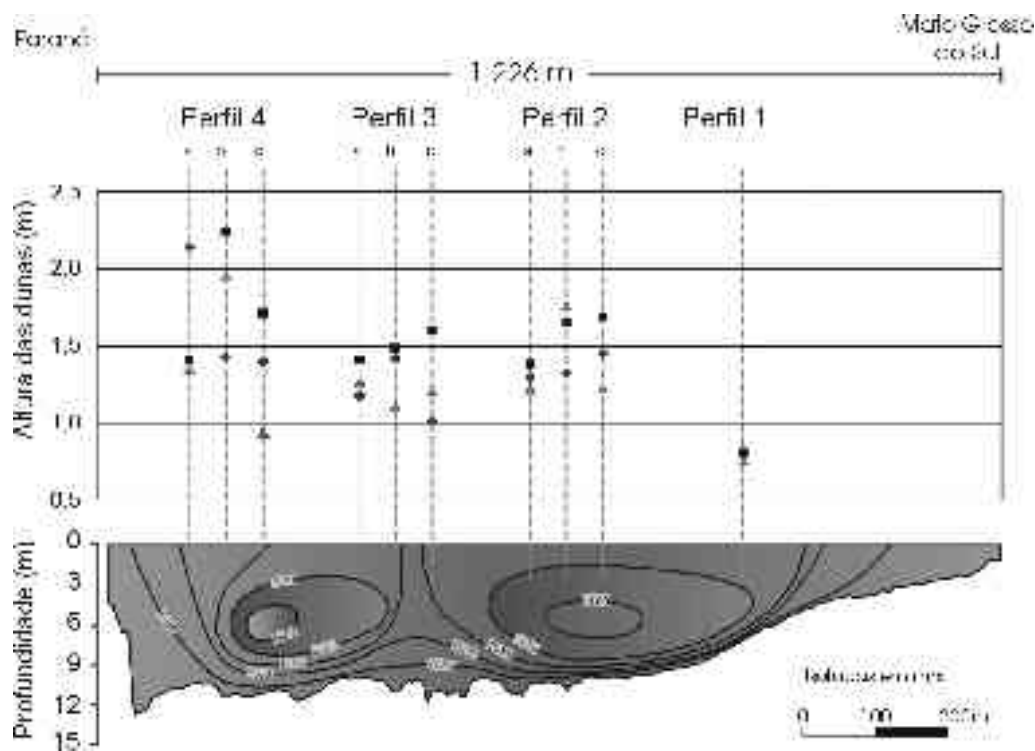


Figura 5 – Altura média das dunas no rio Paraná na seção Porto São José - 2003.

A carga transportada por um curso d'água, seja dissolvida, em suspensão ou de fundo, é produto das interações entre a massa líquida em movimento, a superfície do canal fluvial e os diferentes tipos de sedimentos transportados. São duas as forças principais que atuam sobre a



dinâmica fluvial e o transporte de sedimentos: a *força da gravidade* e a *Tensão de cisalhamento* (CHRISTOFOLETTI, 1981).

A *tensão de cisalhamento* (τ) por unidade de área corresponde a força de atrito existente entre o líquido em movimento e o canal, implicando em uma resistência ao escoamento e ao transporte de sedimentos.

Analisando a da variação da tensão de cisalhamento em função da rugosidade do fundo (Figura 6), observa-se um valor crescente da margem do Mato Grosso do Sul em direção a margem do Paraná. O valor crescente da tensão de cisalhamento em direção a margem do Paraná está associado a um aumento na rugosidade do fundo nesta direção, uma vez que as dunas que cobre o fundo do canal apresentam um aumento na sua altura e comprimento neste sentido. Este aumento da tensão acaba gerando um maior atrito, o que implica em uma maior resistência ao movimento das partículas sólidas.

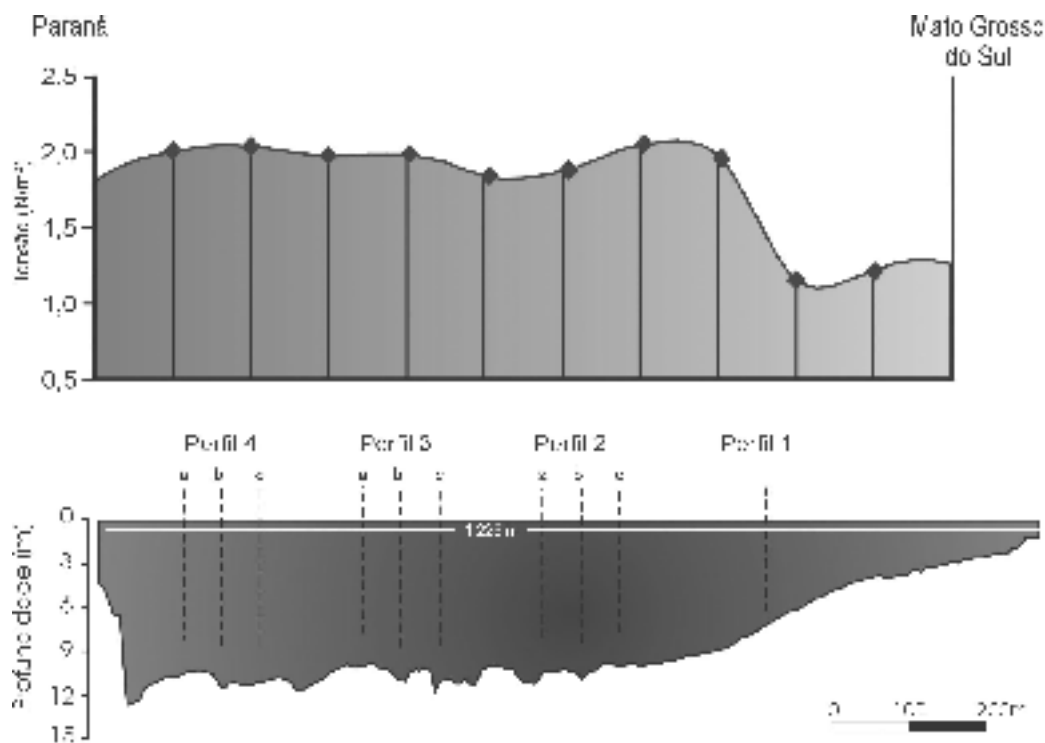


Figura 6 – Tensão de cisalhamento devido a rugosidade de fundo.

Para avaliar a potência de uma corrente e a sua influência no transporte de sedimentos utiliza-se a tensão de cisalhamento total (τ) e a velocidade de cisalhamento total (ou velocidade crítica (V_c)).



Para seção Porto São José, obteve-se *Tensão de Cisalhamento* (τ) igual a 1,90 N/m² (ou 0,19 kgf/m²) e uma *Velocidade Crítica* (V_c) de 0,043 m/s.

A energia do total canal ou *stream power* (Ω), e a energia do canal por unidade de largura (Ω/L ou ω), são variáveis importantes na hidráulica fluvial, pois representam o trabalho despendido ou a energia perdida pelo canal devido ao regime de fluxo. Na seção de Porto São José a energia total do canal, para uma temperatura de 25°C e utilizando-se os valores de descarga média, é de 17.460 W/m e a energia específica é de 14,24 W/m².

DESLOCAMENTO DAS FORMAS DE FUNDO

Para determinar o deslocamento linear das formas de leito foram levantados sucessivos perfis batimétricos longitudinais ao longo do canal com um intervalo de tempo pré-determinado e, com a ajuda de um sistema de navegação por GPS, procurou-se percorrer o mesmo caminho nos dois levantamentos realizados.

Tomando como referência as coordenadas geográficas obtidas nos dois levantamentos, os perfis foram combinados em um mesmo gráfico, o que permitiu medir o deslocamento linear das dunas durante o período analisado (Figura 7).

O deslocamento foi determinado a partir da diferença entre a crista da duna no primeiro e no segundo levantamento.

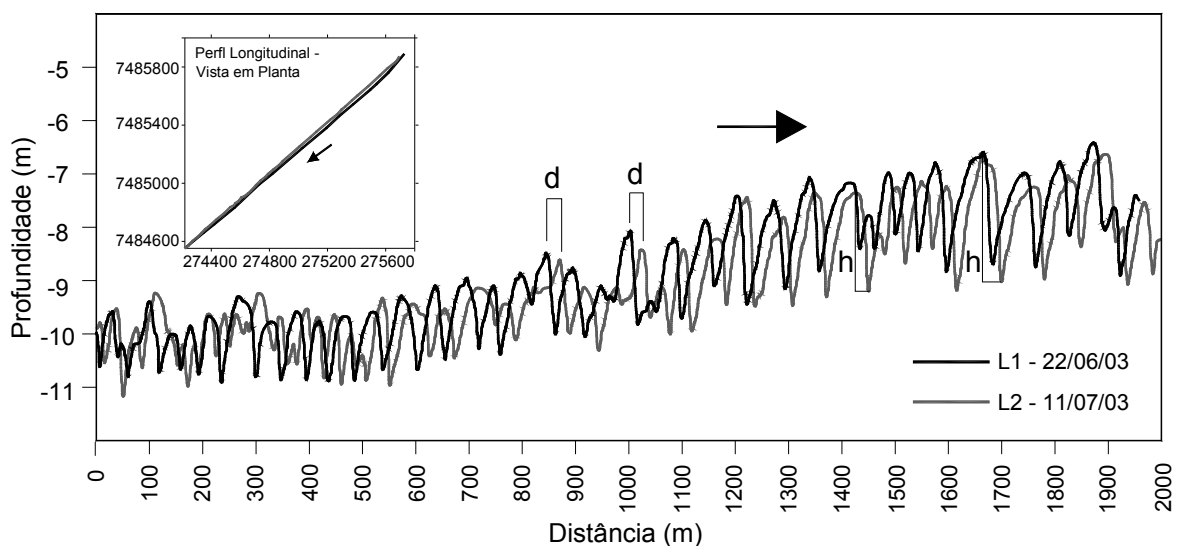




Figura 7 – Perfil longitudinal do rio Paraná na seção Porto São José (2003)

Durante o período analisado, as formas de fundo apresentaram um deslocamento linear médio de 48,3 m/mês (1,61 m/dia), para uma velocidade de fluxo entre 0,45 m/s a 0,90 m/s, o que representa um transporte médio de 2.812 ton/dia de material por arraste.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O movimento dos sedimentos no leito fluvial depende da estrutura mecânica do fluxo, configurando um sistema dinâmico e em permanente evolução. Assim sendo, a seguir são apresentados alguns parâmetros hidráulicos determinados para o Rio Paraná na Seção Porto São José (Tabela 2).

Tabela 2 - Parâmetros Hidráulicos do rio Paraná na Seção Porto São José

Reynolds	9,68 x 10 ⁹	
Froude	0,90	
Energia do Canal (Stream Power)	17.460	W/m
Energia Específica	14,24	W/m ²
Tensão de Cisalhamento	0,19	kgf/m ²
Velocidade Crítica	0,043	m/s
Manning	0,017	

Quanto aos dados obtidos através dos levantamentos batimétricos pode-se dizer que:

Os perfis batimétricos levantados ao longo deste trabalho comprovaram que as dunas são as formas de leito predominantes no canal do rio Paraná, na seção de Porto São José. É possível afirmar, ainda, que as dunas apresentaram uma regularidade quanto a sua forma, a qual, na maioria das vezes, se mantém à medida que as dunas se deslocam para jusante.

No alto curso do rio Paraná, Stevaux (1993) identificou a presença de quatro formas principais: ondulações (*ripples*), que são formas efêmeras bastante dinâmicas com altura variando de poucos centímetros a 0,30 m; megaondulações (*megaripples*) que são formas de grande mobilidade com alturas variando entre 0,30 até 1,5 m e encontradas em profundidades superior a 3 m; dunas subaquosas, que apresentam variações de tamanho que vai de 1,5m a 7,5 m de altura e 50 a 500 m de comprimento sendo esta a forma mais comum encontrada no rio Paraná; ondas de areia, que são formas de leito mais desenvolvidas chegando a atingir 13 m de altura e 1200 m de comprimento.



Durante a realização deste estudo as formas de fundo apresentaram altura média variando entre 0,60 m e 2,30 m e comprimento entre 50 m e 150 m, o que representa uma redução significativa se comparados aos valores determinados por Stevaux (1993).

Quanto ao deslocamento linear médio de 48,3 m/mês (1,61 m/dia), para uma velocidade de fluxo entre 0,45 m/s a 0,90 m/s. Stevaux & Takeda (1995), analisando a migração das formas de leito no ano de 1994 no talvegue do rio Paraná, no mesmo trecho desta pesquisa, obtiveram uma taxa de 67 m/mês ou seja, uma velocidade de deslocamento linear 27 % superior a verificada neste trabalho. Crispim (2001), analisando a migração das na mesma seção no ano de 2000, encontrou valores médios de 62 m/mês ou seja, uma redução de 7,5 % em relação aos valores encontrados por Stevaux & Takeda (1995) e 22 % superior ao registros atuais.

Provavelmente as diferenças verificadas na velocidade de deslocamento das formas de fundo estão relacionadas às mudanças impostas pelos barramentos de montante. Segundo Rocha *et al.* (1998), “o controle das descargas efetuado pelas barragens tem alterado as características hidrodinâmicas naturais do rio, os aspectos erosivos e de transporte nos trechos sob influência da obra”.

REFERÊNCIAS

- CHRISTOFOLETTI, A., 1981. **Geomorfologia Fluvial: O Canal Fluvial**. São Paulo. Edgard Bulücher. 313 p.
- COLEMAN, J., 1969. **Brahamaputra River: channel process and sedimentation**. *Sedimentary Geology*, v. 3, p. 129-139.
- MARTONI, A. M., LESSA, R. C., 1999. **Modelagem hidrodinâmica do canal do rio Paraná, trecho Porto São José – Porto 18. Parte 1: Caracterização Física do Canal**. Universidade Estadual de Maringá. *Acta Scientiarum* (21) pp. 950-959.
- ORFEO, O., STEVAUX, J. C., 2002. **Hydraulic and morphological characteristics of middle and upper reaches of the Paraná River** (Argentina and Brazil). *Geomorphology* 44:309-322.



SOUZA FILHO, E. E., 1993. **Aspectos da Geologia e Estratigrafia do rio Paraná entre Porto Primavera (MS) e Guaíra (PR)**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências – USP. São Paulo. 214 p.

SOUZA FILHO, E.E., STEVAUX, J.C., 1997. **Geologia geomorfologia do complexo rio baía, Curutuba, Ivinheima**. In: Vazzoler, A.E.A.M., Agostinho, A.A, Hahn, N.s. (organizadores), A planície de inundação do alto rio Paraná. UEM-Nupélia.

STEVAUX, J.C., 1993. **O rio Paraná: geomorfogênese, sedimentação e evolução quaternária do seu curso superior (região de Porto Rico-PR)**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências/USP. São Paulo.

STEVAUX, J. C., 1994. **The upper Paraná River (Brazil): Geomorphology, sedimentology and paleoclimatology**. Quaternary International, v.21:143-161.

STEVAUX, J. C., TAKEDA, A. M., (1995). **Interaction between benthic community and fluvial geomorphological processes in the upper Paraná River (Brazil)**. XXVI Congress of International Association of Theoretical and Applied Limnology. São Paulo, Brazil. Abstracts, p 30.